

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

EDNEI DUARTE REZENDE

**ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS 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.**

VOLTA REDONDA

2019

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE MESTRADO PROFISSIONAL EM MATERIAIS

ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS 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 apresentada ao Mestrado Profissional em Materiais do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Materiais, sob a orientação da Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição, na área de concentração de processamentos e caracterização de materiais e linha de pesquisa de materiais metálicos.

Aluno:
Ednei Duarte Rezende

Orientadora:
Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

Coorientador:
Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho

VOLTA REDONDA

2019

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tacão Wagner - CRB 7/RJ 4316

R467e Rezende, Ednei Duarte.

Elaboração de procedimentos 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. / Ednei Duarte Rezende. - Volta Redonda: UniFOA, 2019. 77 p. : II

Orientador (a): Profª Drª Monique Osório Talarico da Conceição

Dissertação (Mestrado) – UniFOA / Mestrado Profissional em Materiais, 2019

1. Materiais - dissertação. 2. Metal patente - reaproveitamento. 3. Metal Babbitt. I. Conceição, Monique Osório Talarico da. II. Centro Universitário de Volta Redonda. III. Título.

CDD – 620.1

FOLHA DE APROVAÇÃO

Aluno: Ednei Duarte Rezende

ELABORAÇÃO DE PROCEDIMENTOS 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.

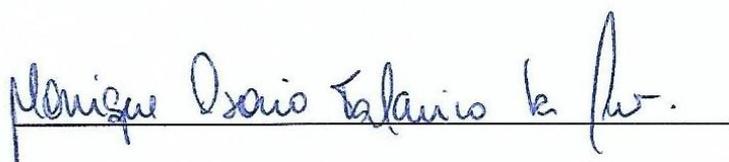
Orientador

Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição

Coorientador

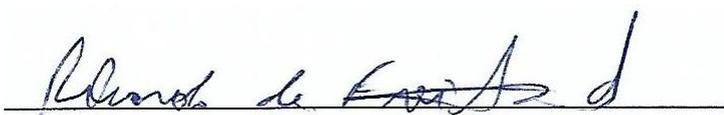
Prof. Dr. Luiz de Araújo Bicalho

Banca Examinadora:



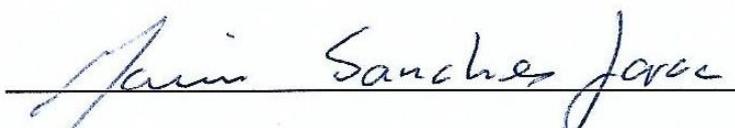
Handwritten signature of Monique Osório Talarico da Conceição in blue ink, written over a horizontal line.

Profa. Dra. Monique Osório Talarico da Conceição



Handwritten signature of Ricardo de Freitas Cabral in blue ink, written over a horizontal line.

Prof. Dr. Ricardo de Freitas Cabral



Handwritten signature of Maurício Sanches Garcia in blue ink, written over a horizontal line.

Prof. Dr. Maurício Sanches Garcia

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus e a Cristo Jesus por me proporcionar saúde e sabedoria para realização deste trabalho.

À minha esposa Tatiana, que sempre esteve ao meu lado ajudando, apoiando e incentivando.

À minha filha Maria Vitória que soube ser paciente e entender a falta de atenção em determinados momentos.

Agradeço também aos técnicos e engenheiros do AMRJ que me ajudaram de maneira grandiosa e com dedicação extraordinária na execução deste trabalho.

Ao Professor Bicalho que durante este trabalho me orientou, não somente na parte acadêmica, mas também para vida.

E à Professora Monique que chegou no momento certo com a motivação extra para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

O presente trabalho concentrou estudos na possibilidade de reaproveitamento de metal patente, um material com características antifricção, cuja liga é formada por antimônio, estanho e cobre, muito utilizado nos mancais de deslizamento das linhas de eixo dos navios da Marinha do Brasil, que ao invés de ser descartado, poderá ser recuperado e utilizado para a produção de novos mancais. Quando um mancal perde suas propriedades e necessita ser substituído, o metal patente que recobre sua superfície é descartado devido à alegada contaminação. Para validar esta informação foram realizados testes, tais como, microscopia eletrônica de varredura (MEV), microscopia óptica (MO), análise química e ensaio de tração, com amostras dos materiais descartados e dos materiais utilizados na fabricação de mancais novos. Desta forma, comprovou-se que não há contaminação do material, mas sim alteração na composição quantitativa da liga. O resultado da análise química mostrou que um dos elementos com maior diferença foi o antimônio, seu % em peso reduziu de 7,96% para 7,3%. Esta redução fez com que o composto SnSb não se apresentasse na forma de cubos e sim diluído na matriz de Sn como observado na análise por MEV. Porém esta alteração poderá ser corrigida com simples ajustes no processo, como por exemplo, a separação dos mancais conforme a sua liga de metal patente. Além disso, a implementação desses ajustes é de baixo investimento e é possível realizar os testes em uma quantidade razoável de material, não sendo necessário realizá-los toda vez que um único mancal for fundido, mostrando que o processo é viável financeiramente e tecnicamente. A partir do procedimento técnico gerado com este trabalho sugere que a economia por ano com a recuperação do metal patente seria de R\$ 316.000,00.

Palavras-chave: Reaproveitamento de Metal Patente, Metal Babbitt, Mancal de Deslizamento, ligas de chumbo-estanho-antimônio, ligas de estanho-antimônio-cobre.

ABSTRACT

The present study focused on the possibility of reuse of patent metal, a material with antifriction characteristics, whose alloy is formed by antimony, tin and copper, widely used in the sliding bearings of the axis lines of ships of the Brazilian Navy, which instead if discarded, can be recovered and used for the production of new bearings. When a bearing loses its properties and needs to be replaced, the patent metal that recovers its surface is discarded due to alleged contamination. To validate this information, tests were carried out, such as scanning electron microscopy (SEM), optical microscopy (OM), chemical analysis and tensile testing, with samples of discarded materials and materials used in the manufacture of new bearings. In this way, it was verified that there is no contamination of the material, but rather change in the quantitative composition of the alloy. The result of the chemical analysis showed that one of the elements with the biggest difference was antimony, its weight % reduced from 7.96% to 7.3%. This reduction caused that the SnSb compound did not appear as cubes but rather diluted in the Sn matrix as observed in SEM analysis. However, this change can be corrected with simple adjustments in the process, for example, the separation of the bearings according to their patent metal alloy. In addition, the implementation of these adjustments is of low investment and it is possible to perform the tests in a reasonable amount of material, not having to perform them every time a single bearing is cast, showing that the process is feasible financially and technically. From the technical procedure generated with this work suggests that the economy per year with the recovery of the patent metal would be \$ 316,000.00.

Key words: Metal Reapproval, Metal Babbitt, Sliding Bearing, lead-tin-antimony alloys, tin-antimony-copper alloys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases do Metal Patente. Fonte: [4]	20
Figura 2. Microestrutura do metal patente com aumento de 100X. Fonte: [6].....	21
Figura 3. Microestrutura do metal patente com aumento de 200X. Fonte: [6].....	21
Figura 4. Diagrama ternário de fases Sb-Pb-Sn. Fonte: [3].....	23
Figura 5. Propriedades físicas de ligas de metal patente. Fonte: [11].....	26
Figura 6. Mancal de deslizamento (a) e Mancal de rolamento (b). Fonte: [43]	28
Figura 7. Mancais de escora. Fonte: [16]	29
Figura 8. Tipos de desgastes, adaptado de [3]	31
Figura 9. Mancal apresentando alto índice de desgaste. Fonte: [40].....	33
Figura 10. Diagrama de Fases Ternário Sn-Sb-Cu adaptado de [39]	34
Figura 11. Diagrama Isotermal Sb-Sn-Cu a 250 °C. Fonte: [23]	34
Figura 12. Seção de linha de eixo do navio Almirante Maximiano. Fonte: autor.	37
Figura 13. Fornos elétricos para fundição (a) e Maçarico de panela a óleo (b). Fonte: autor.	38
Figura 14. Equipamento para centrifugação horizontal. Fonte: [41]	39
Figura 15. Esquemático de equipamento de centrifugação horizontal. Fonte: [31] ...	40
Figura 16. Fluxograma para obtenção dos corpos de prova do material novo. Fonte: autor.	42
Figura 17. Fluxograma para obtenção dos corpos de prova do material reaproveitado. Fonte: autor.	43
Figura 18. Modelo padrão (a) e Modelo de madeira (b). Fonte: autor.	44
Figura 19. Atividade de moldação (a) e Molde aberto (b). Fonte: autor.	44
Figura 20. Molde fechado (a) e (b). Fonte: autor.	45
Figura 21. Lingotes do metal patente novo. Fonte: autor.	46
Figura 22. Fornos elétricos para fundição (a) e Detalhe dos fornos (b). Fonte: autor.	46
Figura 23. Fundindo metal patente (a) e Vertendo o metal líquido no molde (b). Fonte: autor.	47
Figura 24. Abertura do molde (a) e Molde aberto (b). Fonte: autor.	47
Figura 25. Corpo de prova bruto desmoldado (a) e Corpo de prova finalizado (b). Fonte: autor.	48
Figura 26. Corpo de prova sendo ensaiado. Fonte: autor.	49
Figura 27. Curva de engenharia do ensaio de tração tensão x deformação do metal patente novo. Fonte: autor.	52
Figura 28. Defeitos no corpo de prova. Fonte: autor.	53
Figura 29. Curva de engenharia do ensaio de tração tensão x deformação do metal patente reaproveitado. Fonte: autor.	54
Figura 30. Microestrutura do material novo realizado por MO com aumento de 100X. Fonte: autor.	55
Figura 31. Microestrutura do material recuperado realizado por MO com aumento de 100X. Fonte: autor.	56
Figura 32. Microestrutura do material novo realizado por MEV com aumento de 200X. Fonte: autor.	57

Figura 33. Microestrutura do material novo realizado por MEV com aumento de 1000X. Fonte: autor.....	58
Figura 34. Microestrutura do material recuperado realizado por MEV com aumento de 1000X. Fonte: autor.....	58
Figura 35. Fases de composição da liga observadas no material novo. Fonte: autor.	59
Figura 36. Metal patente - Liga 2, (89,2% Sn, 7,2% Sb, 3% Cu e 0,4% Pb) 500X. Fonte: [11]	60
Figura 37. Metal patente recuperado ampliado 400X. Fonte: autor.	60
Figura 38. Metal patente liga 5, (60,3% Sn, 20,2% Sb, 2,6% Cu e 16,6% Pb). Fonte: [11]	61
Figura 39. Metal patente novo (88,45% Sn, 7,96% Sb, 3,32% Cu e 0,241% Pb). Fonte: autor.	61
Figura 40. Microestrutura do material recuperado realizado por MEV com aumento de 250X. Fonte: autor.....	62
Figura 41. Presença de poros em ligas de metal patente. Fonte: [11]	62
Figura 42. Mancais limpos prontos para enchimento. Fonte: autor.....	65
Figura 43. Recipiente de depósito do metal patente para descarte. Fonte: autor.	66
Figura 44. Forno com orifício abaixo da borda. Fonte: [45].....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição química das ligas de metal patente ASTM B-23. Fonte: [7]..	22
Tabela 2. Composição química SAE J460e adaptada de [8]	24
Tabela 3. Composição química QQ-T-390 adaptada de [9]	24
Tabela 4. Propriedades físicas dos mancais adaptada de [10]	25
Tabela 5. Composição química do metal patente novo e reaproveitado. Fonte: autor.	63
Tabela 6. Valores em R\$ dos principais ensaios metalográficos (Base 03/2019). Fonte: autor.	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

AMRJ	Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro
MO	Microscopia Óptica
UniFOA	Fundação Oswaldo Aranha
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Sb	Antimônio
Sn	Estanho
Cu	Cobre
Pb	Chumbo
MPa	Mega Pascal
mm	Milímetro
µm	Micrometro
°C	Graus Celsius
kgf	Quilograma força
kgf/cm ²	Quilograma força por centímetro quadrado
kV	Quilo Volt
Ltda	Limitada

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1 - Certificado de qualidade do material novo.....	75
Anexo 2 - Certificado de qualidade do pó estanhante utilizado na confecção dos mancais.....	76
Anexo 3 - Carta do AMRJ de apresentação de demanda acadêmica.....	77

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVO	17
3. JUSTIFICATIVA	18
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
4.1. COMPOSIÇÃO DAS PRINCIPAIS LIGAS DE METAL PATENTE	22
4.2. CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DO METAL PATENTE	24
4.3. MANCAIS DE DESLIZAMENTO X MANCAIS DE ROLAMENTO.....	27
4.4. MANCAIS DE ESCORA.....	28
4.5. TRIBOLOGIA	29
4.5.1. Atrito	29
4.5.2. Falhas tribológicas em mancais.....	30
4.5.3. Lubrificação de Mancais	31
4.6. CORROSÃO E EROÇÃO EM MANCAIS DE DESLIZAMENTO	32
4.7. DIAGRAMA TERNÁRIO.....	33
4.7.1. Estanho	35
4.7.2. Antimônio.....	35
4.7.3. Cobre.....	36
4.8. UTILIZAÇÃO DO METAL PATENTE NO AMRJ	36
4.9. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE UM MANCAL	37
4.9.1. Processo utilizado pelo AMRJ	38
4.10. FUNDIÇÃO CENTRÍFUGA.....	38
5. MATERIAIS E MÉTODOS	41
5.1. MATERIAIS.....	41
5.2. MÉTODOS.....	41
5.2.1. Preparação das amostras.....	43
5.2.1.1. Modelo.....	43
5.2.1.2. Molde.....	44
5.2.1.3. Fundição das amostras	45
5.2.1.4. Processos de fundição dos mancais e dos corpos de prova.....	47
5.2.1.5. Usinagem dos corpos de prova.....	48
5.2.2. Ensaios.....	49

5.2.2.1.	Ensaio de tração	49
5.2.2.2.	Preparação metalográfica	50
5.2.2.3.	Microscopia óptica.....	50
5.2.2.4.	Microscopia eletrônica de varredura	50
5.2.2.5.	Análise química	51
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
6.1.	ENSAIO DE TRAÇÃO.....	52
6.2.	MICROSCOPIA ÓPTICA	55
6.3.	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....	56
6.4.	ANÁLISE QUÍMICA.....	63
6.5.	VIABILIDADE TÉCNICA	64
6.5.1.	Limpeza das peças retiradas de bordo.....	64
6.5.2.	Pré-seleção do material.....	65
6.5.3.	Armazenagem	65
6.5.4.	Recipiente de fundição	66
6.5.5.	Implantação das soluções	67
6.6.	VIABILIDADE ECONÔMICA	67
7.	CONCLUSÕES	69
8.	TRABALHOS FUTUROS	70
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	71

1. INTRODUÇÃO

Para que um navio se movimente e singre os mares com segurança é necessário que seu sistema de propulsão esteja com todos os seus componentes funcionando perfeitamente.

Dentre estes componentes podemos citar, principalmente, o motor, a redutora, o hélice e as linhas de eixo, que são eixos de grande comprimento, sustentados por mancais de deslizamento, que por sua vez são lubrificados por bombas de óleo que também utilizam estes mancais.

Estes mancais são constituídos de uma liga metálica conhecida por metal patente e são muito utilizados na área naval, pois tem propriedades mecânicas ideais para lubrificação em alta carga, possibilidade de montagem por sistema bipartido que facilita muito a manutenção do sistema a bordo de navios, facilidade de fundição devido seu baixo ponto de fusão e principalmente pelo baixo custo em relação a outros processos e materiais [1].

Em decorrência de problemas na operação e/ou manutenção alguns destes mancais perdem suas características físicas, sendo necessário realizar a sua substituição [2], porém sempre que há necessidade de realizar o reenchimento de um mancal, o metal patente existente é descartado com a alegação de que o mesmo está muito contaminado com óleo e outras impurezas adquiridas durante seu uso a bordo.

Para testar a possibilidade de reaproveitamento, será realizada a análise comparativa das propriedades de um material novo com um material reaproveitado.

Segundo Almeida [2] a reciclagem do metal patente pode ser efetuada com algumas restrições, onde a liga envelhecida não é aconselhada, devido à existência de impurezas que podem influenciar as principais características do revestimento, levar à deturpação do grau da liga, diminuir a capacidade de adesão e promover com maior facilidade a falha do equipamento.

Essas impurezas são citadas no AMRJ – Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro como contaminação do material, motivo pelo qual o metal patente descartado por eles não é reutilizado na fabricação de novos mancais.

Para execução deste trabalho foram utilizadas as instalações do AMRJ no que diz respeito à fundição e preparação das amostras, os Laboratórios do Centro Universitário de Volta Redonda – UniFOA para realização dos ensaios de tração, MEV e MO e os laboratórios da empresa DMCJ para a análise química.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho foi investigar a possibilidade de reaproveitamento do metal patente retirado de um mancal usado comparando-o com o material novo em relação às propriedades físicas, metalúrgicas e químicas, para descobrir se as impurezas mencionadas podem ou não ser facilmente eliminadas e se a deturpação do grau da liga, se existente, pode ser corrigida. Criando assim um procedimento técnico que auxilie na execução deste processo no Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro - AMRJ.

3. JUSTIFICATIVA

O presente trabalho é justificado pela economia financeira obtida pela possibilidade de utilização de um procedimento técnico criado para reaproveitamento do metal patente, o que contribuirá para a redução de custo com aquisição de material novo, além dos ganhos para o meio ambiente, pois é evitado o descarte do metal em local desconhecido e da não necessidade de realizar a extração do novo material do meio ambiente para substituir o material descartado.

A implantação deste procedimento trará, além da economia e da preservação ambiental, avanço tecnológico para o Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro (AMRJ), complexo naval pertencente à Marinha do Brasil, que realiza manutenção e construção de navios de guerra e utiliza grande quantidade deste material em suas manutenções e passará a realizar ensaios deste material e acompanhar seus resultados, buscando sempre a melhoria contínua do processo.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Dentre os componentes do sistema de propulsão de navios existem os mancais de deslizamentos, que suportam radialmente os eixos de propulsão, proporcionando baixa resistência ao movimento destes eixos. Esses mancais são construídos geralmente em ferro fundido e revestidos por metal patente [5].

Os mancais podem ser definidos como elementos de máquinas dispostos entre um eixo e o suporte que o contém, possibilitando assim apoio aos componentes com reduzido atrito, e quando lubrificado substitui o atrito seco pelo viscoso, garantindo maior vida útil, operação de maior confiabilidade e menor dissipação de energia do sistema em operação [3].

Eles têm vital importância em estruturas complexas, quando existem corpos girantes. Tendo influência significativa sobre as frequências naturais, os modos e a magnitude da vibração, podendo inclusive ser fonte de excitação para o sistema quando procedente de um projeto com falhas de balanceamento dinâmico [3].

Os mancais utilizados em navios geralmente são compostos por uma liga, denominada de metal patente, composta de estanho, antimônio e cobre, em alguns casos também pode ser à base de chumbo. Este material também é conhecido por metal branco ou ainda metal Babbitt devido ao seu criador Isaac Babbitt, que nasceu em 26 de julho de 1799 em Taunton, Massachusetts e criou esta liga metálica em 1839 [2].

A exata composição do metal Babbitt original não é totalmente conhecida, porém ela era provavelmente composta por 89,3% de estanho, 7,1% de antimônio e 3,6% de cobre, [1]. Esta fórmula ainda é comercializada hoje em dia por alguns fabricantes como Metal Babbitt ASTM B-23 Grau 2 ou como "Babbitt Genuíno" [1].

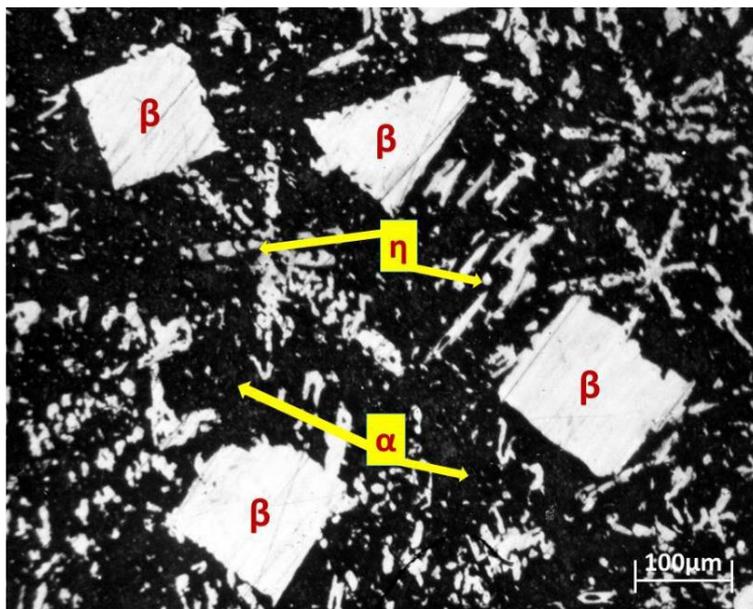


Figura 1. Fases do Metal Patente. Fonte: [4]

Sadykov [4] define o Metal Patente como uma liga multifásica, figura 1, que consiste nas fases α (solução sólida de Sn, Cu e Sb), fase β (composto Sn-Sb) e fase η (composto Cu_6Sn_5).

Nestas ligas, uma estrutura de cristais duros e resistentes ao desgaste provenientes do cobre é combinada com uma matriz mole advinda do estanho, que permite a circulação do óleo lubrificante entre os cristais durante o funcionamento, além de absorver impactos e facilitar a aderência ao metal da base do mancal, geralmente ferro fundido [5]. As figuras 2 e 3 mostram a estrutura mencionada em detalhes ampliados.

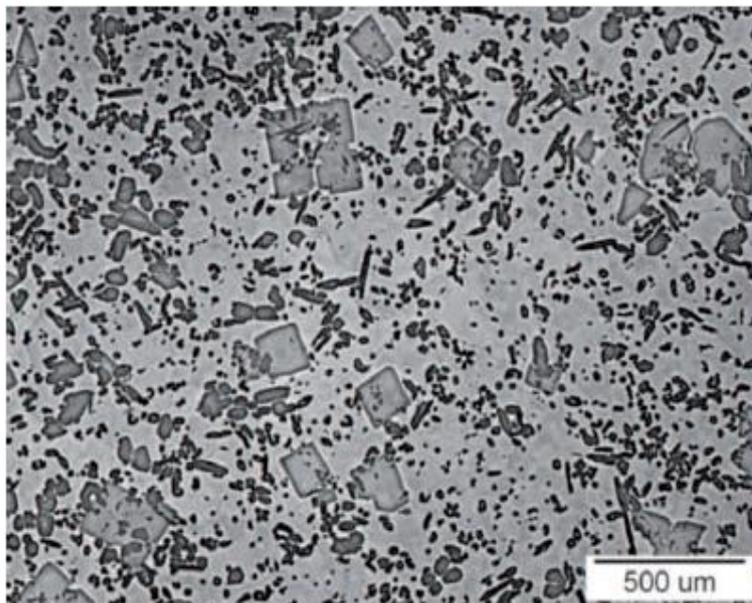


Figura 2. Microestrutura do metal patente com aumento de 100X. Fonte: [6]

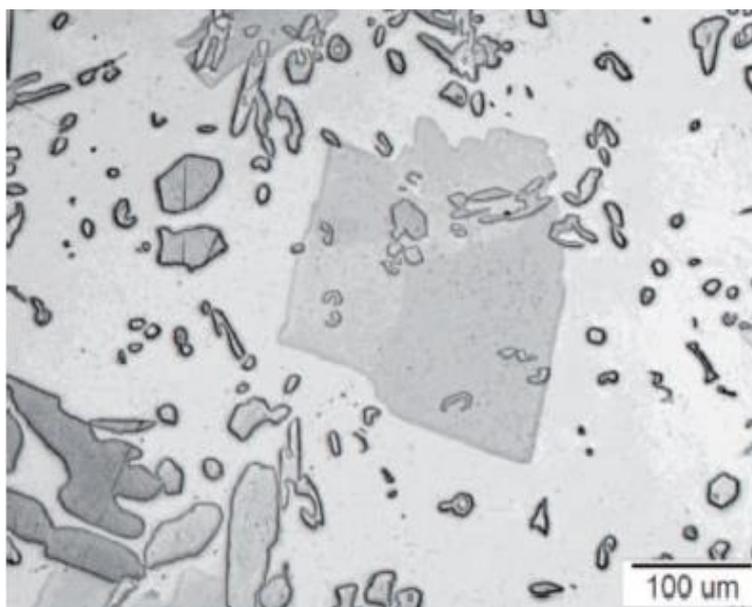


Figura 3. Microestrutura do metal patente com aumento de 200X. Fonte: [6]

Existem algumas normas que norteiam o assunto, dentre elas pode-se destacar a ASTM B – 23 (American Society of Testing Materials) [7] que é mencionada neste trabalho, pois o material adquirido pelo Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro segue esta norma. Mas, apesar do AMRJ seguir esta norma a mesma não será utilizada como único parâmetro para este trabalho, pois há muitos relatos de que o material, que é recebido diretamente dos fornecedores, não atende aos padrões da norma.

Serão utilizadas então amostras do material novo conforme recebido, tendo assim um resultado mais aproximado da realidade encontrada em campo.

AASTM B-23 pode ser dividida em dois grupos de quatro ligas cada, de acordo com o metal de base que as formam, que são à base de estanho e à base de chumbo, onde as porcentagens definem seu comportamento mecânico [7].

4.1. COMPOSIÇÃO DAS PRINCIPAIS LIGAS DE METAL PATENTE

As ligas à base de estanho, ou seja, ligas 1, 2, 3 e 11, são resistentes a impacto sendo indicadas para mancais de alta rotação e alta carga, têm cerca de 80 a 90% deste elemento, que na verdade é determinado pela diferença entre os outros elementos e o total, conforme a tabela 1. Também recebe cerca de 4 a 8,5% de Antimônio, valor este que está próximo ao seu limite de solubilidade e possui de 4 a 8,5% de cobre e pequeno percentual de chumbo, por volta de 0,5%, além de outros elementos em menor quantidade [7].

Tabela 1. Composição química das ligas de metal patente ASTM B-23. Fonte: [7]

Elemento	Número da Liga							
	Base de Estanho				Base de Chumbo			
	1	2	3	11	7	8	13	15
Estanho	restante	restante	restante	restante	9,3 – 10,7	4,5 – 5,5	5,5 – 6,5	0,8 – 1,2
Antimônio	4,0 – 5,0	7,0 – 8,0	7,5 – 8,5	6,0 – 7,5	14,0 – 16,0	14,0 – 16,0	9,5 – 10,5	14,5 – 17,5
Chumbo	0,35	0,35	0,35	0,50	restante	restante	restante	restante
Cobre	4,0 – 5,0	3,0 – 4,0	7,5 – 8,5	5,0 – 6,5	0,50	0,50	0,50	0,60

No entanto Almeida [2] relata que a escassez do estanho devido à Segunda Guerra Mundial forçou a utilização das ligas à base de chumbo, e o seu desempenho foi surpreendente, pois superou em algumas situações a utilização do estanho.

Segundo a ASTM B23 [7], essas ligas à base de chumbo, ligas 7, 8, 13 e 15, possuem boa resistência ao desgaste, porém com baixa dureza, sendo por isto utilizadas em situações menos exigentes. Para reduzir esta deficiência é acrescentado de 9,5 a 17,5% de antimônio, 4,5 a 10,7% de estanho e aproximadamente 0,5% de cobre aumentando a sua dureza. Recebe também a adição de outros elementos em

menores quantidades e é completada por cerca de 70 a 85% de chumbo, seu elemento principal. O que chama a atenção para esta liga é seu baixo custo.

A figura 4 mostra em um diagrama de fases ternário onde estão as regiões mais utilizadas em termos de proporção de elementos para a utilização em cada tipo de tarefa que o metal patente pode realizar em um mancal de deslizamento. Ou seja, quais as melhores porcentagens de cada elemento para a utilização de uma liga com melhor coeficiente de atrito, qual a porcentagem para trabalhos médios e qual a porcentagem para trabalhos pesados, além da necessidade da adição de cobre neste último caso.

Nota-se que na base do diagrama mais à esquerda estão as ligas antifricção à base de Pb; na região inferior central do diagrama está a região intermediária onde ficam os metais patentes para os trabalhos e tarefas médias; e mais à direita estão as ligas com adição de Cu, indicadas para alta tarefa e trabalhos pesados.

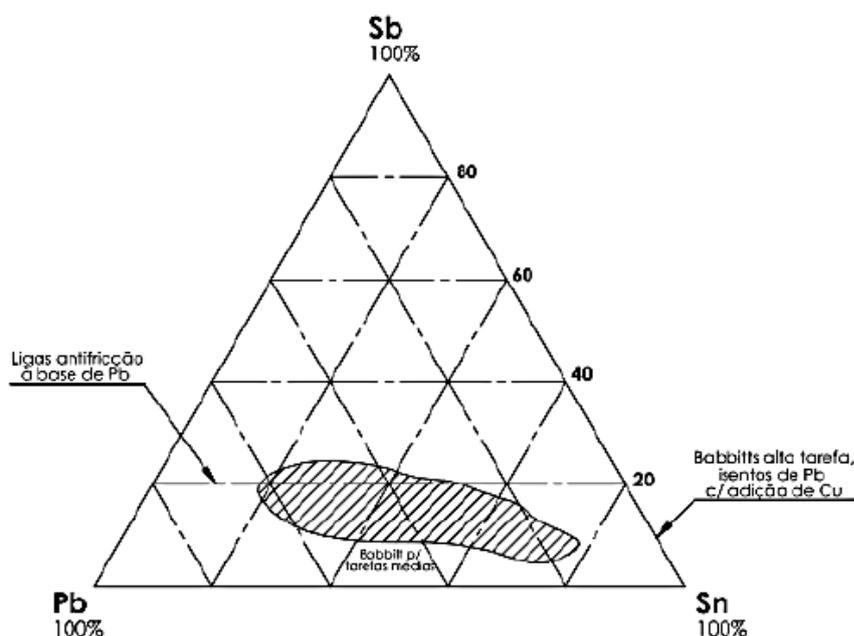


Figura 4. Diagrama ternário de fases Sb-Pb-Sn. Fonte: [3]

Existem também outras normas, como por exemplo, a SAE J460 (Society of Automotive Engineers) [8] e a QQ-T-390A (U.S. Government Specifications) [9] que não serão tratadas neste trabalho, pois não são utilizadas no AMRJ e mudam apenas alguns poucos percentuais de cada componente das ligas, não acrescentando nada

substancial ao trabalho em questão. Mas como e. g. segue na tabela 2 a composição química do metal patente pela SAE J460e e na tabela 3 a composição química adotada pela QQ-T-390 ambas as tabelas foram extraídas das respectivas normas com as principais proporções destas ligas.

Tabela 2. Composição química SAE J460e adaptada de [8]

Composição Química											
	SAE nº	estanho	antimônio	chumbo	cobre	ferro	arsênico	bismuto	Zinco	alumínio	outros
Base estanho	11	86,0	6,0-7,5	0,50	5,0-6,5	0,08	0,10	0,08	0,005	0,005	0,20
	12	88,0	7,0-8,0	0,50	3,0-4,0	0,08	0,10	0,08	0,005	0,005	0,20
		chumbo	estanho	antimônio	cobre	arsênico	bismuto	zinco	alumínio	cádmio	outros
Base chumbo	13	restante	5,0-7,0	9,0-11,0	0,50	0,25	0,10	0,005	0,005	0,005	0,20
	14	restante	9,2-10,7	14,0-16,0	0,50	0,6	0,10	0,005	0,005	0,005	0,20
	15	restante	0,9-1,3	14,0-15,5	0,50	0,8-1,2	0,10	0,005	0,005	0,02	0,20
	16	restante	3,5-4,7	3,0-4,0	0,10	0,05	0,10	0,005	0,005	0,005	0,40

Tabela 3. Composição química QQ-T-390 adaptada de [9]

Composição Química										
Grau	estanho	antimônio	Chumbo	cobre	ferro	arsênico	zinco	alumínio	bismuto	outros
1	90,0-92,0	4,0-5,0	0,35	4,0-5,0	0,08	0,10	0,005	0,005	0,08	0,10
2	88,0-90,0	7,0-8,0	0,35	3,0-4,0	0,08	0,10	0,005	0,005	0,08	0,10
3	83,0-85,0	7,5-8,5	0,35	7,5-8,5	0,08	0,10	0,005	0,005	0,08	0,10
4	80,5-82,5	12,0-14,0	0,25	5,0-6,0	0,08	0,10	0,005	0,005	--	0,10
5	61,0-63,0	9,5-10,5	24,0-26,0	2,5-3,5	0,08	0,15	0,005	0,005	--	0,30
6	4,5-5,5	14,0-16,0	79,0-81,0	0,50	0,10	0,20	0,005	0,005	--	0,50
7	9,3-10,7	14,0-16,0	74,0-76,0	0,50	0,10	0,60	0,005	0,005	--	0,50
10	0,75-1,25	14,5-17,5	78,0-83,0	0,60	0,10	0,8-1,4	0,005	0,005	--	0,50
11	9,0-11,0	11,5-13,5	74,0-79,0	0,4-0,6	0,10	0,20	0,005	0,005	--	0,50
13	4,0-6,0	8,0-10,0	83,0-88,0	0,50	0,10	0,20	0,005	0,005	--	0,75

4.2. CARACTERÍSTICAS DE APLICAÇÃO DO METAL PATENTE

O metal patente apresenta algumas características positivas de suas

aplicações, mas como todo material quando se obtêm o aumento de alguma característica de um lado, por outro, alguma característica é perdida. Para comparar um mancal de metal patente com um mancal à base de ligas de cobre a tabela 4 foi extraída simplificada de Neale [10].

Tabela 4. Propriedades físicas dos mancais adaptada de [10]

Propriedades Físicas	Significância da Propriedade no Serviço	Metal Patente	Ligas de Cobre
Fadiga	Sustentar cargas dinâmicas impostas à temperatura de operação	Adequado para muitas aplicações, mas falha rapidamente com o aumento da temperatura.	Ampla gama de resistência de acordo com a composição
Tensão de Compressão	Suportar carga unidirecional	Como acima	Como acima
Penetrabilidade	Tolerar e incorporar materiais estranhos na lubrificação	Excelente – inigualável por qualquer outro material	Inferior ao Metal Patente
Conformabilidade	Tolerar algum desalinhamento	Como acima	Como acima
Compatibilidade	Tolerar contato metal-metal sem arraste.	Como acima	Como acima
Resistência à corrosão	Resistir a ataques por ácidos ou água	Base estanho é excelente na ausência de água do mar. Base Chumbo é atacado por produtos ácidos	Se constituído por chumbo é suscetível à ataques.

Uma das principais vantagens do metal patente é com relação ao seu baixo ponto de fusão, mostrado na figura 5, que facilita em muito o manuseio e diminui o custo de fundição, por conta disto uma desvantagem considerável ocorre quando em

funcionamento há algum aquecimento da linha de eixo devido, por exemplo, a desalinhamento ou falha de lubrificação. Neste caso rapidamente há a deformação permanente da camada de metal patente do mancal, sendo necessário sua substituição [10].

Nomenclatura	Base de Estanho		
ASTM B23	-	2	3
SAE	11	12	-
Composição (%)			
Estanho	87	89	84
Chumbo	-	-	-
Antimônio	7	7,5	8
Cobre	6	3,5	8
Arcênio	-	-	-
Densidade	7,4	7,39	7,45
Ponto de Fusão (°C)	240	241	240
Liquefação completa (°C)	400	354	422
Dureza Brinell	26	24	27
Tensão de Ruptura (Mpa)	90	77	0
Tensão de Compressão (Mpa)	45	42	0
Tensão aproximada a			
100°C	49	52	52
150°C	23	24	24
200°C	5	7	7

Figura 5. Propriedades físicas de ligas de metal patente. Fonte: [11]

Note que Neale [10] cita a necessidade de substituição do metal patente, porém ele não especifica se esta substituição deve ser por material novo ou reaproveitado. O mesmo ocorre em muitas literaturas deixando em aberto este questionamento que será respondido por este trabalho.

Outro questionamento muito levantado é a questão de o porquê escolher o metal patente em detrimento a outras ligas mais modernas. Porém, o que Neale [10] mostra, corrobora com o que Almeida [2] discorre a seguir, evidenciando que a efetividade de um material pode ser facilmente alcançada dentro da sua simplicidade.

O baixo coeficiente de atrito, o baixo custo, a boa capacidade de manuseio e a facilidade de circulação do lubrificante entre as partículas intermetálicas, faz com que

a maioria dos técnicos opte por este tipo de revestimento [2].

Devido à propriedade de compressão o metal patente é inadequado para a maioria dos motores à combustão interna do tipo Otto e está apto apenas para operação em baixas velocidades em motores navais a diesel. Para melhorar a resistência, normalmente é adicionado 1% de cádmio ao metal, uma liga comum para aplicações de motores navais a diesel [12].

Zeren [12] fala sobre adicionar cádmio apenas para aplicações específicas, como para motores navais a Diesel e não para os mancais de deslizamento que não sofrem os mesmos esforços dos mancais de um motor a combustão.

Pode-se pensar também em realizar tratamentos térmicos para eliminar essas limitações, não se deixando de observar todas as variáveis envolvidas no processo, como citado no ASM Metals Handbook [13], para os tratamentos térmicos recomenda-se utilizar taxas altas de resfriamento, de modo a refinar os grãos, pela cinética de cristalização da liga. Quanto mais elevada a taxa de resfriamento, a formação de cristais de SnSb diminui, podendo provocar a formação de dendritas no lugar de cubos, o que melhora a tenacidade da liga sem alterar a sua resistência.

As ligas de metal patente são geralmente produzidas por fusão e não podem sofrer endurecimento por meio de deformação a frio, devido à baixa temperatura de recristalização. Se o total de deformação a frio for maior que 20%, a recristalização ocorre à temperatura ambiente. Por isso a dispersão de partículas em uma segunda fase, por fusão, é mais efetiva para tornar o metal patente mais duro e resistente [14].

4.3. MANCAIS DE DESLIZAMENTO X MANCAIS DE ROLAMENTO

Os mancais de deslizamento diferem dos mancais de rolamento pelo simples fato do eixo deslizar na superfície de apoio entre a bucha e o eixo. Diferentemente do mancal de rolamento, onde as esferas, rolos ou roletes rolam sobre a superfície de contato entre eixo e mancal.

Alguns mancais de deslizamento apresentam coeficiente de atrito menor que os mancais de rolamento. O baixo coeficiente de atrito do metal patente permite, mesmo sem lubrificação, um coeficiente de atrito reduzido. No entanto, quando

adicionada uma lubrificação pode atingir coeficientes de atrito surpreendentemente baixos [2].

A figura 6 mostra basicamente como é um mancal de deslizamento (a) e um mancal de rolamento (b). Aparentemente os mancais são iguais, porém internamente eles são diferentes, pois no primeiro é montado uma bucha, neste caso de metal patente, e no segundo é montado um rolamento, que pode ser de esferas, roletes ou agulhas.

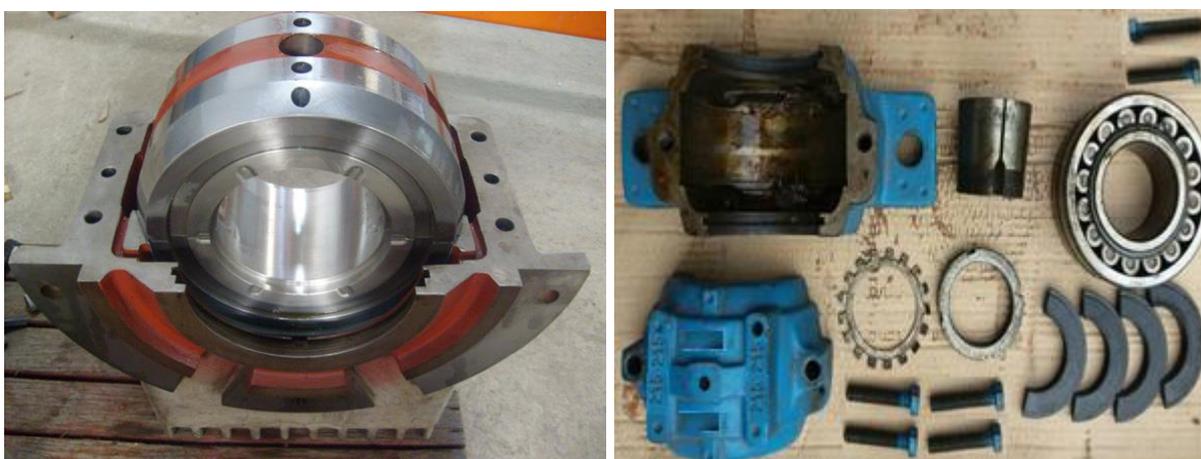


Figura 6. Mancal de deslizamento (a) e Mancal de rolamento (b). Fonte: [43]

4.4. MANCAIS DE ESCORA

Os mancais de escora, também chamados de mancais de encosto ou ainda mancais de empuxo, são destinados a absorver cargas axiais [15] e consistem de sapatas deslizando apoiadas sobre uma superfície lisa. Esses mancais podem ser divididos em três classes: fixo, pivô ou molas, caracterizados de acordo com a fixação das sapatas na base. A figura 7 mostra a aplicação do mancal de escora do tipo pivô, muito utilizado nos propulsores dos navios da Marinha do Brasil.

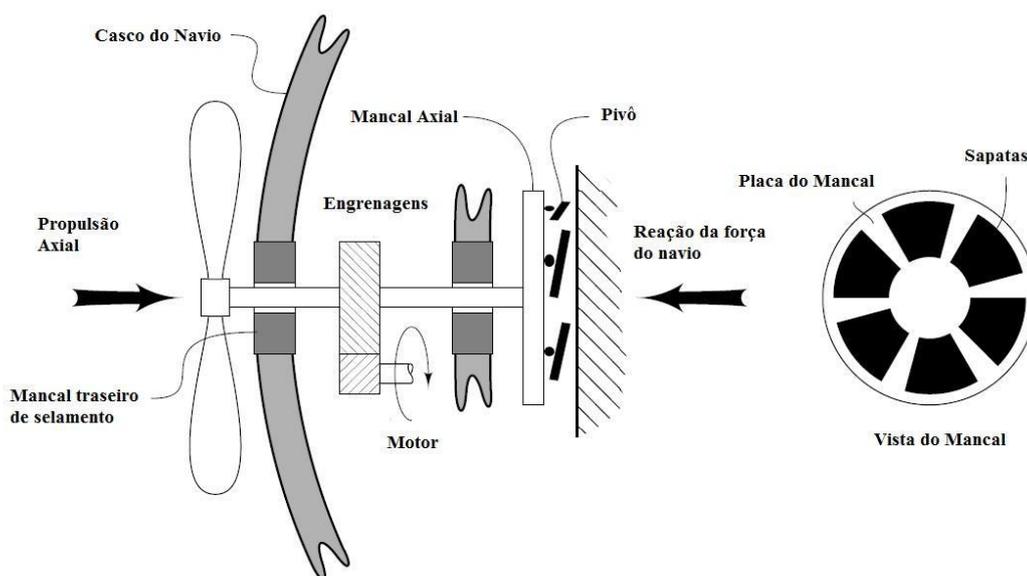


Figura 7. Mancais de escora. Fonte: [16]

Os mancais de escora do tipo pivô suportam um leve desalinhamento entre a superfície de apoio e a sua própria face de contato, o que contribui para que os mancais não se desgastem por falta de alinhamento.

4.5. TRIBOLOGIA

Tribologia é uma ciência e tecnologia de interação entre superfícies em movimento. Compreendendo o estudo de atrito, desgaste, erosão e lubrificação [17]. A tribologia é decisiva no desempenho de máquinas e dispositivos submetidos a trabalho mecânico. Ela é capaz de estimar o tempo de vida de máquinas ou componentes a fim de evitar falhas mecânicas geradas pelo atrito e pelo desgaste, que podem ser desde uma simples falha ou chegar a ser uma falha catastrófica [18].

4.5.1. Atrito

O metal patente é um metal antifricção, ou seja, seu coeficiente de atrito é relativamente baixo, o que faz com que o mesmo seja bastante solicitado para trabalhos onde se exija baixo atrito, como por exemplo, em mancais de deslizamento.

Segundo Chiaverini [17] o atrito é um processo de dissipação de calor e transferência de massa termodinamicamente irreversível, pode ser definido como a

força resistiva que um corpo encontra ao se mover sobre outro. Existe uma série de mecanismos de desgaste como, por exemplo: o adesivo, o abrasivo, por fadiga, por fusão, por erosão, por cavitação, o corrosivo, o oxidativo, entre outros [16].

A primeira lei do atrito, atribuída a Guillaume Amontons, estabelece que a Força Tangencial para iniciar um movimento (atrito estático) ou manter o movimento entre dois corpos (atrito dinâmico) é diretamente proporcional à Força Normal que pressiona as superfícies em contato [18].

O fator desta proporcionalidade " μ ", conhecido como coeficiente de atrito é definido para cada uma das duas superfícies em contato e para cada condição de lubrificação.

Tal valor representa o coeficiente de atrito entre as superfícies em contato. O atrito é considerado estático quando a força tangencial aplicada deve iniciar o movimento, e pode ser maior que o atrito dinâmico, medido quando a força mantém o movimento entre os corpos [18].

A segunda lei estabelece que a força tangencial de atrito não depende do tamanho da área de contato. Ou seja, a força para deslizar um paralelogramo será a mesma para qualquer de suas faces, desde que tenham o mesmo acabamento superficial. Já a terceira lei estabelece que o atrito não depende da velocidade de deslizamento. Porém, isso implica que a força aplicada para iniciar o movimento será a mesma necessária para mantê-lo [18].

4.5.2. Falhas tribológicas em mancais

Os danos em mancais de deslizamento são causados em sua maior parte pelo aumento da folga em virtude do diferencial de expansão térmica do mancal e da base do mancal, pelo crescimento da folga causada pelo acúmulo de partículas oriundas de desgaste, pelo início de atrito entre metal-metal e pela variação da geometria da superfície e das propriedades do material por conta da atividade triboquímica. Enquanto os motivos de danos causados pelo mau contato podem ser a falha de lubrificação, soldas locais com altas temperaturas e/ou deformação e cisalhamento [19].

Zeren [11] explica que os mancais de metal patente têm boa conformabilidade, ou seja, a propriedade de ajustar-se a pequenos desalinhamentos ou deflexões do eixo durante operação. Eles também são excelentes rolamentos do ponto de vista da incorporação de corpos estranhos, porque uma quantidade razoável de sujeira ou matéria estranha no lubrificante pode ser absorvida pelo material macio do mancal não afetando o eixo.

Porém mesmo com essas propriedades os mancais podem sofrer danos, pois há um limite no qual o material pode operar nestas situações.

A figura 8 mostra três tipos de desgastes possíveis em um mancal de deslizamento. Todos eles extremamente danosos às superfícies do mancal.



Figura 8. Tipos de desgastes, adaptado de [3]

4.5.3. Lubrificação de Mancais

Caso haja falha na lubrificação alguns materiais envolvidos são capazes de minimizar o desgaste. Algumas ligas que contêm chumbo sobressaem particularmente pelo baixo coeficiente de atrito, o chumbo-bronze e o chumbo-cobre

apresentam dispersantes metálicos de chumbo, com baixa solubilidade na matriz. No deslizamento, um filme fino e fraco de chumbo é formado na superfície e resulta em um baixo valor do coeficiente de atrito no mecanismo de abrasão [20].

Devido ao baixo coeficiente de dilatação do metal patente, mesmo sem manter a lubrificação necessária, este material exerce muito bem sua função de metal antifricção.

4.6. CORROSÃO E EROSÃO EM MANCAIS DE DESLIZAMENTO

Segundo Zeren [11] a resistência à corrosão e a resistência à erosão por cavitação são outras duas propriedades importantes das ligas de metal patente. A resistência à erosão por cavitação em rolamentos desses tipos é diretamente relacionada à dureza da liga, mas a microestrutura também é importante. O metal patente à base de estanho tem uma resistência à erosão por cavitação muito maior do que o metal patente à base de chumbo com aproximadamente a mesma dureza, provavelmente devido às agulhas de cobre na microestrutura.

A erosão causada pela cavitação acontece tanto nas regiões de pressão negativa quanto nas de pressão positiva da película de óleo. Quando o eixo inicia ou para a rotação, o que é reduzido quando se utiliza hélices de passo controlado, pois não há mudanças no sentido de rotação do eixo para inverter o sentido de deslocamento do navio; ou quando o rolamento é submetido a cargas de impacto e/ou vibrações violentas, danos na superfície podem se originar pela ação conjunta de erosão e de cavitação [21]. Na figura 9 pode-se observar a superfície de um mancal onde o nível de desgaste já o incapacitou para funcionamento.



Figura 9. Mancal apresentando alto índice de desgaste. Fonte: [40]

Klass [22] afirma que o potencial para o desgaste é muito ligado à interação com as características do sistema de operação, que incluem: a magnitude da carga do mancal; a natureza da carga (cíclica ou estável); a velocidade de deslizamento; o lubrificante ou as características do sistema de lubrificação; a limpeza do lubrificante ou do filtro; a temperatura de operação; o acabamento e material do eixo; o alinhamento e a rigidez.

4.7. DIAGRAMA TERNÁRIO

A formação do metal patente gira em torno de três materiais: estanho, antimônio e cobre, ou dependendo da aplicação: estanho, antimônio e chumbo. Neste trabalho será dado ênfase a liga Sn-Sb-Cu porque é a mais frequentemente utilizada nos navios da Marinha do Brasil através da liga 2 da ASTM B 23. Esses elementos juntos formam a liga ternária conhecida por metal patente, que está demonstrada nas figuras 10 e 11.

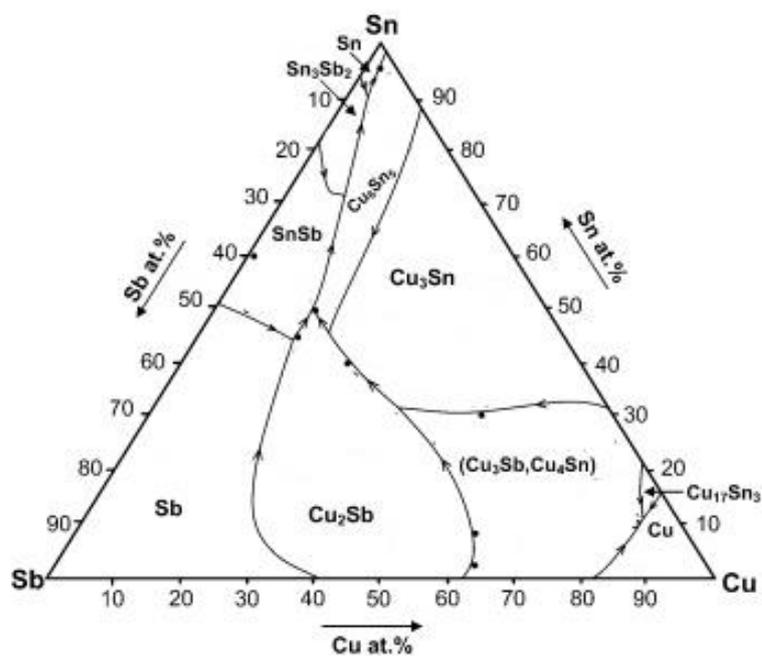


Figura 10. Diagrama de Fases Ternário Sn-Sb-Cu adaptado de [39]

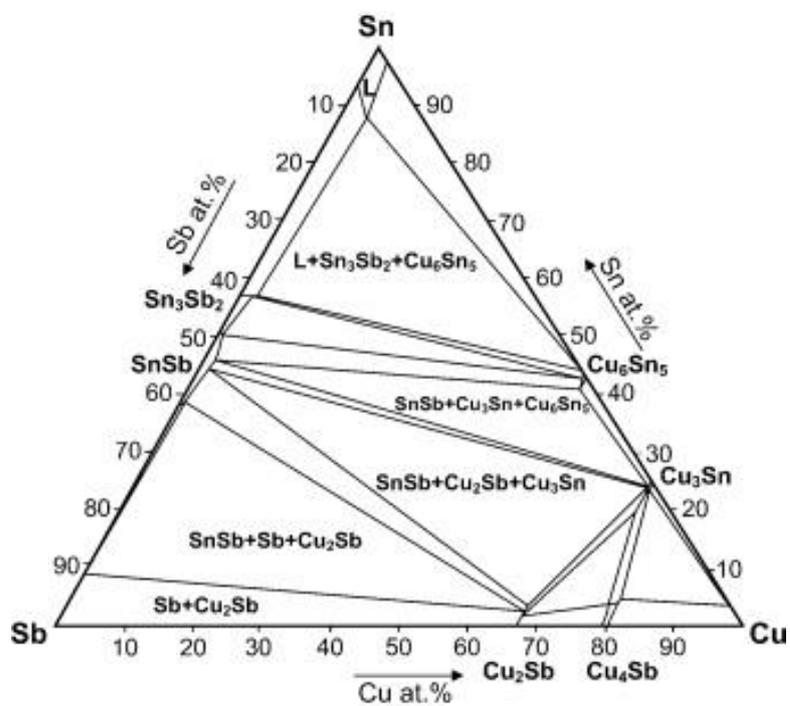


Figura 11. Diagrama Isotermal Sb-Sn-Cu a 250 °C. Fonte: [23]

4.7.1. Estanho

O estanho é um metal altamente dúctil, de aparência branco prateada. Seu ponto de fusão é 232° C e seu peso específico 7,3 g/cm³, possui baixa resistência mecânica e elevada resistência à corrosão. É empregado na forma de folhas, chapas e fios estanhados e como elemento básico de certas ligas, sendo utilizado, como por exemplo, em mancais e soldas, ou como elemento secundário de ligas importantes, como bronzes [17].

O estanho puro apresenta reticulado cristalino tetragonal de corpo centrado, resistência à tração de 11 MPa, alongamento de 57 % e módulo de elasticidade de 42,4 GPa.

As ligas de estanho mais comuns são o bronze, que se trata de uma liga entre estanho e cobre; a solda utilizada em eletrônicos, uma liga formada por estanho e chumbo; e o metal patente, uma liga ternária composta por estanho, chumbo e antimônio, muito utilizada em mancais onde o estanho age como lubrificante quando o aço passa entre superfícies.

A operação chamada de “estanhamento” realizada nos materiais de base dos mancais antes de receberem o metal patente, utiliza um “estanhante”, que nada mais é do que o Sn em pó ou em pasta e serve para metalizar superfícies que vão receber aplicação de outra liga a base de estanho.

Ligas a base de estanho são ligas com mais de 50% de Sn, endurecida com antimônio ou chumbo e cobre, são mais usuais dentre as ligas de metal patente devido às suas propriedades anti-fricção [24], alta resistência à compressão, ductilidade e tenacidade [25].

4.7.2. Antimônio

Analisando a tabela periódica pode-se notar que o antimônio é um elemento químico de símbolo Sb de número atômico 51 e de massa atômica 121,8 u, estrutura cristalina romboédrica, ponto de fusão em 631° C e módulo de elasticidade de 55 GPa.

É utilizado na metalurgia como elemento aditivo, uma vez que as suas propriedades físicas não são adequadas para aplicações em engenharia. A sua

aplicação mais importante é como constituinte das ligas estudadas neste trabalho para conferir dureza e rigidez, melhorando também a resistência à corrosão.

As ligas de metal patente podem conter até 7% de Antimônio em solução sólida, acima disto ocorre a precipitação do composto SnSb, tornando a liga quebradiça e frágil, porém aumentando o coeficiente de atrito [24].

4.7.3. Cobre

O cobre é um metal marrom avermelhado que quando exposto à ação do ar fica esverdeado. Apresenta ponto de fusão correspondente a 1.083° C e densidade correspondente a 8,96 g/cm³ à 20° C sendo um bom condutor de calor e eletricidade. O cobre apresenta ainda boa resistência à corrosão incluindo resistência em ambiente marinho e em outros ambientes corrosivos, resistência mecânica e resistência à fadiga satisfatória, além de boa usinabilidade e uma excelente deformabilidade [17].

Suas propriedades mecânicas variam dentro dos seguintes limites: alongamento de 6 a 48%; limites de escoamento de 5 a 35 kgf/mm²; limite de resistência à tração de 22 a 45 kgf/mm²; dureza Brinell de 45 a 105 e módulo de elasticidade de 12.000 a 13.500 kgf/mm². O cobre pode ser utilizado em detrimento ao antimônio como elemento de liga endurecedor, porém neste caso há a formação de um composto com o estanho, no formato de agulhas, duras e quebradiças. Estas agulhas são menos sujeitas à ruptura que os cristais cúbicos, porém o cobre aumenta a temperatura de fusão da liga e reduz a aderência entre o metal patente e a base [26].

4.8. UTILIZAÇÃO DO METAL PATENTE NO AMRJ

Fundado em 29 de dezembro de 1763 o Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro, chamado no início somente de Arsenal de Marinha iniciou suas atividades com a construção da nau São Sebastião, em janeiro de 1764, embarcação construída toda em madeira [27].

Por volta de 1840, são contratados engenheiros europeus que se encontravam trabalhando no Brasil, que assumem a chefia das oficinas do Arsenal e introduzem diversas melhorias no estaleiro, tais como: a construção da oficina de fundição de

ferro e bronze, a forjaria e a oficina mecânica [28]. Onde ocorre até hoje a fundição dos mancais de metal patente.

A Marinha do Brasil geralmente utiliza em seus navios mancais de deslizamento, que se caracterizam por uma base estrutural, geralmente de ferro fundido, sobre a qual é fixada a bucha bipartida, conhecida na marinha pelo jargão de “telha” que é de aço e revestida internamente por uma liga de metal patente. Estes mancais são revestidos com metal patente para realizar a interface entre eixo e mancal com o menor atrito possível, não deixando de ser resistente. Suportando a carga do eixo que muitas vezes é elevada, evitando em muito o desgaste causado pelo atrito.

Esses mancais servem como apoio para este eixo que leva o movimento rotacional, ou mais propriamente dito o torque, do motor de combustão até o hélice, passando pela caixa redutora. Este conjunto é chamado de linha de eixo (LE), sendo comum apresentarem várias seções, totalizando cerca de 20 metros de comprimento ou mais, dependendo do porte do navio. A seção da linha de eixo mostrada na figura 12 pertence ao Navio Polar Almirante Maximiano e possui cerca de 6 metros de comprimento com aproximadamente 300 milímetros de diâmetro.



Figura 12. Seção de linha de eixo do navio Almirante Maximiano. Fonte: autor.

4.9. PROCESSO DE RECUPERAÇÃO DE UM MANCAL

Simplificadamente o processo de recuperação do mancal é composto por abertura do mancal; derretimento do metal patente deformado; preenchimento do mancal com um novo metal; usinagem; montagem a bordo e ajuste.

4.9.1. Processo utilizado pelo AMRJ

O AMRJ possui um setor de metalurgia específico para serviços de fundição com diversos fornos de diversas capacidades, mas devido à facilidade de manuseio deste metal, que tem um baixo ponto de fusão, o mesmo é fundido internamente na Divisão de Oficinas Mecânicas do AMRJ para atendimento dos navios que fazem sua manutenção naquele arsenal. Atualmente o AMRJ utiliza o processo de fundição centrífuga, comumente utilizado por outras empresas para este tipo de serviço, contra o sistema de fundição por gravidade que antes era realizado ali.

No AMRJ existem duas possibilidades de derretimento do metal patente, uma delas é através dos fornos elétricos da figura 13 (a) e a outra é pelo maçarico de panela a óleo da figura 13 (b).



Figura 13. Fornos elétricos para fundição (a) e Maçarico de panela a óleo (b). Fonte: autor.

4.10. FUNDIÇÃO CENTRÍFUGA

O sistema de fundição por centrifugação é mais vantajoso em relação ao método por gravidade devido o mesmo preencher todos os possíveis vazios no material, pois o material exerce pressão no molde, pressão esta, conseguida pela força centrífuga.

O processo por fundição centrífuga é o mais utilizado na atualidade no que diz respeito à deposição de metal patente por proporcionar altos níveis de aderência, o que evita o descolamento do mancal; baixa porosidade; boas propriedades mecânicas

adequadas ao proposto do material e superior homogeneidade de solidificação [29].

Na fundição centrífuga as formas cilíndricas ou simétricas podem ser vazadas usando a força centrífuga num molde giratório. Neste processo de fundição o canal de vazamento está normalmente localizado junto ao centro de rotação da peça. A força centrífuga gerada pela rotação cria a pressão que preenche pequenas seções e mantém um bom contato entre o molde e o metal.

Neste processo os elevados fluxos de calor que se escoam proporcionam uma redução do tempo de solidificação, resultando em melhores propriedades mecânicas dos fundidos [30].

É possível fundir por centrifugação através de dois tipos de processos, ou seja, fundição por centrifugação horizontal ou fundição por centrifugação vertical. Neste trabalho será apresentado apenas o sistema de fundição horizontal, como na figura 14, pois o sistema vertical não é utilizado para obtenção de mancais no AMRJ.

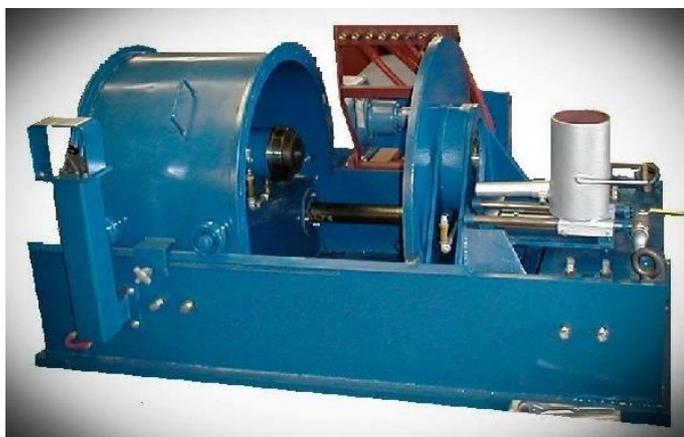


Figura 14. Equipamento para centrifugação horizontal. Fonte: [41]

O sistema de fundição centrífuga não é um sistema complexo, podendo ser facilmente entendido ao se observar a figura 15 onde “B” é a transmissão, “C” o mancal da transmissão, “D” a placa de fixação e alinhamento da peça, “E” o recipiente para o metal fundido, “F” o tubo de enchimento com fuso/cremalheira de deslocamento para distribuição uniforme do fundido e que “H” é o recipiente para coletar respingos e sobras que caem do molde.

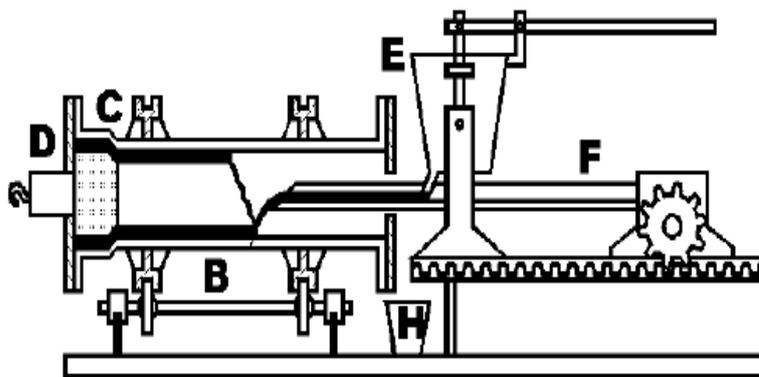


Figura 15. Esquemático de equipamento de centrifugação horizontal. Fonte: [31]

Também se nota que o molde é fixado entre mancais (C) e alinhado pela placa (D). O fundido é então vertido através do recipiente (E) para dentro do molde que gira por força da transmissão (B) e através da cremalheira (F) é possível distribuir uniformemente o fundido no interior deste molde. Com o movimento giratório algum metal é expelido para fora do molde e amparado pelo recipiente de coleta (H). Após algum tempo girando para solidificação do metal o equipamento é parado e a bucha pode ser retirada do molde.

Ao observar o esquema acima, percebeu-se que era possível fazer uma máquina de centrifugação aproveitando equipamentos obsoletos dentro da oficina do AMRJ. Para conseguir realizar a fundição por este processo foi realizada uma adaptação de baixo custo e alta eficácia pelos servidores públicos federais do AMRJ. A solução encontrada foi a adaptação de um torno universal que estava desativado por problemas no barramento e no fuso de abrir roscas.

Aproveitando assim o movimento de sua placa como uma centrífuga e seu porta-ferramentas como apoio móvel para um direcionador (funil) para o fundido alcançar o interior do molde e distribuir o material uniformemente enquanto a placa gira e cria a pressão necessária para uma melhor fundição.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir serão detalhados os materiais e os métodos utilizados para a preparação das amostras para cada ensaio.

5.1. MATERIAIS

Considerando que as amostras são sempre de dois tipos: metal patente novo ASTM B23 – liga número dois, como recebido do fornecedor. E metal patente reaproveitado de mancais utilizados a bordo dos navios da Marinha do Brasil, ASTM B23 – sem definição da liga, pois o material atualmente é fundido para descarte sem que seja realizada uma separação por tipo da liga.

Ambos materiais, ou seja, o novo e o reaproveitado foram fornecidos para a execução deste trabalho pelo AMRJ, conforme a carta de demanda acadêmica no anexo 3. A liga nova que foi utilizada neste trabalho foi fornecida ao AMRJ pela empresa Calinox Aços e Metais Ltda, conforme atestado de qualidade no anexo 1.

5.2. MÉTODOS

Serão apresentados a seguir os métodos utilizados para a execução deste trabalho, sendo a primeira parte a preparação dos corpos de prova e a segunda parte os ensaios para determinação das características de cada amostra.

Para preparação dos corpos de prova foi escolhido o processo utilizado pelo AMRJ devido à facilidade e conhecimento dos profissionais envolvidos no serviço. Para a execução dos ensaios, em sua maioria, foram utilizados os laboratórios do UniFOA.

Para que o processo de preparação das amostras fosse melhor assimilado é demonstrado sistematicamente, na figura 16, o fluxograma para o processo de obtenção dos corpos de prova do metal patente novo, e na figura 17, o processo para o corpo de prova feito com metal patente reaproveitado.

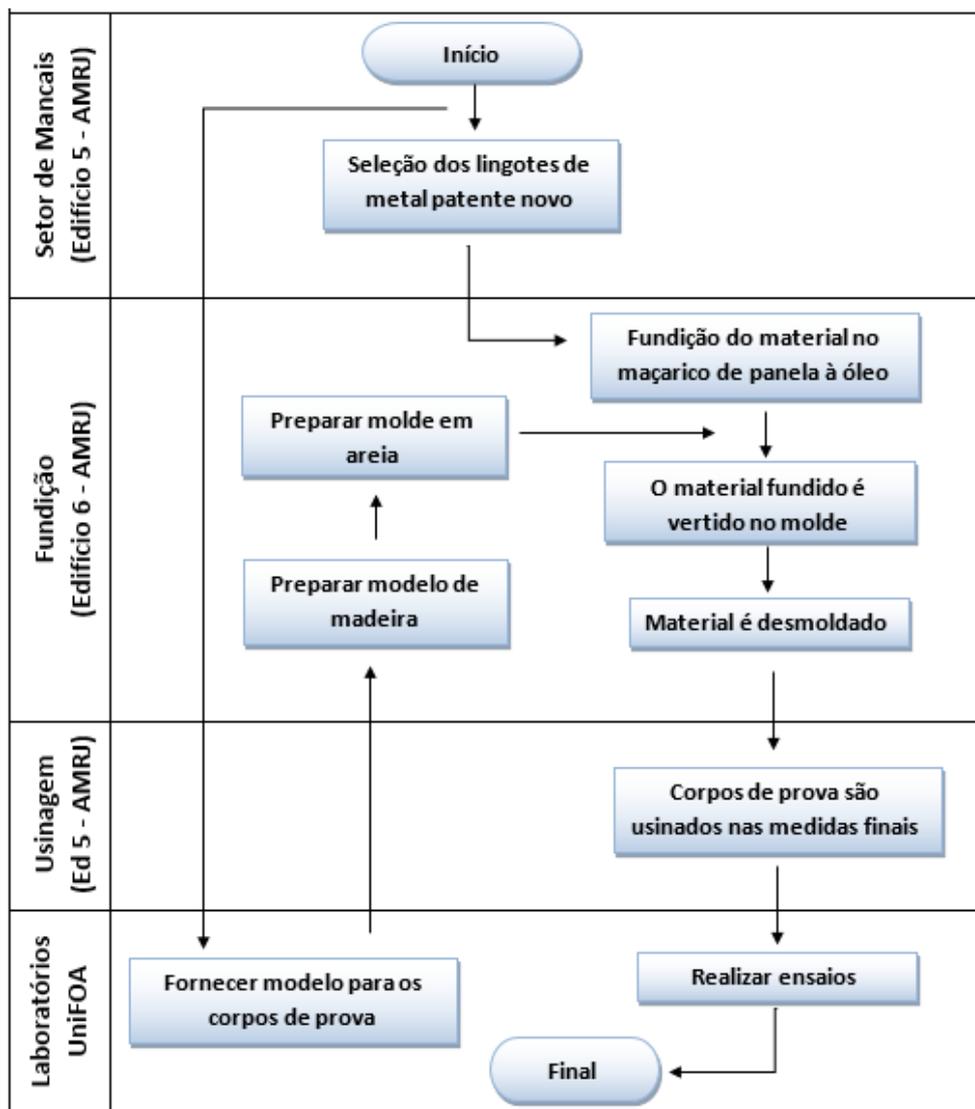


Figura 16. Fluxograma para obtenção dos corpos de prova do material novo. Fonte: autor.

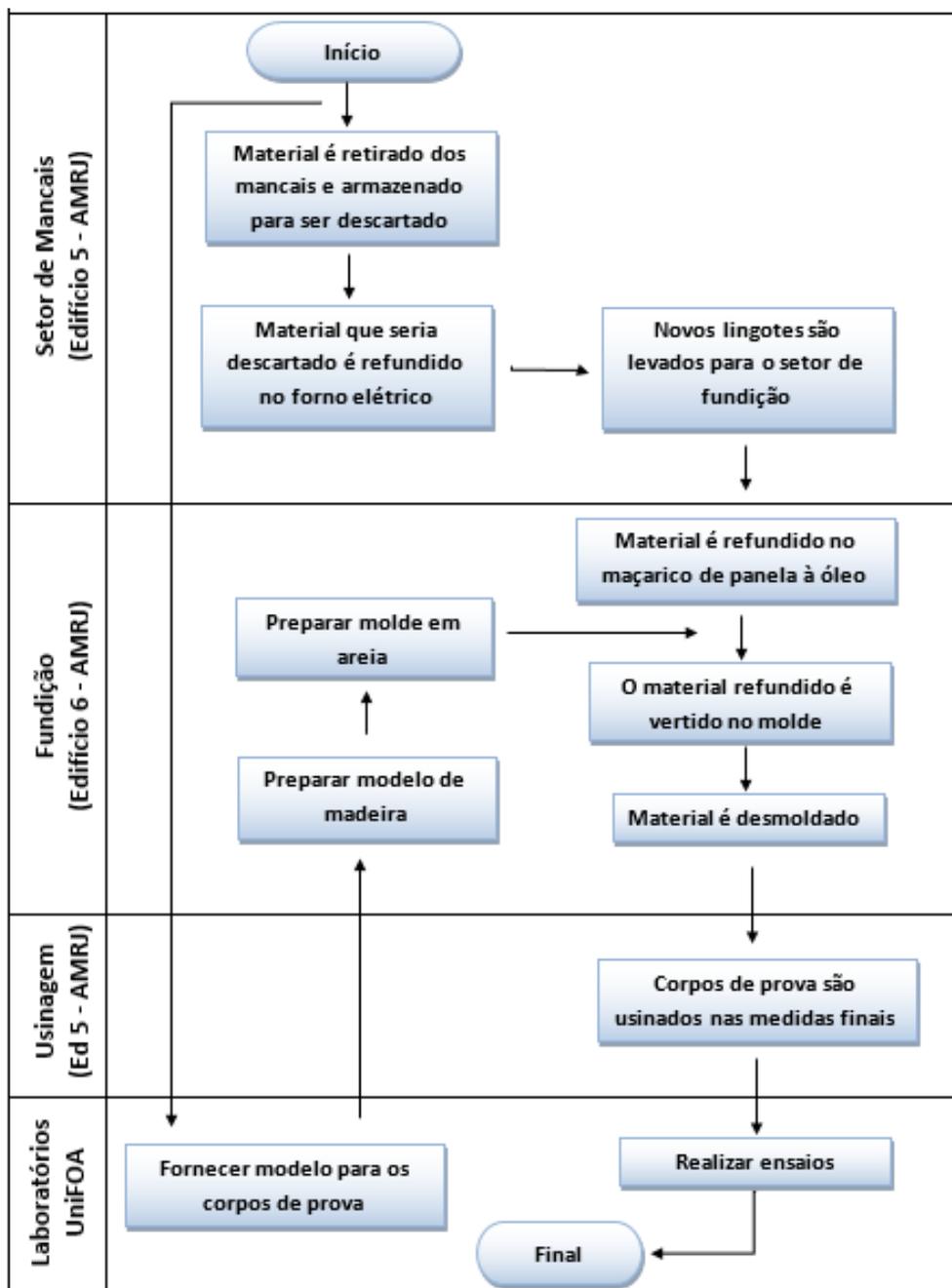


Figura 17. Fluxograma para obtenção dos corpos de prova do material reaproveitado. Fonte: autor.

5.2.1. Preparação das amostras

5.2.1.1. Modelo

Para fazer o molde onde foi vertido o metal fundido inicialmente foi preciso

preparar o modelo. O modelo, da Figura 18 (b), nas dimensões de 250x100x20 mm foi preparado na Oficina de Fundição do AMRJ, pelos artesãos moldadores, em madeira a partir do modelo padrão, figura 18a, cedido pelo Laboratório de Ensaios do UniFOA.

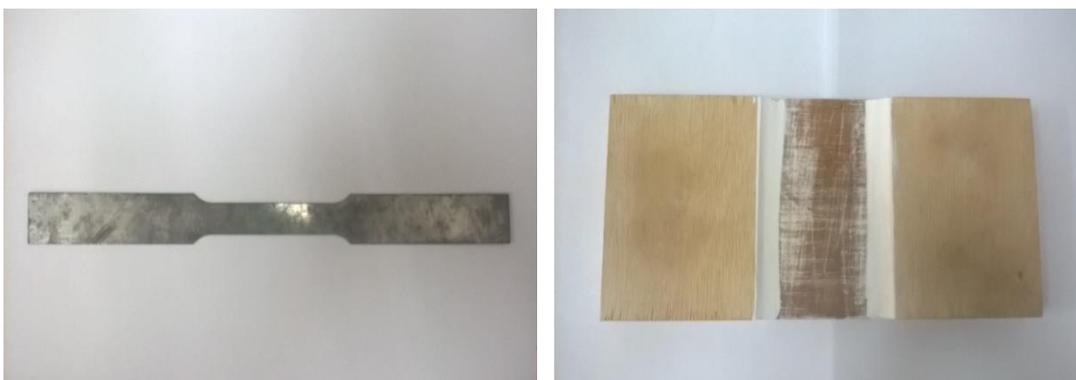


Figura 18. Modelo padrão (a) e Modelo de madeira (b). Fonte: autor.

5.2.1.2. Molde

Com o modelo pronto, a próxima etapa foi a preparação dos moldes de onde se retiraram os corpos de prova para os ensaios de tração.

O molde se caracteriza por duas peças moldadas em areia, conforme mostrado nas figuras 19 e 20, que quando se fecham formam uma cavidade no formato da peça que será fundida.

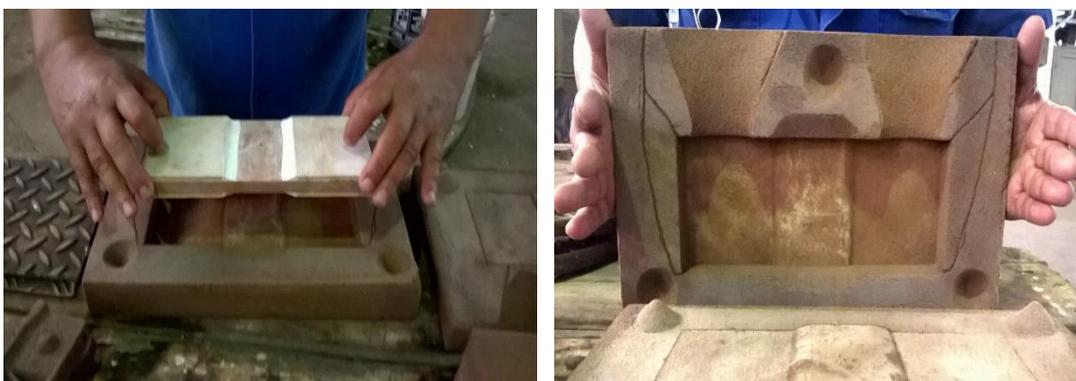


Figura 19. Atividade de moldação (a) e Molde aberto (b). Fonte: autor.

O molde foi preparado pelo setor de Fundição do AMRJ pelo processo de Areia à Base de Óleo (areia + óleo de macho) estufada à 300 °C, por 2 horas. Foram utilizados 12 kg de areia para fundição, base módulo finura AFS 50/70, concentração granulométrica de 50 a 70%, impureza e óxido menor que 1%, perda ao fogo máxima de 0,3% à 1200 °C, foi utilizado o óleo do tipo Macho Fix na mistura da areia.



Figura 20. Molde fechado (a) e (b). Fonte: autor.

5.2.1.3. Fundição das amostras

A fundição do metal foi realizada no forno elétrico da oficina de mancais e no maçarico de panela a óleo da oficina de fundição, demonstrados nas figuras 13 (a) e 13 (b), localizados na Divisão de Oficinas Mecânicas do AMRJ.

O material novo foi fornecido em lingotes, conforme a figura 21, e foi posteriormente refundido e vertido nos moldes para obtenção do respectivo corpo de prova.



Figura 21. Lingotes do metal patente novo. Fonte: autor.

Inicialmente o metal patente descartado de alguns mancais foi fundido no forno elétrico da figura 22, onde as impurezas maiores (escória) foram separadas, resultando em um lingote que foi refundido no maçarico de panela, figura 23 (a), onde foi retirada novamente a escória e o metal líquido foi vertido no molde, figura 23 (b), já preparado anteriormente.



Figura 22. Fornos elétricos para fundição (a) e Detalhe dos fornos (b). Fonte: autor.



Figura 23. Fundindo metal patente (a) e Vertendo o metal líquido no molde (b).
Fonte: autor.

Após isto, aguardou-se o resfriamento do metal e o molde foi aberto, figura 24, retirando a peça bruta que depois foi levada para ser rebarbada. Com isto foram obtidos dois blocos de metal patente, sendo um com metal patente novo e outro com metal patente reaproveitado, que foram enviados para o setor de usinagem.



Figura 24. Abertura do molde (a) e Molde aberto (b). Fonte: autor.

5.2.1.4. Processos de fundição dos mancais e dos corpos de prova

É evidente que existe uma diferença entre as fundições realizadas na fabricação dos mancais e na fundição realizada para os corpos de prova que estão sendo testados: os mancais são fundidos por centrifugação e os corpos de prova foram fundidos por gravidade. Essa diferença não será levada em consideração, pois

a qualidade superior da fundição por centrifugação é sabida, o que se quer comprovar aqui é a diferença entre os materiais, ou seja, entre o metal patente novo e o refundido.

Contudo, o que está sendo levado em consideração é a comparação entre materiais, e não entre processos, não podendo comparar materiais fabricados por gravidade com materiais fabricados por centrifugação. Pois o material processado por fundição centrífuga iria ter vantagem sobre o outro processo. Lembrando que fabricar os corpos de prova por centrifugação demandaria por ferramental não disponível e não usual nas oficinas do AMRJ para este formato.

Este também é o motivo do metal refundido não estar sendo comparado unicamente com os resultados da norma ASTM B-23 e sim, também, com o material novo fundido no Arsenal, para que seja o mais próximo da realidade alcançada na prática da oficina. Ou seja, a norma está sendo utilizada como direcionamento e não como único padrão de referência.

5.2.1.5. Usinagem dos corpos de prova

No setor de usinagem, os blocos, figura 25 (a), foram serrados com serra de fita e fresados nas medidas finais de um corpo de prova padrão com seção retangular de 50 mm de comprimento útil e 5 mm de espessura.

Num total de 10 corpos de prova de cada bloco, dentre os quais foram selecionados 5 de cada tipo que receberam marcações de “N” para o material Novo e “R” para o material Reaproveitado, conforme mostra a Figura 25(b).



Figura 25. Corpo de prova bruto desmoldado (a) e Corpo de prova finalizado (b).

Fonte: autor.

5.2.2. Ensaio

5.2.2.1. Ensaio de tração

Para realização do ensaio de tração foram utilizados 5 (cinco) corpos de prova de cada tipo de material, ou seja, cinco com material novo e cinco com material reaproveitado, fornecidos pelo AMRJ, conforme mostrado na figura 25 (b).

As amostras foram medidas utilizando-se um micrômetro centesimal (0,01 mm) para determinação da área transversal (largura x espessura) a ser ensaiada e um paquímetro para determinação da área útil, tratando-se de uma amostra de base 50 mm.

Para este ensaio foi utilizado o equipamento universal de ensaios mecânicos – EMIC DL 10000, do Laboratório de Ensaio do UNIFOA, com a taxa de carregamento de 3mm/min e célula de carga de 500 kgf, mostrada na figura 26, conforme a norma NBR 6892-1 [32].



Figura 26. Corpo de prova sendo ensaiado. Fonte: autor.

Após o ensaio de tração as partes seccionadas das amostras, afastadas dos locais onde ocorreram alongamento e fratura, foram reaproveitadas para os ensaios de microscopia óptica e microscopia eletrônica de varredura.

5.2.2.2. Preparação metalográfica

Para os ensaios a seguir foi utilizado o Laboratório de Ensaios de Materiais do UniFOA. E como em todo este trabalho, uma amostra de cada material, ou seja, uma de metal patente novo e a outra de metal patente reaproveitado. As amostras foram retiradas das partes seccionadas do teste de tração, utilizando-se uma cortadora metalográfica Teclago C M40, com disco abrasivo refrigerado. Sendo posteriormente embutidas à quente, utilizando-se resina granulada (baquelite), em uma embutidora metalográfica Arotec PRE 30 Mi, à 180°C e 100 kgf/cm² de pressão.

Depois de identificadas, as amostras foram submetidas ao processo de lixamento, utilizando-se uma politriz lixadeira metalográfica Arotec e lixas de carbeto de silício, com oito granulometrias distintas, na seguinte sequência: 220, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200 e 1500. Após esse processo foi necessário realizar uma verificação do lixamento através do microscópio óptico Opton TNM-07T-PL, com lente ocular de 10X e lentes objetivas de 10X, 20X e 40X, comparando a preparação da amostra com a norma E3 da ASTM. Após ser aprovada, a amostra foi polida com feltro e alumina nas granulometrias de 1µm, 0,3 µm e 0,05 µm.

Por último a amostra foi atacada quimicamente, durante 3 s, com reagente químico Nital a 2%, solução de HNO₃, dissolvido em 98 ml de álcool etílico, conforme NBR-13284 da ABNT, para revelação das microestruturas típicas das amostras.

5.2.2.3. Microscopia óptica

Através de um microscópio metalográfico invertido Opton TNM-07T-PL e um microcomputador com o software ScopePhoto3.0, ambos do Laboratório de Ensaios de Materiais do UniFOA, obteve-se a microscopia óptica utilizando ampliações de 100X, 200X e 400X, revelando-se a microestrutura do material em questão.

5.2.2.4. Microscopia eletrônica de varredura

Para verificar-se a morfologia da microestrutura do corpo de prova, foi utilizado o microscópio eletrônico por varredura Hitachi modelo TM3000, do Laboratório de Ensaios de Materiais do UniFOA, onde primeiramente se fez necessário criar vácuo para não oxidar a amostra e também inserir uma lâmina de cobre para melhorar a

condutividade elétrica do material. A análise foi realizada por meio de um detector de elétrons secundários, com tensão de tubo de 5 kV.

5.2.2.5. Análise química

Para a realização da análise química dos componentes do material foram utilizados os laboratórios da empresa DMCJ Inspeções, com o espectrômetro de emissão óptica para análise de metais da Ametek, modelo Spectromaxx SMA-20, sob condições ambientais controladas de $23 \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar entre 30 e 80%.

Sendo o método de análise de Sn por diferença, Sb e Cu por absorção atômica e demais elementos por emissão óptica.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. ENSAIO DE TRAÇÃO

A figura 27 apresenta as curvas de engenharia de deformação x tensão obtidas pelo ensaio de tração do metal patente novo, recebido do fornecedor e refundido para confecção das amostras, que juntamente com as informações da norma ASTM B23 servirá de parâmetro para o experimento, ou seja, ele é o mais próximo da realidade encontrada em campo. Em alguns casos passados, testados pelo Controle de Qualidade do AMRJ, nem mesmo o material novo atendeu aos requisitos da Norma.

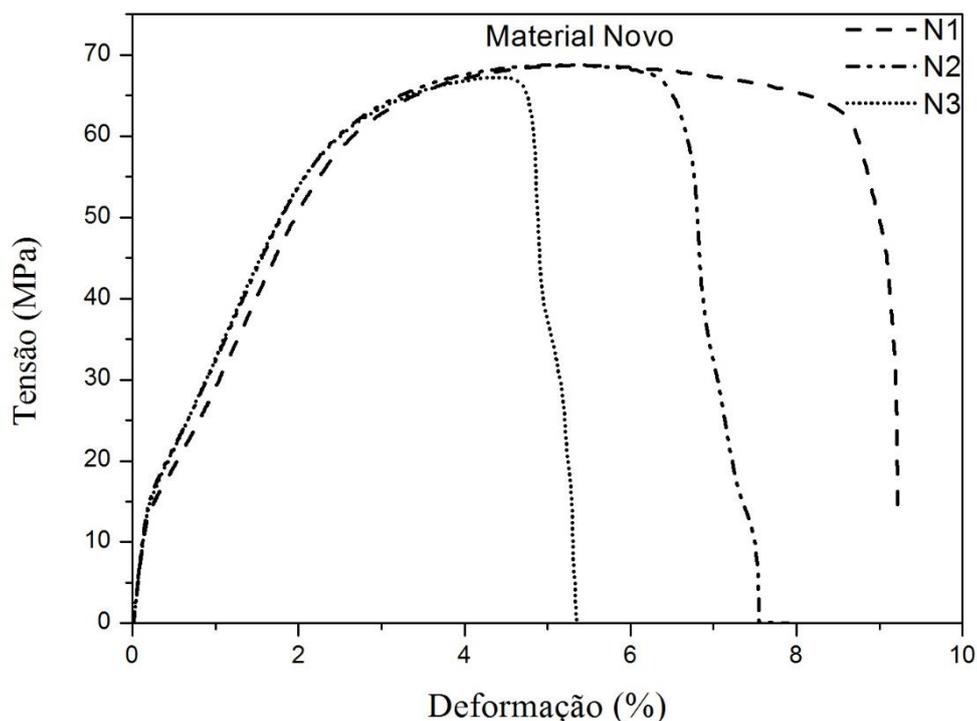


Figura 27. Curva de engenharia do ensaio de tração tensão x deformação do metal patente novo. Fonte: autor.

Dos cinco ensaios realizados com os corpos de prova com metal patente novo dois foram descartados, pois romperam muito antes do mínimo esperado, e não são mostrados na figura 27. Isto ocorreu devido a defeitos como heterogeneidade e vazios gerados durante o processo de fabricação dos corpos de provas, mostrado na figura

28, onde aparecem vazios encontrados na fundição por gravidade de duas amostras de metal patente novo que foram descartadas.

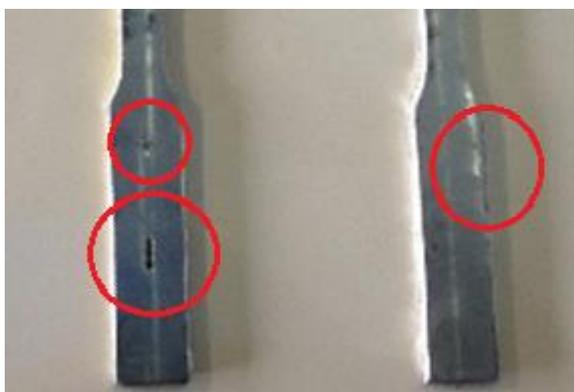


Figura 28. Defeitos no corpo de prova. Fonte: autor.

A figura 27 mostra que no material novo as três amostras consideradas apresentaram uma média da tensão máxima de aproximadamente 68 MPa e a média do limite de escoamento em torno de 64 MPa. De acordo com a norma ASTM B23, a liga do tipo 2 do metal patente deve apresentar como padrão o limite de escoamento igual a 23,1 MPa à 20 °C [7]. Esta diferença é devido às características microestruturais dos corpos de provas que foram fundidos antes da realização do ensaio de tração.

A figura 29 apresenta as curvas de engenharia de tensão x deformação do metal patente recuperado obtidas pelo ensaio de tração. Neste caso também houve o descarte de dois corpos de provas, pois os mesmos romperam a uma tensão muito baixa.

No material recuperado observa-se que a média das tensões máximas se apresenta próximo a 58 MPa, cerca de 10 MPa (18%) abaixo da média do material novo, apresentando uma ruptura ligeiramente mais frágil. Este fato pode ter acontecido por contaminação da Liga 2 por materiais de outras ligas de metal patente provavelmente misturados nos mancais destinados para descarte, pois atualmente não há uma seleção apurada dos mancais destinados ao descarte.

Outra possibilidade desta contaminação é devida ao recipiente onde é fundido e depositado o metal patente, pois o mesmo é simples e sem cuidados especiais,

misturando-o com outras sobras de metais e cordoalhas, além de sucatas diversas, o que provavelmente impossibilita um tratamento adequado do metal. O ideal seria a fundição e o armazenamento do metal patente usado em um recipiente adequado e limpo, o que facilmente pode ser conseguido se a atividade de reutilização for implantada no setor.

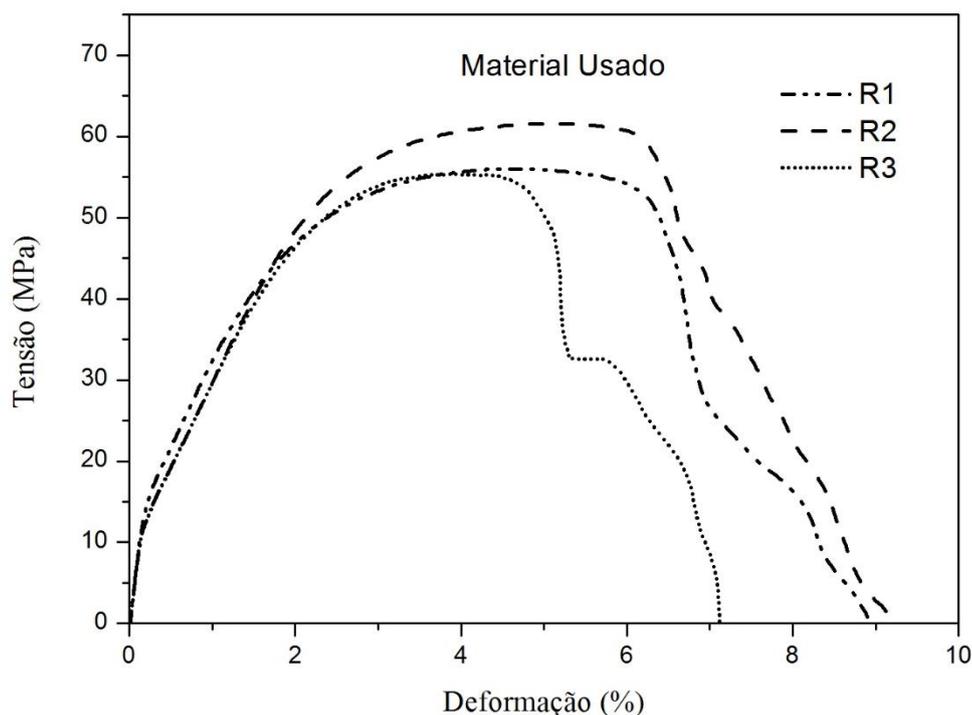


Figura 29. Curva de engenharia do ensaio de tração tensão x deformação do metal patente reaproveitado. Fonte: autor.

As médias do alongamento de ambos os materiais ficaram próximas, com 8,5% de deformação média para o material reaproveitado e 7,5% para o material novo, uma diferença de apenas 1 (um) ponto percentual entre as porcentagens de alongamento, o que representaria aproximadamente a $54,25 - 53,75 = 0,5$ mm do comprimento.

O módulo de elasticidade encontrado para o material novo foi de 9,2 GPa e para o reaproveitado foi de 8,8 GPa, novamente apresentando uma pequena perda, em torno de 5%, o que também pode ser explicado pelos mesmos motivos anteriores, ou seja, pela contaminação da Liga 2 por materiais de outras ligas de metal patente.

O material novo apresenta módulo de tenacidade de 4,95 enquanto o material reaproveitado é de 4,59.

A média do limite de escoamento das amostras do material reaproveitado foi de 50 MPa, comparando com o valor do limite de escoamento (LE) do material novo, a diferença foi de 14 MPa menor.

6.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

As figuras 30 e 31 mostram as imagens obtidas por microscopia óptica do metal patente novo e do recuperado, após a fundição. Observa-se que ambas microestruturas apresentam precipitados a base de cobre (η) com a matriz de estanho (α). Quanto a morfologia o metal patente novo apresenta precipitados de forma mais heterogênea, figura 30, em relação ao metal patente recuperado, figura 31. Outra característica observada é a deficiência de antimônio precipitado na forma de cubos (β) no metal patente recuperado, estando em desacordo com a configuração esperada para o metal como se fosse novo.

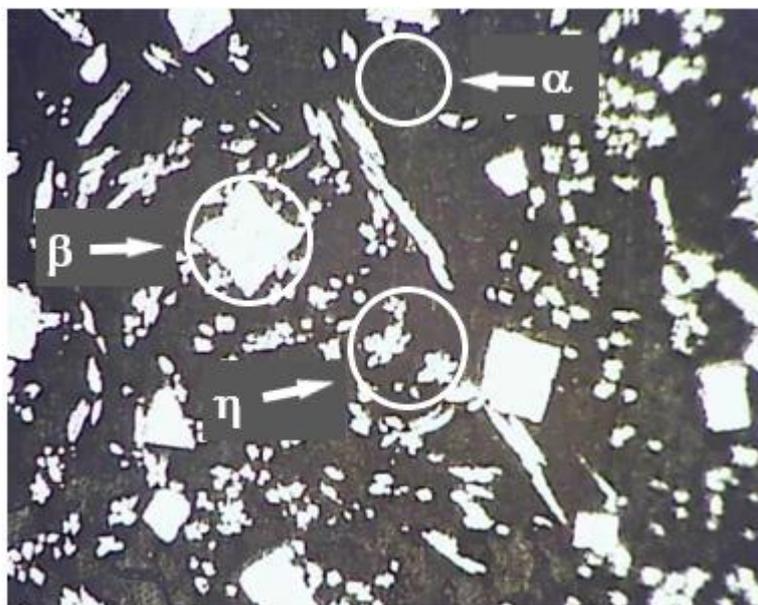


Figura 30. Microestrutura do material novo realizado por MO com aumento de 100X.
Fonte: autor.

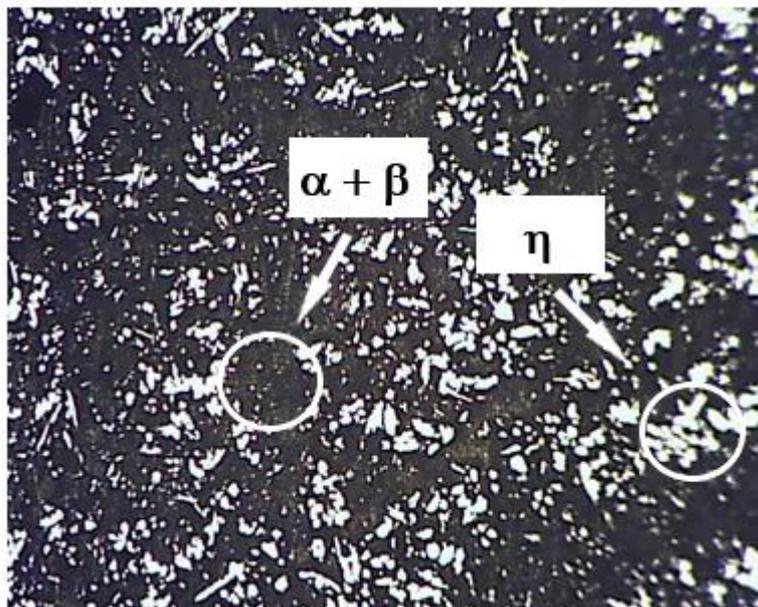


Figura 31. Microestrutura do material recuperado realizado por MO com aumento de 100X. Fonte: autor.

Por já ter sido utilizado e a forma sem cuidados especiais com que o material foi descartado estão entre as principais causas pelas quais o material reaproveitado apresentou a sua composição química modificada em relação ao material novo.

6.3. MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Pode-se observar nas imagens geradas pelo MEV, nas figuras 32 e 33, que a estrutura do metal patente pode ser confirmada comparando-a com a figura 1 deste trabalho, apresentada por Sadykov [4].

Na figura 32 percebem-se nitidamente as fases α (solução sólida de Sn, Cu e Sb), β (composto Sn-Sb) e η (composto Cu_6Sn_5) do metal novo, também aparentes na microscopia óptica da figura 30.

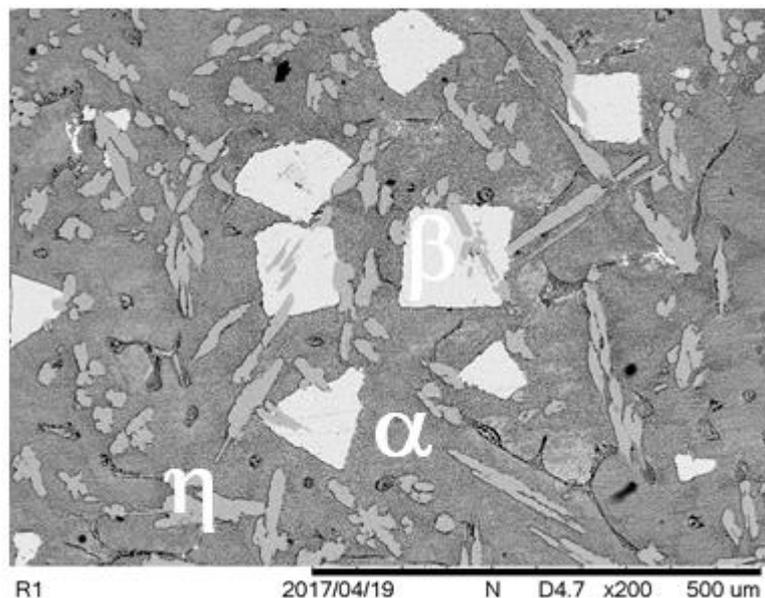


Figura 32. Microestrutura do material novo realizado por MEV com aumento de 200X. Fonte: autor.

Na microestrutura do material novo realizado por MEV, com aumento de 1000X, apresentado na figura 33, observa-se também as três fases presentes, mostrando a estrutura de cristais duros e resistentes ao desgaste combinada com a matriz mole advinda do estanho, que permite a circulação do óleo lubrificante entre os cristais durante o funcionamento, mencionada por Barykin [5]. O que não foi observado na estrutura do material reaproveitado, mostrada na figura 34.

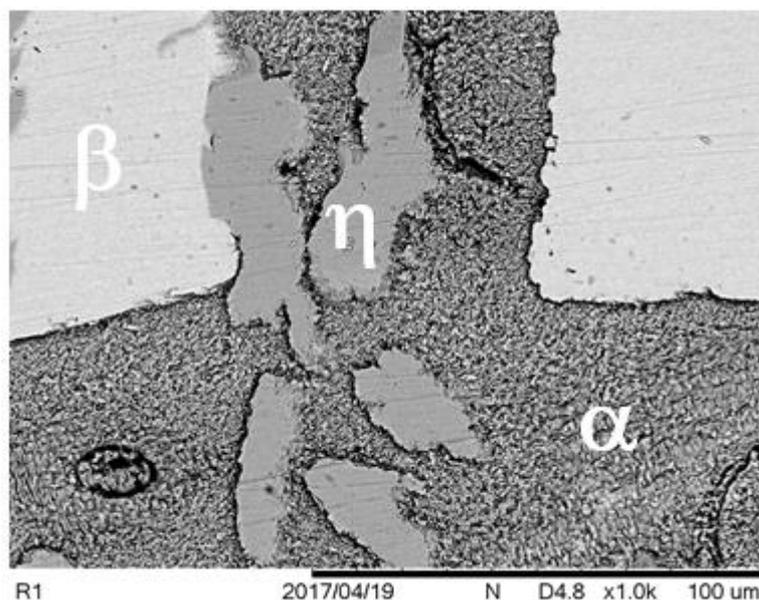


Figura 33. Microestrutura do material novo realizado por MEV com aumento de 1000X. Fonte: autor.

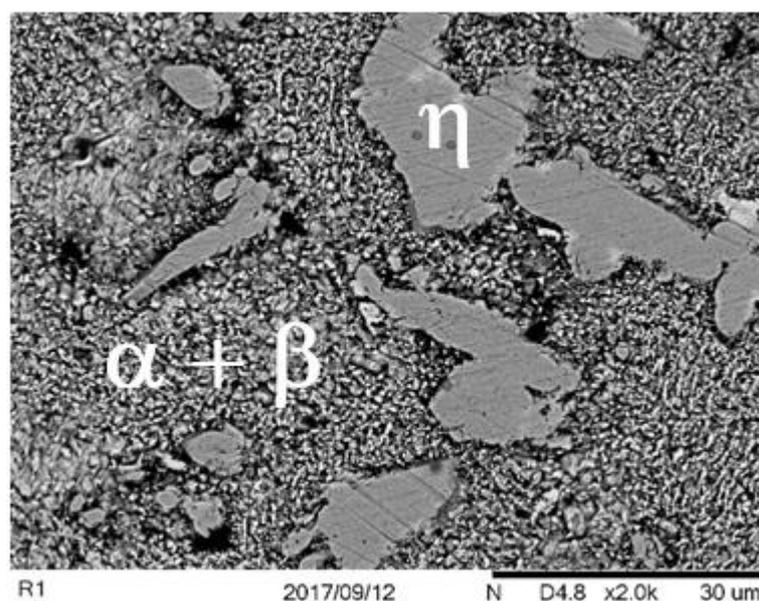


Figura 34. Microestrutura do material recuperado realizado por MEV com aumento de 1000X. Fonte: autor.

Na figura 35, com o aumento de 500X, as fases que compõem a liga podem ser melhor observadas, chegando a ter até mesmo uma percepção das porcentagens de cada uma.

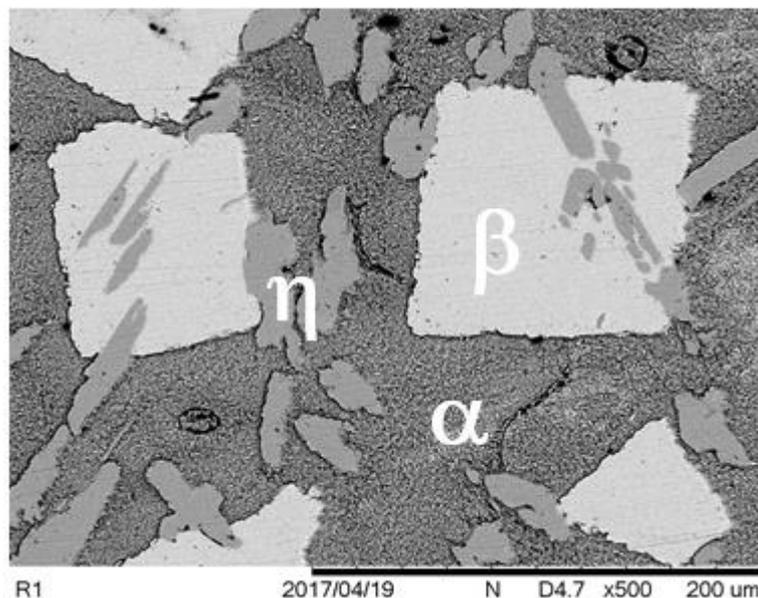


Figura 35. Fases de composição da liga observadas no material novo. Fonte: autor.

Nas imagens do MEV do material reaproveitado, encontrado nas figuras 34 e 40, assim como na imagem da MO, figura 37, pode-se perceber que a estrutura do metal patente mostra, o que se pensava de início ser, a falta de antimônio. O que poderia ocasionar menor desempenho do material recuperado em relação ao material novo.

A explicação ocorre em Zeren [11] onde mostra que os cubos de Sb não são observados em ligas que contêm Sb com menos de 7,5% e que a maior dureza e melhor propriedade tribológica acontecem pela presença e dispersão homogênea da dureza dos cubos na matriz. Cubos esses que não são encontrados no material reaproveitado, mostrado nas figuras 37 e 40.

Ao se comparar a figura 36 apresentada por Zeren [11] de um material da liga 2 com 7,2% de antimônio e a figura 37 do metal patente reaproveitado, nota-se que ambos não apresentam a precipitação dos cubos de SbSn por estarem com menos de 7,5% de Sn. Desta forma a estrutura do material fica mais refinada, porém tem reduzida a sua resistência à tensão de compressão [11].

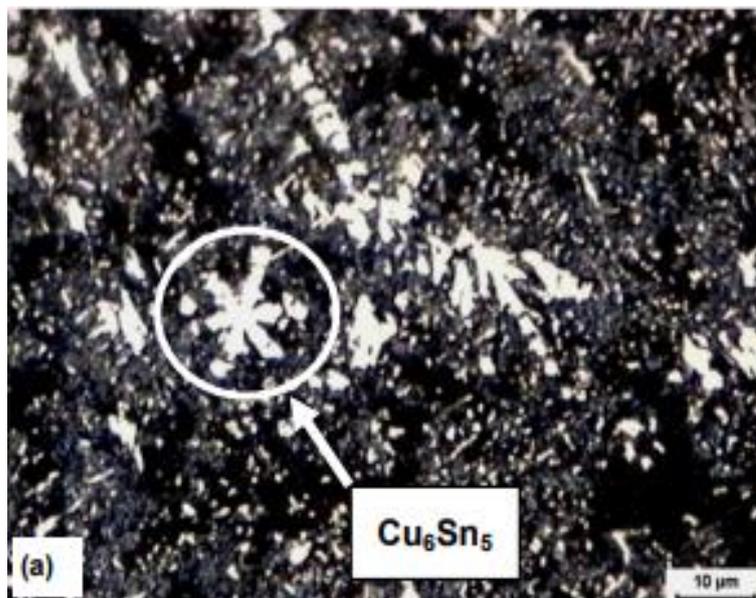


Figura 36. Metal patente - Liga 2, (89,2% Sn, 7,2% Sb, 3% Cu e 0,4% Pb) 500X.
Fonte: [11]

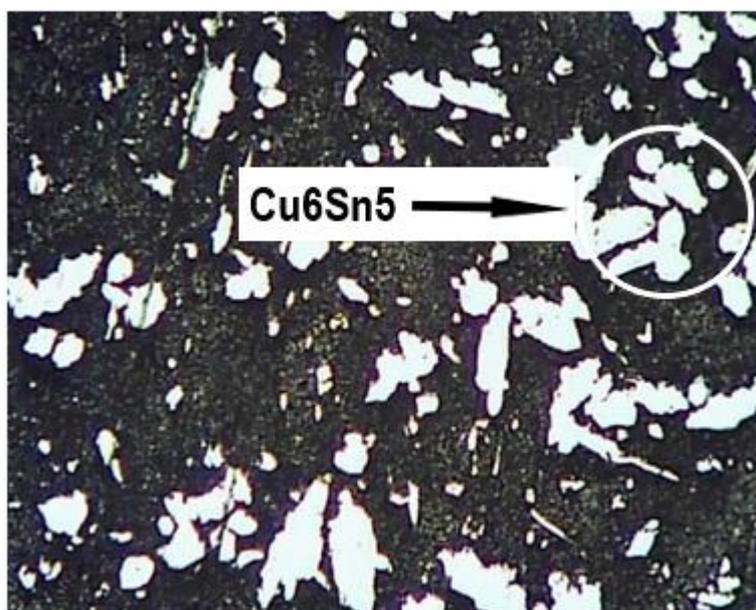


Figura 37. Metal patente recuperado ampliado 400X. Fonte: autor.

Na figura 38 é apresentada a imagem de um metal patente de liga 5 com 20,2% de Sb o que gera os precipitados de SbSn. Comparando-o com a figura 39 do metal patente novo, com 7,96% de Sb, onde nota-se o início da formação de alguns cubos de SbSn, corroborado por Zeren [11].

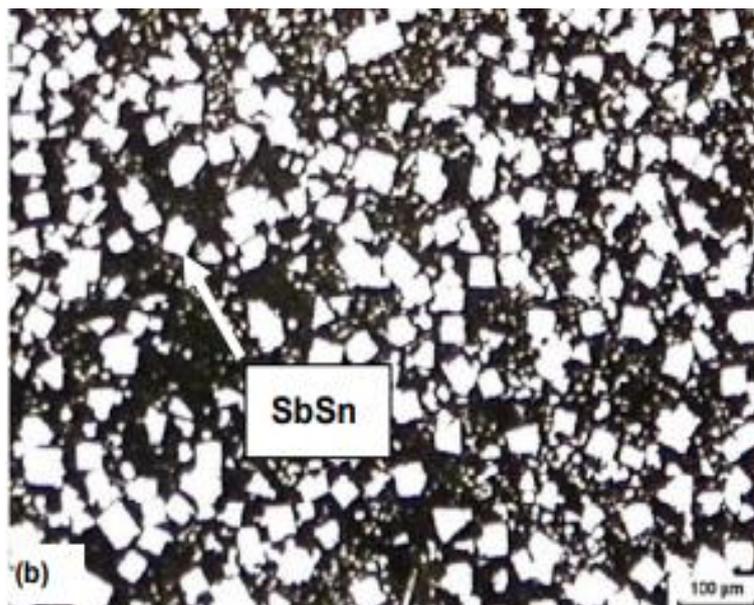


Figura 38. Metal patente liga 5, (60,3% Sn, 20,2% Sb, 2,6% Cu e 16,6% Pb). Fonte: [11]

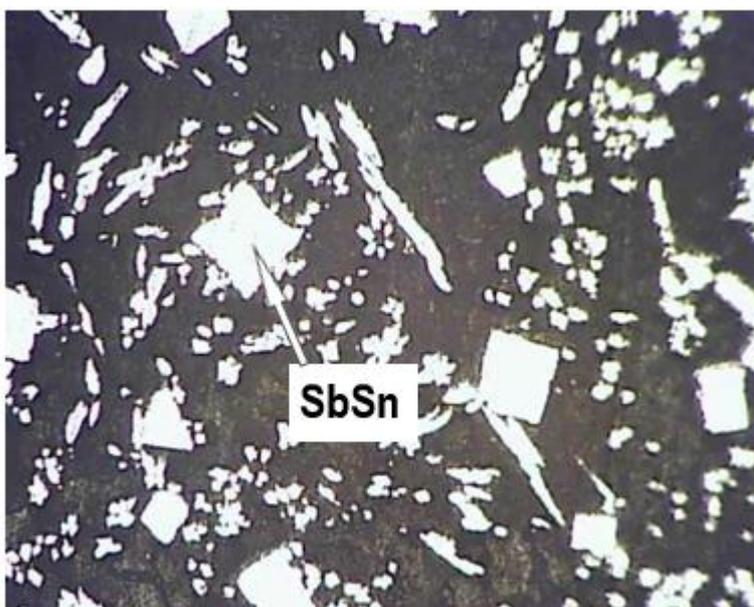


Figura 39. Metal patente novo (88,45% Sn, 7,96% Sb, 3,32% Cu e 0,241% Pb).
Fonte: autor.

Na figura 40 se observam alguns pontos pretos, que inicialmente foram considerados como contaminação. Ao se analisar a figura 41 [11] pôde-se concluir se tratar de poros no material, podendo ser observado também que os mesmos se apresentam em pequenas quantidades.

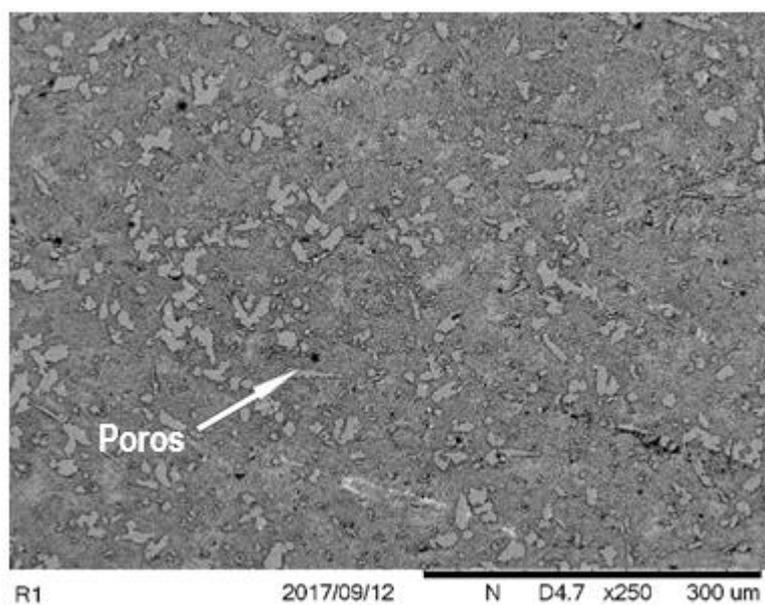


Figura 40. Microestrutura do material recuperado realizado por MEV com aumento de 250X. Fonte: autor.

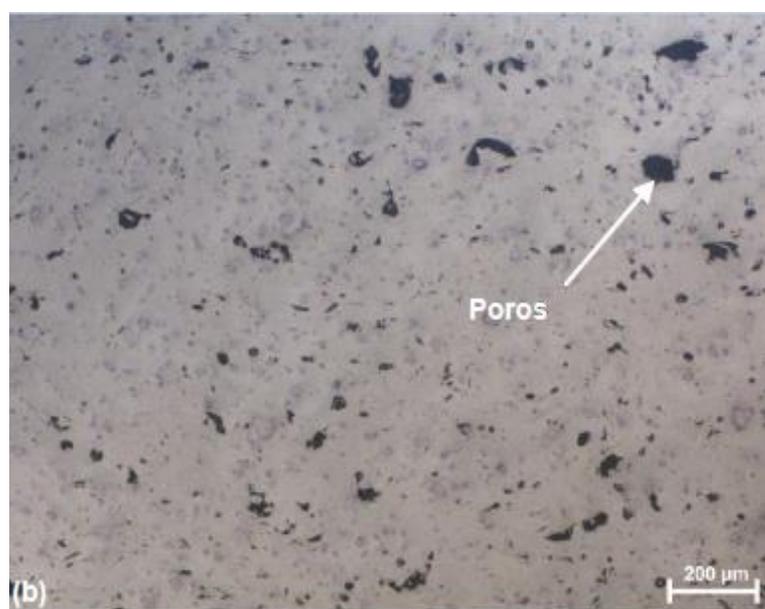


Figura 41. Presença de poros em ligas de metal patente. Fonte: [11]

6.4. ANÁLISE QUÍMICA

Os resultados apresentados na análise química estão de acordo com o apresentado nos demais ensaios desta pesquisa. Pode-se observar, na tabela 5, a composição química do material novo em comparação ao material reaproveitado.

Tabela 5. Composição química do metal patente novo e reaproveitado. Fonte: autor.

ELEMENTO	MATERIAL NOVO	MATERIAL REAPROVEITADO
Estanho	88,45	88,54
Chumbo	0,241	0,041
Cobre	3,32	4,02
Ferro	0,005	0,004
Alumínio	< 0,001	< 0,001
Antimônio	7,96	7,3
Arsênio	0,008	0,010
Bismuto	0,014	0,006
Prata	0,001	0,001

Pela tabela 5 pode-se observar que o material reaproveitado tem 7,3% de antimônio, corroborando com a estrutura mostrada pela MO da figura 31 e pela MEV da figura 34, onde devido a quantidade de antimônio ser inferior a 7,5% não apresenta a formação de cubos de SnSb [11]. Porém, mantendo a quantidade entre 7,0 e 8,0%, conforme pede a norma ASTM B23 [7].

A menor quantidade de chumbo apresentada pelo material reaproveitado, 0,041% contra 0,35% da norma [7], pode ser explicada pela mistura de mancais retirados de bordo com ligas de metal patente de tipos diferentes antes do processo de fundição do material reaproveitado. Outra possibilidade seria a evaporação do chumbo por apresentar a menor temperatura de ebulição dentre os elementos químicos da liga, em torno de 1749°C, uma vez que o processo de fundição usado não possui controle de temperatura.

Os demais elementos, tanto do material novo quanto do material reaproveitado, mostram-se dentro das faixas indicadas pela norma ASTM B23 [7].

6.5. VIABILIDADE TÉCNICA

O sucesso de um trabalho como este depende da viabilidade técnica da sua implantação. Tem que ser levado em consideração se o nível tecnológico requerido é condizente com a realidade tecnológica do momento em que está sendo testada a possibilidade de implantação da melhoria, ou seja, se não há barreiras tecnológicas à sua implantação.

Em um primeiro momento houve a necessidade de identificar quais as mudanças seriam necessárias, para depois procurar encontrar maneiras de se pôr em prática essas alterações.

As alterações necessárias neste processo foram detectadas logo no início, pois como anteriormente não se tinha a pretensão de se reaproveitar o material, algumas precauções simples sempre foram deixadas de lado, como por exemplo: a limpeza do material retirado de bordo, a pré-seleção do material, a armazenagem do material descartado e o recipiente utilizado para realizar a fundição. Cada uma dessas alterações necessárias será explicada detalhadamente.

6.5.1. Limpeza das peças retiradas de bordo

Uma providência simples seria a limpeza, descontaminação e secagem do mancal ao ser retirado de bordo, antes do derretimento do material que iria para descarte, o que eliminaria a maior parte da contaminação por graxa, óleo e impurezas externas advindas do ambiente durante o uso e o procedimento de desmontagem.

Atualmente os mancais somente são limpos após o derretimento do metal patente em uso, figura 42, antes de serem preparados para o enchimento.



Figura 42. Mancais limpos prontos para enchimento. Fonte: autor.

6.5.2. Pré-seleção do material

Algo importante é a pré-seleção do material, pois como existem várias faixas de ligas do metal patente conforme a norma ASTM-B23, o que pode ser observado na tabela 1, é importante que não se misture os tipos de mancais diferentes durante a fundição. Caso haja a mistura de dois ou mais tipos da liga o resultado com certeza será uma terceira liga com porcentagens desconhecidas de cada elemento.

Caso isso venha a ocorrer, seria necessário realizar no mínimo mais duas análises para determinar a porcentagem correta dos elementos da liga desejada. Ou seja, o primeiro exame para se determinar qual o grau atual e outro exame após o balanceamento da liga para se certificar do resultado. Caso o resultado não seja positivo, outras análises serão necessárias até se encontrar a liga correta, o que com certeza tornará inviável o proposto neste trabalho, pois aumentaria muito o custo para obter o resultado desejado.

6.5.3. Armazenagem

O recipiente onde é depositado o metal patente fundido para ser descartado é simples e sem cuidados especiais, figura 43, misturando o metal patente com outras sobras de metais, sucatas diversas, cordoalhas que são utilizadas para vedar o

manca durante o enchimento, e até mesmo lixo comum, o que provavelmente impossibilita manter uma liga homogênea e correspondente com a original.



Figura 43. Recipiente de depósito do metal patente para descarte. Fonte: autor.

O ideal é que o armazenamento do metal patente a ser reaproveitado seja feito em um recipiente adequado e limpo, e mantido assim até o momento da fundição.

6.5.4. Recipiente de fundição

E por fim a mudança do recipiente de fundição, mudando o orifício de escoamento do fundido da borda para o meio ou fundo do cadinho, o que forçaria o metal líquido escoar enquanto a escória ficaria retida no recipiente.



Figura 44. Forno com orifício abaixo da borda. Fonte: [45]

6.5.5. Implantação das soluções

Levando em consideração que as soluções técnicas propostas são simples, podendo ser comercialmente encontradas e facilmente implantadas, é possível dizer que este trabalho é tecnicamente viável. Até mesmo porque diversas empresas do ramo de metalurgia e fundição já possuem esses procedimentos implantados em suas instalações. Ou seja, todas as soluções podem ser facilmente aplicadas se a atividade de reutilização for implantada no setor de fundição de mancais do AMRJ, caso contrário, não há necessidade de mudanças.

Porém, a análise técnica também deve ser acompanhada de uma análise de viabilidade financeira, ou seja, se a quantidade produzida absorve os custos de implantação das mudanças.

6.6. VIABILIDADE ECONÔMICA

Uma vez que este trabalho se apresentou tecnicamente viável, o próximo passo foi comprovar se este procedimento seria também economicamente viável. Pois de nada adiantaria ser implantado se o custo de recuperar o material superasse o custo de aquisição do material novo, sendo que o material descartado atualmente é vendido como sucata de material não ferroso.

De início pensou-se em calcular o valor para os ensaios para cada mancal a

ser fundido, ou seja, o custo seria de aproximadamente R\$980,00 para a Análise Química, R\$ 770,00 para o Ensaio de Tração e R\$ 410,00 para o Ensaio de Dureza, totalizando R\$ 2.160,00 em valores de março de 2019, tomando por base os valores apresentados pela empresa de custo médio da tabela 6. Isto seria totalmente inviável para um mancal médio de aproximadamente 20 quilogramas de metal patente que custaria cerca de R\$ 2.080,00, sendo o valor do quilograma do metal patente em 2018 de aproximadamente R\$ 104,00.

Porém, pode-se acumular o material a ser reciclado e retirar amostras a cada 500 kg acumulados, que é a capacidade de um dos fornos, o que diluiria o custo para 4% do valor do material.

Se partir do princípio que o AMRJ produza uma unidade de 20 kg por dia durante aproximadamente 200 dias por ano ao custo de R\$ 104,00 o kg de metal patente, teremos o total de R\$ 416.000,00 por ano de gasto com aquisição de matéria prima. Considerando uma perda de material em torno de 20% e os custos com os ensaios em 4%, sendo o custo operacional de 0%, devido não haver necessidade de aumentar uma só atividade no processo, a economia anual chegaria a R\$ 316.000,00.

Concluindo assim, que o reaproveitamento deste material também é financeiramente viável.

Tabela 6. Valores em R\$ dos principais ensaios metalográficos (Base 03/2019).
Fonte: autor.

Empresa	DMCJ Ensaios	IPTRLM	Tecmetal
Valores em reais	900,00	2.160,00	2.500,00

7. CONCLUSÕES

O ensaio de tração mostrou que o material reaproveitado apresenta limite de escoamento de 50 MPa, 14 MPa a menos que o material novo, mesmo assim, superando a norma ASTM B23, que é de 23,1 MPa.

As médias do alongamento de ambos os materiais ficaram próximas, com 8,5% de deformação para o material reaproveitado e 7,5% para o material novo.

O módulo de elasticidade encontrado para o material novo foi de 9,2 GPa e para o reaproveitado foi de 8,8 GPa.

Pela MO, em conjunto com a análise química, observa-se que o material reaproveitado, com 7,3% de antimônio, não apresenta os cubos de SbSn que só se formam acima de 7,5% de Sb. Desta forma, a estrutura do material fica mais refinada, porém tem reduzida a sua resistência à tensão de compressão.

O MEV, embasado na literatura, mostra que as supostas impurezas da liga são na verdade poros e que no material reaproveitado estão em pequenas quantidades.

Pelos resultados apresentados ficou evidente que há diferenciação entre o material novo e o material que é retirado de um mancal descartado, porém ambos superando a norma ASTM-B23. Mostrando que não há impedimento técnico para realização do proposto neste trabalho e que também não há impedimento financeiro, pois o custo para realizar o teste é inferior ao custo de aquisição de material novo para a quantidade apresentada.

Com esses resultados fica proposto ao AMRJ a adoção das sugestões deste trabalho para que se inicie a recuperação do Metal Patente, que antes era descartado, para ser utilizado nos serviços vindouros de enchimento de mancais de linhas de eixo para os navios de guerra da Marinha do Brasil.

Esse procedimento, além de ter retorno financeiro, será um grande ganho para o meio ambiente, pois uma quantidade considerável de material deixará de ser, provavelmente, descartado irregularmente e passará a ser reciclado.

8. TRABALHOS FUTUROS

Como trabalho futuro poderão ser preparados dois mancais de iguais dimensões e montados em situações idênticas de operação, sendo que um de metal patente novo e o outro de metal patente de material reaproveitado, para que sejam acompanhados e após algum tempo de serviço os mesmos sejam retirados de bordo e suas características físicas sejam comparadas, para verificar se houve perdas no mancal feito de material reaproveitado ou se o mesmo manteve as mesmas características do mancal de metal patente novo.

Como segunda opção de trabalho futuro seria utilizar uma bucha de polímero autolubrificante, montada na mesma situação da primeira proposta, para investigar se materiais poliméricos poderiam substituir os materiais metálicos nesta situação, pois as mesmas se mostram muito eficiente em diversos serviços nas quais substituem os metais. Um fabricante de buchas de polímeros autolubrificantes promete bons resultados em eixos de pequenos diâmetros [42], cabe confirmar e ampliar para eixos de diâmetros maiores, próximos aos diâmetros encontrados nas embarcações da Marinha do Brasil.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] OBERG, Erik; et al. **Machinery's Handbook: Part XI Machine Elements**; Cap. 96 Plain Bearings. 30th. ed. South Norwalk: Industrial Press, 2016. 2896 p.
- [2] ALMEIDA, José P. P. de. **Revestimento de Chumaceiras com Ligas à Base de Estanho**: Caracterização da interface e estudo da adesão do revestimento ao substrato. 2014. 77 f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, 2014.
- [3] ALCOVER, Paulo R. C. Jr., **Microestrutura, propriedades mecânicas e tribológicas de Metal Patente depositado por Aspersão Térmica** – Dissertação de Mestrado. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Ponta Grossa, 2017.
- [4] SADYKOV, F. A., BARYKIN, N. P., VALEEV, I. S., & DANILENKO, V. N. (2003). **Influence of the structural state on mechanical behavior of tin babbitt**. Journal of Materials Engineering and Performance, 12(1), 29-36.
- [5] BARYKIN N. P., SADYKOV F. A., ASLANIAN I. R. Wear and Failure of Babbitt Bushes in Steam Turbine Sliding Bearings. **Journal of Materials Engineering and Performance**, Moscou, v. 9, p. 110–115, feb. 2000.
- [6] LESZCZYNSKA-MADEJ B., MADEJ M., **The properties of Babbitt bushes in steam turbine sliding bearings** - Archives of Metallurgy and Materials, Vol 56. Moscou 2011, p 805-812
- [7] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **B23-00**: Standard Specification for White Metal Bearing Alloys. West Conshohocken, 2000.
- [8] Society of Automotive Engineers. SAE J460 – **Bearing and Bushing Alloys-Chemical Composition of SAE Bearing and Bushing Alloys** – 1991
- [9] Federal Specifications. QQ-T-390A - **Tin alloy ingots and castings and lead alloy ingots and castings (antifriction metal) for bearing applications** – USA – 1972
- [10] NEALE, Michael J. **The Tribology Handbook**. 2th ed. London: Butterworth-Heinemann, 1995. 640 p.

- [11] ZEREN, Adalet. **Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding**. Materials and Design 28 – Elsevier, Turquia, 2007.
- [12] ZEREN A., FEYZULLAHOGLU E., ZEREN M,. **A study on tribological behaviour of tin-based bearing material in dry sliding**. Elsevier, Turquia, 2005.
- [13] ASM METALS HANDBOOKS. **Friction, lubrication and wear technology**. v. 18. 1992.
- [14] MASSALSKI, T. B.; **Binary alloy phase diagrams**. American Society for Metals, Metals Park, OH, 1982.
- [15] MOURA, C. R. S. **Lubrificantes e lubrificação**. Rio de Janeiro: LTC, 1975.
- [16] STACHOWIAK, G. W.; BATCHELOR, A. W. **Engineering tribology**. 2. ed. Austrália: Butterworth-Heinemann, 2000.
- [17] CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e propriedades das ligas metálicas**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986. 266 p. v. 1.
- [18] BHUSHAN, Bharat; GUPTA, B. K. **Handbook of Tribology: Materials, Coatings, and Surface Treatments**. New York: McGraw-Hill, 1991. 1168 p.
- [19] WANG, Qian. Seizure failure of journal-bearing conformal contacts. **Wear Journal**, v. 210, ls. 1-2, p. 8-16, sep.1997.
- [20] HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of engineering materials**. Londres: Edward Arnold, 1992.
- [21] OKADA, T.; IWAI, Y.; HOSOKAWA Y. Resistance to wear and cavitation erosion of bearing. **Wear Journal**, v. 110, ls. 3-4, p. 331-343, aug. 1986.
- [22] KLAAS, Lucas Selonke. **Estudo da viabilidade de obtenção do metal patente por metalurgia do pó e comparação do desgaste com liga fundida e bronze sinterizado**. 2012. 103 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais – Área: Metais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Joinville, 2013.

- [23] ASM – **Capítulos Binary Phase Diagrams and Ternary Alloy Phase Diagrams**. Volume 3, Alloy Phase Diagrams, de ASM Handbook. United States of America: ASM International, 1992.
- [24] BERGSON E SON. **Metal antifriccion para cojinetes**. Paul Bergson & Son S/A, Grostrup, Dinamarca, 3ª Ed. 1969.
- [25] ZHANG, H.; ZHANG, D. Y.; HUA, M.; DONG, G. N., **A Study on the Tribological Behavior of Surface Texturing on Babbitt Alloy under Mixed or Starved Lubrication**. Tribol Lett, v. 56, p. 305-315, 2014.
- [26] DEAN, R. R.; EVANS, C. J.; **Plain bearing materials**. Tribology International, p. 101-108, 1976.
- [27] MARINHA DO BRASIL. **Arsenal de Marinha do Rio de Janeiro – uma pequena história**. Edição 1999. Rio de Janeiro: Arsenal de marinha do Rio de Janeiro. Assessoria de Comunicação Social, 1999. 40p.
- [28] TELLES, Pedro Carlos da Silva. **História da Construção Naval no Brasil**. Rio de Janeiro: LAMN, FEMAR, 2001.
- [29] HERNÁNDEZ, A. A.; POTHEKIN, B., A.; CASTELLANOS, L., M.; KHRISTOLYUBOV, A., S. **“Propiedades especiales del babbitt b-83, obtenido por el método de fundición turbulento”** 9th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, Medellín, Colombia, 2011.
- [30] METALS HANDBOOK: **Casting**, volume 15, ASM International, 9 ed, 1998.
- [31] ALONSO, Oscar Schutze. **Tratado Prático de Moldeo y Fundición**. 3. ed. Barcelona: Editorial Gustavo Gili, 1972. 192 p.
- [32] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6892-1: Materiais metálicos - Ensaio de Tração - Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. São Paulo, 2013.
- [33] IPTRLM - **Tabela de valores de ensaios metalográficos**,
<https://www.iptrlm.com.br/acos-pp> acessado em 20 de agosto de 2018
- [34] CALLISTER, William D., RETHWISCH, David G – **Materials Science and Engineering: an Introduction**; tradução SOARES, S. M. S.; revisão técnica

ALMEIDA, J. R. M. – **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução** - Rio de Janeiro, 2013 – LTC

- [35] FONSECA, Maurílio Magalhães. **Arte Naval**. 7. ed. Rio de Janeiro: Serviço de Documentação da Marinha, 2005. 902 p. 2 v.
- [36] NAVSEA TECHNICAL MANUALS. **Instructions Nr 0901-430-0002**: Manual for bearings and shaft line. Department of the Navy – TDMIS. Port Hueneme, 2000.
- [37] SHACKELFORD, James F.; **Ciências dos Materiais**; 6ª Ed.; Pearson, São Paulo, 2014.
- [38] STACHOVIK, G.W. and BATCHELOR, A .W., **Engineering Tribology**, 4th Ed., EUA 2013: Butterworth Heinemann.
- [39] SINN-WEN Chen et al, **Phase equilibria of Sn–Sb–Cu system**, Materials Chemistry and Physics, vol 132 Elsevier, 2012 p. 703-715
- [40] <https://www.zollern.com/br/mancais.html> acessado em 18 de outubro de 2018
- [41] METSA – **Equipamento de fundição centrífuga**, <http://metsaindustrial.com.br/fund1.html> acessado em 18 de outubro de 2018
- [42] IGUS – **Buchas de polímero autolubrificantes**, <http://www.igus.com.br> acessado em 19 de outubro de 2018
- [43] COMPWORKS – **Mancais**, <http://www.compworksmancais.com.br/produtos.php> acessado em 30 de outubro de 2018
- [44] JAHROMI, S. A. J.; GOUDARZI, M. M.; NAZARBOLAND, A. **Failure analysis of GE-F9 gas turbine journal bearings**. Dept. of materials science and engineering, Shiraz University. Iranian Journal of Science & Technology, Transaction B, Engineering, Vol. 32, No. B1, pp 61-66, 2008.
- [45] SOLUÇÕES INDUSTRIAIS – Fornos de fundição de alumínio, <https://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/instrumentacao/auricar-industria/produtos/metais/empresas-de-fundicao-de-aluminio-em-sp> acessado em 30 de outubro de 2018.

ANEXOS

ANEXO 1 - Certificado de qualidade do material novo.

CERTIFICADO DE GARANTIA E QUALIDADE														
RELATÓRIO PARA CLIENTE														
CLIENTE: CALINOX AÇOS E METAIS LTDA												PEDIDO: 42		
MERCADORIA SOLICITADA: METAL PATENTE												N. FISCAL: 3340		
Especificação	Pb%	Sb%	Cd%	S%	Ag%	As%	Se%	Ni%	Bi%	Cu%	Fe%	P%	Sn%	Zn%
Mínimo														
Máximo														
N.º da análise	Pb%	Sb%	Cd%	S%	Ag%	As%	Se%	Ni%	Bi%	Cu%	Fe%	P%	Sn%	Zn%
4.254/2016	0,117	7,409	0,002			0,001	0,002	0,001	0,002	3,361	0,001	0,001	89,102	0,001
Nº de Lote														
4.218/2016														
MATERIAL :														
METAL PATENTE														
88 a 90% SN - 7 a 8% SB - 3 a 4% CU - 0,35% PB max														
4 CAIXA / 115 KGS LIQ.														
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div> <p>27 setembro, 2016</p> <p>Date</p> </div> <div style="text-align: right;">  <p>RESPONSÁVEL DEPTO. TÉCNICO</p> </div> </div>														

ANEXO 2 - Certificado de qualidade do pó estanhante utilizado na confecção dos mancais.

CERTIFICADO DE QUALIDADE		
Nº de Lote: 4.219/2016 – Nº Análise: 4.255/2016		
CLIENTE: CALINOX AÇOS E METAIS LTDA	DANFE: 0348	
ORDEM DE FABRICAÇÃO:	Nº PEDIDO: 42	
MATERIAL: PÓ ESTANHANTE		
CARACTERÍSTICA FÍSICO/QUÍMICAS		
	CARACTERÍSTICA	DENOMINAÇÃO
TIPO 100%		
	%SOLIDO METALICO	52+/-2
	% ION CLORO	27+/-2
	ASPECTO	PÓ GRANULADO
	COR	CINZA
	PÓ METALICO	ESTANHO
*O Material deve ser acondicionado de forma a não absorver umidade		

ENSAIOS ESPECÍFICOS	
DIADEMA, 27/09/2016	 RESPONSÁVEL

ANEXO 3 - Carta do AMRJ de apresentação de demanda acadêmica.**MARINHA DO BRASIL****ARSENAL DE MARINHA DO RIO DE JANEIRO**

Praça Barão de Ladário, s/nº – Ilha das Cobras – Edifício nº 11 – 2º Andar – Centro

CEP: 20091-000 – Rio de Janeiro – RJ

Tel: (21) 2178-5108 – Fax (21) 2178-6330 – secom@amrj.mar.mil.br

Carta 81 /2016-AMRJ-20
EM/SM/20
022.12.1

Rio de Janeiro, 11 de maio de 2016.

A Sua Senhoria o Senhor

Prof. Dr. Roberto de Oliveira Magnago.

Coordenador do Curso de Mestrado Profissional de Engenharia de Materiais da Universidade

Oswaldo Aranha do Centro Universitário de Volta Redonda

Campus Oezio Galotti - Avenida Paulo Erlei Alves Abrantes, 1325

• Três Poços, Volta Redonda - RJ - Cep: 27240-560

Assunto: Apresentação de Demanda Acadêmica

Senhor Coordenador,

Apresentamos à V.Sa. a demanda de estudo acadêmico deste Arsenal de Marinha, por intermédio da Divisão de Oficinas Mecânicas, relativa à possibilidade de reaproveitamento de Metal Patente (também conhecido por Metal Branco ou Metal Babbitt), o qual é utilizado para confecção de mancais de deslizamento em diversos equipamentos de bordo dos navios da Marinha do Brasil.

Outrossim informo-vos que o mestrando Ednei Duarte Rezende que realizará os estudos em vosso Centro Universitário é Servidor Público Federal neste Arsenal e que disponibilizaremos através dele o material para corpos de provas nas quantidades de 1 kg de Metal Patente ainda não utilizado e 2 kg de Metal Patente destinado para descarte. Autorizamos a publicação dos resultados em canais acadêmicos.

Desde já agradecemos a atenção e desejamos votos de sucesso neste trabalho em conjunto.

Atenciosamente,

SÉRGIO MARTINS DA SILVA

Capitão-de Mar-e-Guerra (EN)

Vice-Diretor Industrial