



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO PAR
LIGA BABBITT – AÇO ABNT 1045 EM FUNÇÃO DA
RUGOSIDADE E DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO

RAFAEL MARTINS RIBEIRO

Belo Horizonte, 2019

RAFAEL MARTINS RIBEIRO

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO PAR
LIGA BABBITT – AÇO ABNT 1045 EM FUNÇÃO DA
RUGOSIDADE E DA ESPESSURA DO REVESTIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Engenharia de Manufatura e Materiais

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara

Belo Horizonte

Escola de Engenharia da UFMG

2019

R484e	<p>Ribeiro, Rafael Martins. Estudo do comportamento tribológico do par liga Babbitt - aço ABNT 1045 em função da rugosidade e da espessura do revestimento [recurso eletrônico] / Rafael Martins Ribeiro. – 2019. 1 recurso online (99 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Marcelo Araújo Câmara.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Anexo: f. 99.</p> <p>Bibliografia: f. 92-98. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Aspereza de superfície - Teses. 3. Revestimentos - Teses. I. Câmara, Marcelo Araújo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 621(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

Av. Antônio Carlos, 6627 - Campus Universitário
31270-901 - Belo Horizonte - MG
Tel.: +55 31 3409.5145
E-mail: cpgmec@demec.ufmg.br

**"ESTUDO DO COMPORTAMENTO TRIBOLÓGICO DO PAR LIGA
BABBITT AÇO ABNT 1045 EM FUNÇÃO DA RUGOSIDADE E DA
ESPESSURA DO REVESTIMENTO"**

RAFAEL MARTINS RIBEIRO

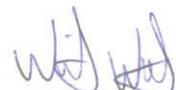
Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de "**Mestre em Engenharia Mecânica**", na área de concentração de "**Engenharia de Manufatura e Materiais**".

Dissertação aprovada no dia 12 de agosto de 2019.

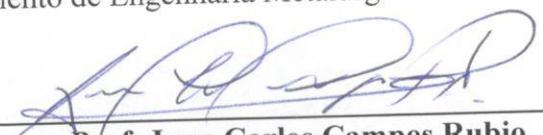
Por:



Prof. Marcelo Araújo Câmara
Orientador - Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG



Prof. Witor Wolf
Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais/UFMG



Prof. Juan Carlos Campos Rubio
Departamento de Engenharia Mecânica/UFMG

Dedico esta obra à minha esposa
Jéssica, aos meus pais Geraldo e Eni,
ao meu irmão Diego e ao meu sobrinho
João Lucas.

AGRADECIMENTOS

A

Universidade Federal de Minas Gerais, seu corpo docente e em especial ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Araújo Câmara pelos ensinamentos, apoio e disponibilidade em todos os momentos;

Ao Centro de Microscopia da Universidade Federal de Minas Gerais pelo fornecimento de equipamento e suporte técnico para experimentos envolvendo microscopia eletrônica e em especial ao Sr. Marcelo Cruz pelo apoio na preparação das amostras e na utilização do MEV;

Aos colegas do programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e em especial aos Srs. Anderson dos Santos, Augusto Moura, Douglas D' Auriol e Vinicius Cangussu;

Ao Instituto Federal de Minas Gerais Campus Ipatinga e aos seus demais servidores.

Meus sinceros agradecimentos.

"Aquele que é mestre na arte de viver faz pouca distinção entre o seu trabalho e o seu tempo livre, entre a sua mente e o seu corpo, entre a sua educação e a sua recreação, entre o seu amor e a sua religião. Distingue uma coisa da outra com dificuldade. Almeja, simplesmente, a excelência em qualquer outra coisa que faça, deixando aos demais a tarefa de decidir se está trabalhando ou se divertindo. Ele acredita que está sempre fazendo as duas coisas ao mesmo tempo"

Domenico de Masi *in* O Ócio Criativo

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	vii
LISTA DE TABELAS	x
LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS	xi
NOMENCLATURA.....	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO.....	17
1.1 Objetivo geral	19
1.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura do trabalho	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Revestimentos tribológicos	20
2.2 Aplicações de Babbitt em mancais.....	21
2.3 Babbitt	23
2.3.1 Composição química.....	25
2.4 Aspectos tribológicos gerais.....	27
2.4.1 Lubrificação	29
2.5 Aspectos tribológicos analisados neste estudo	30
2.5.1 Rugosidade.....	31
2.5.2 Espessura do revestimento.....	35
2.6 Processos de revestimento	37
2.6.1 Aspersão Térmica	39
2.7 Ensaio pino sobre disco	42
2.7.1 Ensaio tribológicos envolvendo Babbitt	44
2.8 Desgaste.....	46
2.8.1 Resultados de desgaste envolvendo Babbitt	48
2.9 Considerações parciais	51
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	55
3.1 Equipamentos	55
3.1.1 Centro de usinagem CNC	55
3.1.2 Tribômetro	56
3.1.3 Durômetro e microdurômetro	56
3.1.4 Microscópio eletrônico de varredura	57
3.1.5 Rugosímetro e perfilômetro 3D	58
3.2 Materiais e métodos.....	58
3.2.1 Preparação dos pinos e dos corpos de prova.....	58
3.2.2 Parâmetros do ensaio de pino sobre disco	62

3.2.3	Avaliação de dureza e microdureza	63
3.2.4	Perfilometria e análise por microscopia eletrônica de varredura.....	64
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	66
4.1	Caracterização do material	66
4.2	Coefficiente de atrito	73
4.3	Avaliação do desgaste	78
4.4	Discussão.....	87
5	CONCLUSÃO.....	89
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
	REFERÊNCIAS	92
	ANEXO A	99

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – Microestrutura de um Babbitt à base de estanho	18
FIGURA 2.1 – Construção típica de um mancal radial com casquilho revestido.....	22
FIGURA 2.2 – Diagrama ternário Sn-Pb-Sb.....	24
FIGURA 2.3 – Microestrutura de um Babbitt B83 com destaque para as fases intermetálicas SnSb e Cu ₃ Sn.....	29
FIGURA 2.4 – Coeficiente de atrito X espessura de revestimento de um aço deslizando contra uma superfície de aço ferramenta revestida com uma película de metal índio	31
FIGURA 2.5 – Regimes de lubrificação, desgaste e coeficiente de atrito no deslizamento lubrificado de metais, em função da relação entre a espessura do filme e a rugosidade da superfície	33
FIGURA 2.6 – Influência da rugosidade na curva de Stribeck analisada pelo Log de H (número de Hersey) X coeficiente de atrito.....	35
FIGURA 2.7 – Relação entre a resistência à fadiga e a espessura de revestimento de uma liga Babbitt depositada sobre um substrato de aço.....	36
FIGURA 2.8 – Microestrutura do Babbitt ASTM B23 3 solidificado em a: molde permanente em água; b: molde permanente ao ar; c: molde de areia verde; d: no forno.....	38
FIGURA 2.9 – Microestrutura do Babbitt ASTM B23 3 aquecido a 220 °C por a: 6 horas; b: 12 horas; c: 18 horas	38
FIGURA 2.10 – Desenho esquemático do processo de aspensão térmica.....	40
FIGURA 2.11 – Revestimentos depositados pelo processo ASP (a) e FS (b)	41
FIGURA 2.12 – Desenho esquemático da seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente	42
FIGURA 2.13 – Desenho esquemático de um sistema de ensaio de pino sobre disco	43
FIGURA 2.14 – Perda de massa X distância deslizada (Babbitt ASTM B23 3; carga normal: 14 N; rotação: 250 rpm).....	48
FIGURA 2.15 – Taxa de desgaste de um Babbitt: fundido (1); pressurizado na fase de cristalização (2) e que sofreu forjamento líquido (3)	49
FIGURA 2.16 – Superfícies desgastadas de um Babbitt: fundido (a); pressurizado na fase de cristalização (b) e que sofreu forjamento líquido (c).....	50

FIGURA 2.17 – Perda de massa X distância deslizada (Babbitt ASTM B23 2 e 3; rotação: 250 rpm)	50
FIGURA 2.18 – Superfícies desgastadas das amostras da liga ASTM B23 2 com rotação de 250 rpm: (a) 28 N, (b) 14 N e (c) 7 N (à esquerda) e da liga ASTM B23 3 com rotação de 250 rpm: (a) 28 N, (b) 14 N e (c) 7 N (à direita)	51
FIGURA 3.1 – Centro de usinagem ROMI Discovery 560.	55
FIGURA 3.2 – Tribômetro microtest MT/60/NI.....	56
FIGURA 3.3 – Microdurômetro Mitutoyo MVK-H1.	57
FIGURA 3.4 – Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6360LV.....	57
FIGURA 3.5 – Perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T8000.....	58
FIGURA 3.6 – Pino de aço ABNT 1045.....	59
FIGURA 3.7 – Dimensões da chapa de aço ABNT 1045 revestida com Babbitt.	60
FIGURA 3.8 – Chapa de aço ABNT 1045 revestida com Babbitt após usinagem de acabamento.	60
FIGURA 3.9 – Corpos de prova com espessuras e rugosidades de revestimento desejadas e pinos de topo esférico.	61
FIGURA 3.10 – Amostras embutidas do topo e do perfil.	62
FIGURA 4.1 – Morfologia da liga Babbitt.	67
FIGURA 4.2 – Mapa de EDS do Babbitt com aumento de 300 X.....	68
FIGURA 4.3 – Gráficos de EDS das regiões de 1 a 5 do Babbitt.	68
FIGURA 4.4 – Mapas de EDS dos componentes do Babbitt com aumento de 300 X. a: Alumínio; b: Oxigênio; c: Cobre; d: Chumbo; e: Antimônio; f: Estanho.	70
FIGURA 4.5 – Substrato utilizado para a deposição de Babbitt.	71
FIGURA 4.6 – Interface Babbitt – substrato.....	71
FIGURA 4.7 – Mapas de EDS da interface do revestimento de Babbitt sobre o substrato de aço com aumento de 200 X. a: Alumínio; b: Oxigênio; c: Cobre; d: Chumbo; e: Antimônio; f: Estanho; g: Ferro.	72
FIGURA 4.8 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm.	74
FIGURA 4.9 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm.	74
FIGURA 4.10 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17$ mm.	75

FIGURA 4.11 – Influência da modificação da rugosidade no coeficiente de atrito de todos ensaios de pino sobre disco.	75
FIGURA 4.12 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os menores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.	76
FIGURA 4.13 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os valores intermediários de rugosidade Ra na faixa estudada.	77
FIGURA 4.14 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os maiores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.	77
FIGURA 4.15 – Influência da modificação da espessura do revestimento no coeficiente de atrito de todos ensaios de pino sobre disco.	78
FIGURA 4.16 – Medição de largura de uma das pistas de desgaste dos ensaios pino sobre disco.	79
FIGURA 4.17 – Mapeamento perfilométrico de um pino de aço.	79
FIGURA 4.18 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm.	80
FIGURA 4.19 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm.	81
FIGURA 4.20 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,07$ mm.	81
FIGURA 4.21 – Influência da modificação da rugosidade no volume de desgaste por distância deslizada de todos os ensaios de pino sobre disco.	82
FIGURA 4.22 – Pistas de desgaste dos ensaios pino sobre disco com ampliações de 500 X.	83
FIGURA 4.23 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os menores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.	85
FIGURA 4.24 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os valores intermediários de rugosidade Ra na faixa estudada.	86
FIGURA 4.25 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os maiores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.	86
FIGURA 4.26 – Influência da modificação da espessura do revestimento no desgaste de todos ensaios de pino sobre disco.	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – Composições químicas de alguns Babbitts à base de chumbo e de estanho...	23
TABELA 2.2 – Percentual de porosidade em áreas revestidas com Babbitt por diferentes métodos.....	37
TABELA 2.3 – Coeficiente de atrito médio de pares tribológicos.	44
TABELA 3.1 – Composição química do Babbitt MP 85.W01 (%p).	59
TABELA 3.2 – Corpos de prova utilizados nos ensaios pino sobre disco.....	61
TABELA 4.1 – EDS das diferentes áreas de uma determinada região do Babbitt (%p).	69
TABELA 4.2 – Microdureza dos componentes do Babbitt e do aço.	73

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	Instituto Americano do Ferro e do Aço (<i>American Iron and Steel Institute</i>)
ASM	Sociedade Americana de Metais (<i>American Society for Metals</i>)
ASP	Aspersão térmica por arco elétrico (<i>Arc spray process</i>)
ASTM	Sociedade Americana de Testes e Materiais (<i>American Society for Testing and Materials</i>)
BSE	Elétrons retroespalhados (<i>Backscattered electrons</i>)
CFC	Cúbica de face centrada
CNC	Comando numérico computadorizado
CP	Corpo de prova
DEMEC	Departamento de Engenharia Mecânica
DEMET	Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais
EDX ou EDS	Espectroscopia de dispersão de energia por raios-X
ECAP	Prensagem Angular de Canal Igual (<i>Equal Channel Angular Pressing</i>)
FS	Aspersão térmica por chama oxiacetilênica (<i>Flame spray</i>)
H	Número de Hersey
HV	Dureza Vickers
ISO	Organização Internacional de Padronização (<i>International Organization for Standardization</i>)
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MoS ₂	Bissulfeto de molibdênio
PbS	Sulfeto de chumbo
PPGMEC	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
S	Número de Shipper
SAE	Sociedade de engenheiros automotivos (<i>Society of Automotive Engineers</i>)
SE	Elétrons secundários (<i>Secondary electrons</i>)
SnO ₂	Dióxido de estanho

TIG

Soldagem à arco com eletrodo de tungstênio (*Tungsten Inert Gas*)

UFMG

Universidade Federal de Minas Gerais

NOMENCLATURA

Letras Latinas

b_t	Largura da trilha de desgaste [μm]
D	Diâmetro do disco [mm]
d	Diâmetro do topo esférico do pino [mm]
F	Carga aplicada no ensaio de microdureza Vickers [gf]
F_a	Força de atrito [N]
F_N	Força normal [N]
P	Pressão de contato [N]
P_V	Perda volumétrica do disco [mm^3]
R	Raio da pista de desgaste [mm]
R_a	Desvio médio aritmético [μm]
r_p	Raio do topo esférico do pino [mm]
r_t	Raio da trilha de desgaste [mm]

Letras Gregas

μ	Coefficiente de atrito [adimensional]
ν	Viscosidade [cP]
σ_{EC}	Limite de escoamento à compressão [MPa]
τ_c	Resistência ao cisalhamento [MPa]

RESUMO

O Babbitt, também conhecido como metal patente ou metal branco é uma liga macia muito utilizada em mancais de deslizamento que trabalham em contato com aço, e tem como elementos de base estanho ou chumbo, além de compostos intermetálicos formados geralmente por antimônio e cobre. Sua morfologia é variada de acordo com a quantidade de cada elemento presente na composição química da liga e de acordo com o processamento. O presente trabalho buscou avaliar a influência dos parâmetros rugosidade e espessura de um revestimento Babbitt no comportamento tribológico da liga quando em contato com o aço ABNT 1045. Foram realizados ensaios de pino sobre disco, utilizando pinos de aço ABNT 1045 e corpos de prova de aço, também ABNT 1045, revestidos com Babbitt, simulando o contato de um eixo sobre um mancal revestido com Babbitt. A rugosidade e a espessura do revestimento foram variadas em três níveis, com intuito de observar o comportamento em relação ao atrito e ao desgaste com a modificação destas variáveis. Também foi realizada a caracterização do revestimento (liga Babbitt), do substrato e dos corpos de prova ensaiados por meio de ensaios de dureza e microdureza, perfilometria das pistas de desgaste, análise de composição química elementar por microscopia eletrônica de varredura das fases e dos intermetálicos formados, além das pistas ensaiadas. Nos ensaios que utilizaram corpos de prova com as menores rugosidades dentro da faixa analisada, ocorreu um aumento de $0,05 \pm 0,02$ para $0,46 \pm 0,06$ no coeficiente de atrito quando se elevou a espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm para $1,08 \pm 0,17$ mm. O maior coeficiente de atrito foi observado no ensaio do corpo de prova com maior espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm) e menor rugosidade ($0,47 \pm 0,01$ μm), o maior volume de desgaste foi registrado no ensaio com o corpo de prova de maiores espessura de revestimento e rugosidade ($1,08 \pm 0,17$ mm e $1,29 \pm 0,20$ μm , respectivamente) e o menor volume de desgaste e coeficiente de atrito foram obtidos pelo ensaio realizado no corpo de prova com menor rugosidade ($0,43 \pm 0,03$ μm) e espessura de revestimento média ($0,45 \pm 0,07$ mm).

Palavras Chaves: Babbitt, aço ABNT 1045, rugosidade, espessura do revestimento, pino sobre disco

ABSTRACT

Babbitt, also known as patent metal or white metal, is a soft alloy widely used in sliding bearings that work in contact with steel, and has as base elements tin or lead, as well as intermetallic compounds usually formed by antimony and copper. Its morphology is varied according to the amount of each element present in the chemical composition of the alloy and according to the processing. The aim of this work was to evaluate the influence of the parameters roughness and thickness of a Babbitt coating on the tribological behavior of the alloy when in contact with ABNT 1045 steel. Pin-on-disk tests were performed using ABNT 1045 steel pins and Babbitt-coated ABNT 1045 steel test specimens simulating the contact of a shaft on a Babbitt-coated bearing. The roughness and the thickness of the coating were varied in three levels, in order to observe the behavior in relation to the friction and the wear with the modification of these variables. It was also carried out the characterization of the coating (Babbitt alloy), the substrate and the test specimens tested by means of hardness and microhardness tests, profile of wear tracks, elemental chemical composition analysis by scanning electron microscopy of the phases and the intermetallics formed, besides the tracks tested. In the tests that used test specimens with the smallest roughness within the analyzed range, an increase of 0.05 ± 0.02 to 0.46 ± 0.06 in the friction coefficient occurred when the coating thickness was raised from 0.45 ± 0.07 mm for 1.08 ± 0.17 mm. The highest coefficient of friction was observed in the test of the specimen with a higher coating thickness (1.08 ± 0.17 mm) and lower roughness (0.47 ± 0.01 μm), the highest wear volume was recorded in the test with the highest coating thickness and roughness (1.08 ± 0.17 mm and 1.29 ± 0.20 μm , respectively) and the lowest wear volume and friction coefficient were obtained by the test performed in the specimen with the least roughness (0.43 ± 0.03 μm) and medium coating thickness (0.45 ± 0.07 mm).

Key words: *Babbitt, ABNT steel 1045, roughness, coating thickness, pin-on-disk*

1 INTRODUÇÃO

Desenvolver materiais é algo importante para os avanços contínuos em qualquer área tecnológica e em relação às ligas utilizadas em mancais de deslizamento isto não é diferente (KAMAL et al., 2011). Inúmeros equipamentos industriais utilizam mancais revestidos por uma liga conhecida como Babbitt, podendo-se citar compressores, bombas, turbinas, ventiladores, eixos de transmissão, geradores, entre outros (ALESHIN et al., 2016; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014). A vida útil destes mancais depende de ganhos na resistência ao desgaste e confiabilidade dos componentes, para que haja uma redução na demanda de recuperação e fabricação para reposição.

O Babbitt, também conhecido como metal patente ou metal branco, foi patenteado por Isaac Babbitt em 1839, na sua fórmula original composta por 89% Sn, 9% Sb e 2% Cu (CARRETEIRO; BELMIRO, 2006). Hoje, além das ligas à base de estanho (com composições diversas além da original) existem ligas à base de chumbo e ligas à base de estanho e chumbo. As ligas à base de estanho, mesmo sendo mais caras são as mais utilizadas em função das suas características, como: boa resistência à corrosão, fácil ligação, pequena tendência à segregação e alta condutividade térmica (ISHIHARA; TAMURA; GOSHIMA, 2010; LASHIN et al., 2013; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2017a; ZEREN, 2007). Ademais, as ligas à base de estanho também possuem melhor resistência ao desgaste, maior suporte de carga normal e são menos frágeis (LASHIN; MOSSA; KAMAL, 2011).

O Babbitt à base de estanho é uma liga heterogênea composta por uma matriz macia, que é uma solução sólida de antimônio e cobre em estanho, e duas outras fases formadas por compostos intermetálicos mais duros que a matriz (LASHIN et al., 2013; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2017a). Uma destas fases é formada por estanho e antimônio (SnSb), e a outra, que pode variar em formato (estrelas ou agulhas) de acordo com a composição química e a quantidade presente de cada elemento na liga, podem estar presentes, por exemplo, cobre e estanho (CuSn). Na FIG 1.1 pode ser observada a microestrutura típica de um Babbitt à base de estanho na qual α é a matriz de Sn, e β e η são

os intermetálicos SnSb e Cu_3Sn , respectivamente (VALEEVA et al., 2015; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2017b).

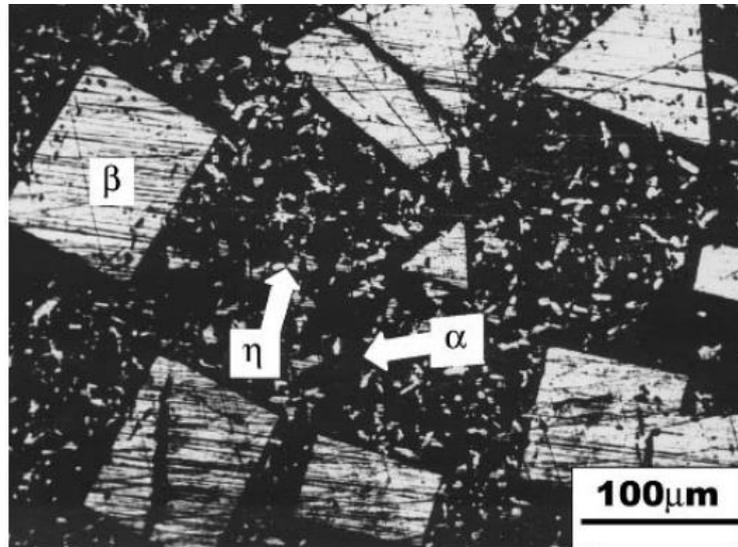


FIGURA 1.1 – Microestrutura de um Babbitt à base de estanho

FONTE – adaptado de SADYKOV et al., 2003

Esta liga é muito utilizada em mancais de deslizamento que trabalham tanto com lubrificação hidrostática quanto com lubrificação hidrodinâmica, de forma que haja uma película de lubrificante com espessura adequada separando o eixo do revestimento do mancal. O intuito é diminuir o coeficiente de atrito (μ), a força de atrito e a taxa de desgaste. Porém, em algumas situações como na partida e na parada de equipamentos, em trabalhos com baixa velocidade ou com alta carga ou em condições impróprias de lubrificação, pode ocorrer lubrificação mista, limítrofe, ou até mesmo deslizamento com atrito à seco, o que é prejudicial tanto para o eixo quanto para o revestimento e ilustra a condição mais severa de trabalho deste material, devendo ser evitada (ISHIHARA; TAMURA; GOSHIMA, 2010; LASHIN et al., 2013; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2017b; ZEREN, 2007).

Diante do exposto se torna atrativo o estudo das variáveis metalúrgicas e tribológicas desta liga, por meio da análise da sua composição química elementar, técnica de revestimento utilizada, parâmetros de acabamento da superfície, entre outros fatores. Para tanto neste estudo foi proposta a avaliação de dois parâmetros de uma liga Babbitt, quais sejam rugosidade e espessura de revestimento, trabalhando em contato com o aço ABNT 1045, de forma a simular o contato existente entre um eixo rotativo e o revestimento de um mancal de deslizamento quando em serviço.

1.1 Objetivo geral

Analisar o comportamento tribológico em relação ao atrito e ao desgaste de um revestimento de Babbitt realizado por aspersão térmica, quando colocado em contato com o aço ABNT 1045 e sendo combinados diferentes valores de rugosidade e espessura do revestimento.

1.2 Objetivos específicos

- Avaliar a variação do coeficiente de atrito em função da modificação dos parâmetros de rugosidade e espessura do revestimento por meio de ensaios de pino sobre disco entre um pino de topo esférico fabricado em aço ABNT 1045 e um disco de aço revestido com Babbitt;
- Mensurar o volume de desgaste por meio da medição da largura das pistas de desgaste e cálculo da perda volumétrica;
- Analisar as imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura para identificar a morfologia da liga utilizada e analisar os possíveis mecanismos de desgaste ocorridos durante os ensaios;

1.3 Estrutura do trabalho

Para que seja possível alcançar os objetivos propostos o trabalho apresenta no capítulo 2 uma revisão bibliográfica sobre o tema, o capítulo 3 indica o procedimento experimental que foi estabelecido para a pesquisa, o capítulo 4 traz os resultados alcançados e uma discussão relativa à análise destes resultados. Posteriormente são apresentadas a conclusão (capítulo 5) e as referências utilizadas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será abordado à teoria relativa às ligas de Babbitt e ao uso de mancais revestidos com estas ligas. Primeiramente serão abordados os revestimentos tribológicos utilizados em mancais de deslizamento; em seguida o revestimento Babbitt será especificamente tratado, bem como a influência de sua composição química, da rugosidade do substrato e do revestimento e da espessura do revestimento, os processos de revestimento normalmente aplicáveis, os ensaios e técnicas de caracterização utilizadas e os mecanismos de desgaste costumeiramente observados no atrito deste tipo de liga.

2.1 Revestimentos tribológicos

A tribologia é uma ciência que estuda o atrito, o desgaste e a lubrificação, por meio da interação das superfícies em movimento relativo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Historicamente já foram utilizados como materiais tribológicos de mancais: o ferro, a madeira e até mesmo tecidos de pele. Porém, com o avanço da ciência surgiram outros materiais, como o latão, o bronze, o alumínio, o zinco e os metais brancos. Nos dias atuais, devido a uma maior evolução tecnológica, existem além destes já citados, mancais sinterizados autolubrificadas (para situações em que a lubrificação contínua é dificultosa), materiais poliméricos (aplicados em indústrias alimentícias, por exemplo), entre outros (ÜNLÜ, 2011).

O atrito pode ser benéfico em valores elevados em algumas situações, como por exemplo, no contato de pastilhas de freio com o disco ou dos pneus de um veículo com o asfalto. Porém, em pares tribológicos utilizados em mancais de deslizamento busca-se reduzi-lo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Os revestimentos utilizados nestes pares são expostos a maiores cargas em suas camadas superficiais, e devido a isto, deve-se buscar um aumento da resistência ao desgaste e redução do coeficiente de atrito na superfície, com o objetivo de garantir uma maior vida útil ao componente (ALESHIN et al., 2016).

Não existe na natureza material que apresente propriedades ideais em todos os aspectos que são benéficos para o seu comportamento tribológico. Por exemplo, um material com alta

dureza na maioria dos casos possui elevada resistência ao desgaste, porém não tem boa capacidade de incorporar partículas desgastadas, isto é um indicativo de que é necessário realizar a associação de materiais com diferentes características e comportamentos mecânicos para propiciar uma estrutura adequada para determinada aplicação (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Deste modo, a formação de uma estrutura homogênea de grãos refinados em conjunto com a presença de partículas de segunda fase adequadamente dispersos na matriz, favorece o surgimento de excelentes propriedades tribológicas, tais como, resistência ao desgaste e menor coeficiente de atrito, o que é benéfico para as ligas não-ferrosas utilizadas em aplicações tribológicas (KORSHUNOV et al., 2009).

Sendo assim, inúmeros materiais que são expostos ao desgaste em mancais de deslizamento, são compostos de fases duras em matriz macia, de maneira que a resposta desse material com relação à resistência ao desgaste é dependente do tamanho da região de fase dura quando comparada ao tamanho da partícula que entra em contato de deslizamento com a mesma. Sabe-se que quando a fase dura se encontra em pequena quantidade e bem dispersa na matriz, tende a elevar a resistência ao escoamento da matriz e logo melhora a resistência da liga ao desgaste por deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Por outro lado, caso exista grande quantidade de partículas duras ou se a interface entre a fase dura e a matriz for fracamente ligada, tende a existir zonas de concentração de tensão que promovem e propagam trincas e acarretam desgastes por fratura. Isso mostra o quão complexo é estudar o comportamento de desgaste de ligas heterogêneas (como o Babbitt) utilizadas em mancais de deslizamento (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.2 Aplicações de Babbitt em mancais

Mancais de deslizamento radiais possuem em sua construção uma parte de aço, ferro fundido ou algum outro material que forneça resistência mecânica e dureza (carcaça), outra parte que servirá como apoio (substrato) e um componente que receberá o contato deslizante e pode ser entre outros materiais o Babbitt (revestimento). O revestimento pode ser aplicado sobre bucha inteiriça ou bipartida, ou ainda revestido diretamente sobre o mancal em aplicações mais pesadas, FIG 2.1.

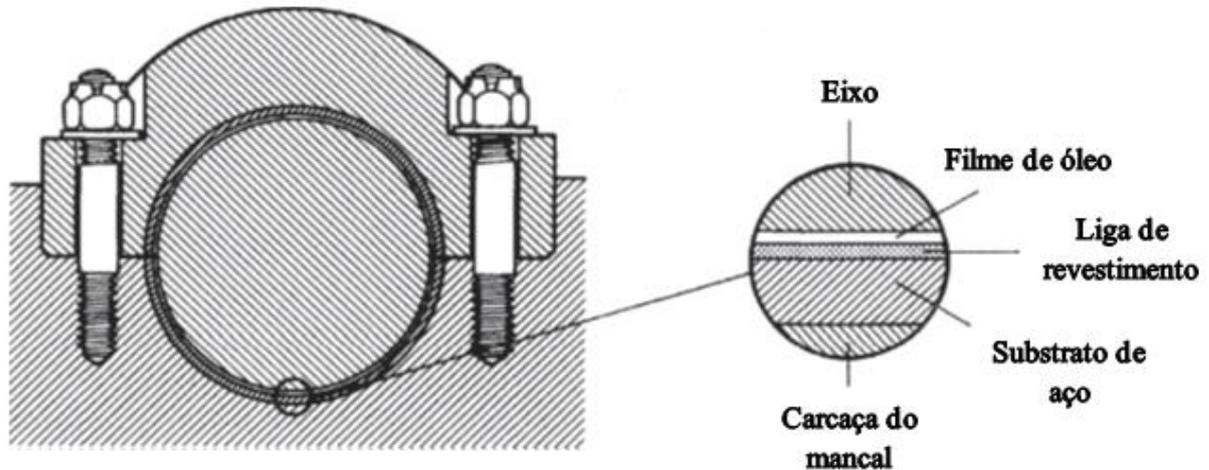


FIGURA 2.1 – Construção típica de um mancal radial com casquilho revestido
 FONTE – Adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017

Inúmeros materiais podem ser utilizados em mancais de deslizamento, destacando-se principalmente àqueles à base de chumbo, estanho ou cobre. Ligas à base de chumbo ou de estanho que podem ser depositadas em filmes muito finos sobre substratos de aço de mancais de deslizamento (Babbitt), permitem a incrustação de pequenas partículas de desgaste geradas durante o contato (NORTON, 2013). Elas são selecionadas para aplicações em mancais em função de suas propriedades antifricção, como prevenção do efeito *seizure* e boa resistência ao desgaste (ÜNLÜ, 2011).

A resistência ao desgaste pode ser considerada a principal propriedade de um material utilizado em mancais de deslizamento (GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009). Mesmo assim geralmente utilizam-se materiais para fabricação de buchas e casquilhos de mancais ou para revesti-los, que possuam menor resistência ao desgaste em relação ao material do eixo. Isto é preferível pois promove economia, uma vez que o eixo normalmente é o elemento mais caro entre os dois (ÜNLÜ, 2011).

Babbitts à base de chumbo, TAB 2.1, não são tão utilizados atualmente principalmente por razões ambientais. Eles possuem na maioria de suas composições, além de chumbo, estanho, antimônio e arsênio (que fortalece a liga principalmente em altas temperaturas), sendo formada uma matriz de chumbo, antimônio e estanho que incorpora cubos de SnSb. Eles são menos susceptíveis à fadiga térmica e mecânica em relação aos Babbitts à base de estanho, porém têm menor resistência à corrosão (EKLUND, 2013; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

TABELA 2.1 – Composições químicas de alguns Babbitts à base de chumbo e de estanho.

Liga	Estanho (%)	Antimônio (%)	Cobre (%)	Arsênio (%)	Chumbo (%)
SAE 11	Restante	6 a 7,5	5 a 6,5	-	0,5
SAE 12	Restante	7 a 8	3 a 4,5	-	0,5
SAE 13	6	10	Máximo 0,50	0,25	Restante
SAE 14	10	15	Máximo 0,50	0,60	Restante

FONTE – Adaptado de CHIAVERINI, 1986a

O estanho também é muito utilizado na fabricação de ligas anti-atrito que revestem mancais (ABD EL-SALAM; NADA; ABD EL-KHALEK, 2007). Ligas Babbitt à base de estanho apesar de possuírem baixa resistência à fadiga são consideradas a melhor escolha para altas velocidades e baixas cargas, e também para mancais de difícil lubrificação. Além disso, possuem uma relativamente superior resistência à corrosão quando comparadas às ligas à base de chumbo, em função das agulhas de cobre-estanho presentes em sua microestrutura (CHIAVERINI, 1986a; ZEREN, 2007).

2.3 Babbitt

A estrutura detalhada mais comumente observada em uma liga Babbitt à base de estanho consiste em uma matriz macia que é uma solução sólida de antimônio e cobre em estanho (α), grandes cubos duros da fase β (solução sólida baseada no composto intermetálico SnSb e que exerce grande influência nas propriedades mecânicas da liga, como tensão de escoamento e de ruptura) e cristais dispersos do composto Cu_3Sn (fase η) (KORSHUNOV et al., 2009). Também é possível, dependendo da quantidade de cada elemento na liga, que seja formado o composto intermetálico Cu_6Sn_5 (fase ϵ), além de outros muito menos notados principalmente em Babbitts com alto teor de estanho, como o $\text{Cu}_{31}\text{Sn}_8$ (fase γ), Sn_3Sb_2 e o Cu_2Sb . Todos os compostos intermetálicos citados são mais duros que a matriz e por isso, geralmente as fraturas observadas nos compostos são frágeis e na matriz são falhas dúcteis (DONG et al., 2018; KORSHUNOV et al., 2009; SADYKOV et al., 2003). Um diagrama ternário dos elementos Sn-Pb-Sb é exibido na FIG 2.2, no qual é possível observar algumas indicações de uso de ligas Babbitt de acordo com a proporção presente de cada elemento.

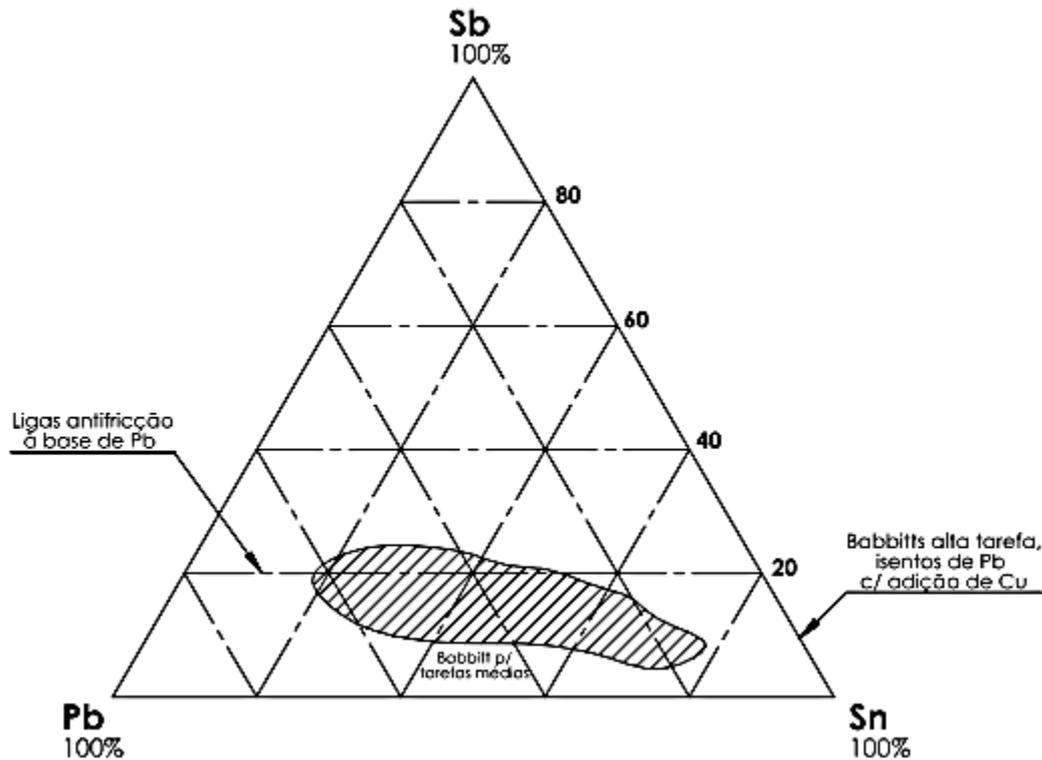


FIGURA 2.2 – Diagrama ternário Sn-Pb-Sb

FONTE – adaptado de DUARTE JR, 2005

A dispersão das partículas de segunda fase que são formadas durante o resfriamento do Babbitt é o principal mecanismo de aumento de resistência mecânica e de dureza do revestimento (e conseqüentemente aumento da resistência ao desgaste). Esta liga possui baixa temperatura de recristalização, ou seja, elas tendem a se recuperar do trabalho à frio em temperaturas muito próximas a temperatura ambiente (por isso não encruam nesta temperatura). Caso uma liga de metal branco seja trabalhada à frio em um valor acima de 20 %, ela sofrerá recristalização à temperatura ambiente e conseqüentemente perderá resistência mecânica e dureza, além de elevar a sua ductilidade devido a diminuição da densidade das suas discordâncias, redução de suas fases cristalinas e eliminação das tensões residuais (CHIAVERINI, 1986a; GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009; RODRIGUES, 2009; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014).

As propriedades almejadas em uma matriz macia de um material utilizado em mancal são alta compatibilidade entre seus componentes formadores, boa capacidade de incorporação de partículas de desgaste e boa conformabilidade. Por outro lado, precipitados endurecidos conferem características também benéficas como, maior dureza e boa resistência à carga normal compressiva e à fadiga (GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009). O

Babbitt combina as características descritas, além de possuir baixo ponto de fusão, alta condutividade térmica e boa conformabilidade, sendo assim muito utilizado em mancais de deslizamento (ZHANG et al., 2016). Ademais, as ligas de metal branco geralmente são selecionadas preferencialmente como materiais de mancais deslizantes porque além de apresentar uma alta capacidade de incorporação de partículas geradas no atrito (o que reduz o desgaste do eixo), elas são incompatíveis metalurgicamente com o material de fabricação de eixos rotativos, que geralmente são de aço com baixo teor de carbono (ZEREN et. al., 2007; NORTON, 2013). Isto é benéfico, pois metais dissimilares tendem a ter menor adesão no contato entre suas asperezas quando comparado com metais similares (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

A compatibilidade metalúrgica é um fator a ser observado na definição de materiais que trabalharão em contato, de forma que materiais compatíveis ou idênticos não devem trabalhar em conjunto no atrito à seco. Deve-se sempre procurar a combinação de materiais incompatíveis ou parcialmente incompatíveis (NORTON, 2013) e ligas formadas por Sn-Sb-Cu são altamente indicadas para trabalhar em contato com o aço (VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014).

2.3.1 Composição química

O estanho é um metal prateado extraído da natureza há cerca de 5000 anos e é obtido principalmente do minério cassiterita ou dióxido de estanho (SnO_2). Ele possui ponto de fusão de 232 °C, peso específico de 7,3 g/cm³ e estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado, quando no estado de estanho branco (estável acima de 13,2 °C). Em ambientes com temperaturas muito baixas, ele tende a se transformar no seu alótropo conhecido como estanho cinza, que pode ter desintegração lenta. O estanho é um material macio, dúctil e maleável, com baixa resistência mecânica e boa resistência à corrosão. Por sua vez, o chumbo tem estrutura cristalina cúbica de face centrada (CFC) possui densidade de 11,34 g/cm³ a uma temperatura de 20 °C e tem ponto de fusão de 327 °C. O chumbo também é muito maleável e possui baixa resistência mecânica, e é um dos metais mais antigos conhecido pelo homem, sendo obtido principalmente do minério galena (PbS). Estes dois materiais são os principais componentes de base do Babbitt (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016; CHIAVERINI, 1986b; RODRIGUES, 2009).

Apesar de o estanho propiciar um coeficiente de atrito relativamente baixo quando em contato com outros materiais, ele é naturalmente considerado um material pouco resistente e devido a isto é utilizado em conjunto com o cobre e o antimônio para aumentar a sua dureza e resistência à tração e fadiga. Uma vez que uma liga quase sempre possuirá maior resistência mecânica e dureza em relação a um material puro (CALLISTER JR; RETHWISCH, 2016; KAMAL et al., 2011).

O cobre muitas vezes é adicionado ao Babbitt para formar um composto duro e altamente benéfico para o serviço dos mancais de deslizamento (Cu_6Sn_5 ou Cu_3Sn). Desta forma ele evita as segregações provocadas pela diferença de densidade promovida pelo composto SnSb. O aumento da quantidade de antimônio em uma liga Babbitt à base de estanho promove a elevação do limite de escoamento e de resistência à compressão, da dureza e conseqüentemente do ponto de fusão da mesma (ABD EL-SALAM; NADA; ABD EL-KHALEK, 2007; ASTM, 2000; ÜNLÜ, 2011).

Adições de chumbo acima de 0,5 % devem ser evitadas em Babbitts a base de estanho com o intuito de não haver a formação do eutético chumbo-estanho que possui baixo ponto de fusão (183 °C). Caso ele esteja presente em valores superiores a 3,5 % da composição, ele propicia o desgaste praticamente imediato do mancal ao ser colocado em trabalho (CARRETEIRO; MOURA, 1998; HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Carreteiro; Moura (1998), afirmam também que caso o estanho esteja presente em uma proporção maior que 11 % da composição química de uma liga Babbitt à base de chumbo (estas geralmente contém de 71 a 85 % deste elemento), poderá ocorrer o mesmo problema que o excesso de chumbo promove nos Babbitts a base de estanho. Entretanto em Babbitts à base de estanho e chumbo formam-se as duas fases de maneira independente, de maneira que ocorra pequena solubilidade de estanho em chumbo e de chumbo em estanho sem provocar problemas (KAMAL et al., 2011).

O comportamento em serviço do Babbitt é fortemente dependente da sua composição química e da sua estrutura (SADYKOV et al., 2003). Ele exhibe variação microestrutural, de acordo com a quantidade presente de cada elemento. Por exemplo, ligas à base de estanho formadas por uma faixa de 3 a 8 % de Cu e de 5 a 8 % de Sb constituem-se de uma matriz de solução sólida que possui constituintes no formato de agulhas distribuídos uniformemente na matriz (constituente rico em cobre e que forma o composto Cu_6Sn_5) e de partículas finas e arredondadas do precipitado SnSb. Quanto maior o teor de cobre na liga, maior a proporção

do constituinte rico em cobre, por outro lado quanto maior a quantidade de Sb, maior a tendência a formação do composto SnSb no formato cúbico e maior a quantidade de Cu na matriz de estanho (tendendo a não formar o composto Cu_6Sn_5) (GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014).

A baixa resistência à fadiga dos Babbitts à base de estanho é considerada a principal desvantagem da liga. Ela ocorre devido a presença de grandes partículas intermetálicas de SnSb que possuem ângulos muito agudos e agem como concentradores de tensão, além de serem muito heterogêneos graças a grande segregação de fases que ocorre durante a sua solidificação e resfriamento (KALASHNIKOV et al., 2016). Outra desvantagem do Babbitt à base de estanho é a sua relativamente pequena ductilidade (cerca de 6% de alongamento máximo) que prejudica o seu comportamento tribológico (SADYKOV et al., 2003).

2.4 Aspectos tribológicos gerais

Materiais indicados para aplicações tribológicas são muito utilizados em mancais de deslizamento, devido principalmente a sua grande capacidade de incorporação e a sua grande resistência ao desgaste (ÜNLÜ, 2011). Uma liga contendo estanho e antimônio juntamente a uma pequena quantidade de cobre e chumbo (Babbitt) é indicada para uma série de aplicações, devido as suas excelentes propriedades de atrito, a uma resistência à corrosão razoavelmente boa e ao seu baixo custo. Esta liga combina boa capacidade de carga, baixo desgaste, bom comportamento no *running-in* e trabalha bem em situações emergenciais, como ausência da quantidade adequada de lubrificante (KAMAL et al., 2011).

Running-in, *breaking-in* e *wearing-in* são exemplos de transições tribológicas que promovem modificações no comportamento do atrito em função do tempo, da distância ou do número de ciclos em um ensaio tribológico. Eles podem ocorrer com ou sem a utilização de lubrificante e promovem modificações na força de atrito (como flutuações, por exemplo), e no tempo para atingir o estado de estabilização no ensaio. Porém, nem todos os materiais apresentam um tempo elevado para a estabilização (BLAU, 2008).

Estruturas de ligas com boas propriedades anti-fricção normalmente constituem-se de uma base macia que se deforma plasticamente com certa facilidade (promovendo o efeito de incorporação de partículas de desgaste), e inclusões de partículas duras e grandes de segunda

fase que devem agir como um esqueleto de alta resistência que eleva a resistência ao desgaste e favorece a redução do coeficiente de atrito (KORSHUNOV et al., 2009). Porém, no caso dos Babbitts, isto não é uma informação totalmente válida. Objetivando-se alcançar melhores propriedades tribológicas nesta liga, é preferível um refinamento das partículas duras e grosseiras das fases intermetálicas e refinamento geral da estrutura, pois tende a reduzir a taxa de desgaste da liga e a torna mais homogênea e melhor distribuída (KORSHUNOV et al., 2009). Isto ocorre porque caso as partículas intermetálicas da liga estejam dispostas em tamanhos muito acentuados, há o aumento da fragilidade e conseqüentemente do desgaste (ALESHIN et al., 2016).

Uma liga Babbitt B83 muito heterogênea e com grandes cristais de SnSb, teve comprometida as suas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste (KOBELEVA et al., 2016). Foi possível para Barykin; Fazlyakhmetov; Valeeva (2006), produzir uma estrutura com grãos finos e dispersos na matriz por meio de um tratamento de deformação térmica, que promoveu o refinamento das partículas da fase β . Amanov et al. (2016), relatam que alcançaram um aumento na resistência ao desgaste de uma liga Babbitt com a diminuição do tamanho dos grãos da fase β , composta por SnSb.

Os grãos da fase SnSb devem estar bem dispersos e uniformes na fase macia de estanho, pois caso contrário, promovem grandes inclusões e agem como concentradores de tensão e fontes de ocorrência de trincas quando submetidos a pequenas cargas (KOBELEVA et al., 2016). Kalashnikov et al. (2016) encontraram grandes inclusões de antimônio e cobre em estanho, que tenderam a atuar como fontes de micro e macrotrincas em uma liga Babbitt B83. Este tipo de inclusão é responsável por promover baixa resistência à fadiga e moderada resistência ao desgaste do Babbitt, o que encurta a vida útil do revestimento (KOBELEVA et al., 2016).

Kalashnikov et al. (2016), sugeriram a produção de compostos heterogêneos de um Babbitt fundido à base de estanho e materiais endurecidos dispersos na matriz macia. Essa associação de materiais tem por objetivo relacionar os pontos positivos de cada um deles, promovendo o aumento da resistência à fadiga da liga sem causar prejuízos às outras propriedades. Processando uma liga Babbitt por prensagem à quente (metalurgia do pó), foi possível reduzir o tamanho dos intermetálicos SnSb em uma faixa de 30 a 50 %, conforme FIG 2.3.

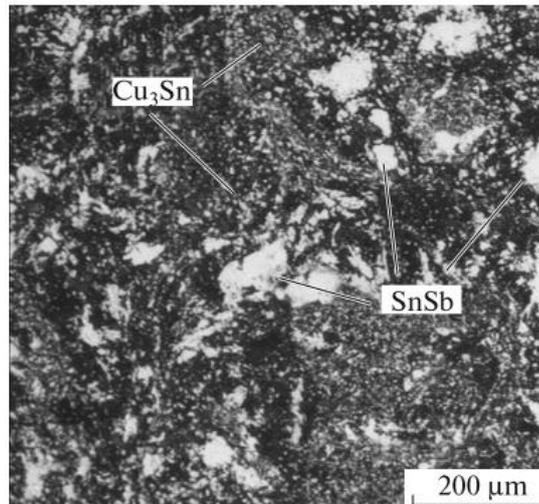


FIGURA 2.3 – Microestrutura de um Babbitt B83 com destaque para as fases intermetálicas SnSb e Cu_3Sn

FONTE – adaptado de KALASHNIKOV et al., 2016

A adição de nanotubos de carbono também possibilitou o aumento da resistência ao desgaste e redução do coeficiente de atrito de ligas Babbitt. Isto foi possível graças à restrição do crescimento da fase intermetálica (ALESHIN et al., 2016).

2.4.1 Lubrificação

As lubrificações hidrodinâmica, hidrostática e a elasto-hidrodinâmica são conhecidas como lubrificação de filme completo por promover a separação total das superfícies por um filme de lubrificante. Desta forma, permite baixos desgaste e coeficiente de atrito, porém sem conseguir evitar possíveis falhas por fadiga. Enquanto a lubrificação limítrofe ocorre quando existe o contato físico entre as partes, acarretando grande desgaste abrasivo ou adesivo. Ela pode existir por motivos diferentes, tais como: carga excessiva, baixa velocidade, ausência de quantidade de lubrificante adequada, geometria ou rugosidade da superfície inadequadas, entre outros. A lubrificação mista, por sua vez, é um regime de transição da lubrificação de filme completo para a lubrificação limítrofe, que ocorre conforme se aumenta a carga ou há a redução da velocidade. Nela existe contato de asperezas em alguns momentos e em outros não (NORTON, 2013; EKLUND, 2013; WILLIAMS, 2005).

Todos os regimes de lubrificação ocorrem nos mancais durante a parada, a partida ou o funcionamento dos equipamentos, de maneira que quanto maior a velocidade de deslizamento, maior a tendência à formação de um regime de lubrificação hidrodinâmica e consequentemente maior a redução do coeficiente de atrito. Isto ocorre até certo valor de

velocidade, a partir desta, caso seja elevada ainda mais, existe a tendência de aumento do atrito devido à perda de viscosidade do lubrificante cisalhado em função do aumento de temperatura (NORTON, 2013).

Zhang et al. (2016), produziram superfícies texturizadas com o objetivo de melhorar a lubrificação hidrodinâmica do mancal, através do fornecimento de abundantes reservatórios de óleo. O Babbitt de grau B83 (10–12%p Sb; 5,5–6.5%p Cu, restante Sn) foi submetido à deformação plástica severa por um processo conhecido como ECAP (*Equal Channel Angular Pressing*) e exibiu melhorias em suas propriedades tribológicas devido a uma ação auto lubrificante propiciada por uma maior porosidade na superfície deformada, que ocorre em função da fragmentação acelerada das partículas intermetálicas SnSb e Cu₃Sn (KORSHUNOV et al., 2009).

A alta temperatura é uma das principais causas de falha nos mancais revestidos com Babbitt, e o uso de lubrificante reduz a temperatura local do contato. Além disso, diminui a deformação plástica e a transferência metálica por adesão, ou seja, ele atua controlando o atrito e minimizando o desgaste (WU et al., 2011; KLAAS, 2013).

2.5 Aspectos tribológicos analisados neste estudo

É necessário em qualquer aplicação de revestimento se atentar a três parâmetros principais para se garantir uma excelente qualidade final do serviço. Sendo elas, a rugosidade do revestimento, a espessura da camada depositada e a diluição do material depositado no metal de base (KEJELIN et al., 2010; ZEEMANN, 2003). O estudo da rugosidade e da espessura de revestimento de camadas de Babbitt é importante para diversas aplicações industriais, e por isso serão destacadas (NEVEZHIN et al., 2012).

De uma maneira geral, pode-se dizer com relação às duas variáveis estudadas neste trabalho que, caso a espessura do revestimento apresente valores muito baixos, ela tende a não conseguir evitar o contato entre as asperezas do substrato e do material colocado em contato com o revestimento, promovendo a elevação do valor do coeficiente de atrito. Caso ocorra o contrário, que é a utilização de um revestimento com uma espessura muito elevada, também deve acontecer o aumento do coeficiente de atrito. Isto se dá porque o material do revestimento começa a ser solicitado para auxiliar no suporte da carga normal, sendo que ele

não possui resistência mecânica suficiente para esta aplicação, FIG 2.4 (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

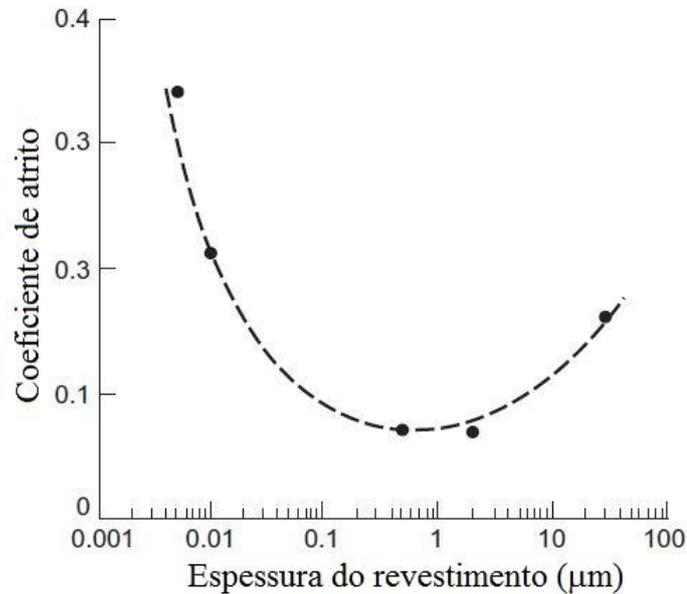


FIGURA 2.4 – Coeficiente de atrito X espessura de revestimento de um aço deslizando contra uma superfície de aço ferramenta revestida com uma película de metal índio

FONTE – adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017

A rugosidade geralmente segue a mesma tendência. Em valores muito baixos provoca a elevação do coeficiente de atrito, devido a forte influência da adesão que ocorre em função de uma grande área real de contato, e quando aparece em valores muito altos também provoca um alto coeficiente de atrito, devido à ocorrência de deformação plástica severa dos picos e desgaste abrasivo (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

2.5.1 Rugosidade

O perfil de rugosidade é a parte de caracterização superficial mais bem definida e devido a isto a norma NBR ISO 4287, especifica termos, definições e parâmetros para determiná-la por meio do levantamento do perfil superficial (ABNT, 2002). Desta forma, a rugosidade é um parâmetro importante a ser avaliado quando se trata de materiais para serem utilizados em eixos e mancais de deslizamento. Ela pode ser definida como as irregularidades de pequena escala de uma superfície e tanto a rugosidade do eixo deve possuir valores adequados para se evitar o desgaste do mancal, quanto a do substrato e do revestimento do mancal. Para eixos que trabalham em contato com mancais revestidos com Babbitt, é indicada uma rugosidade

Ra variando entre 0,25 e 0,30 μm (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017; LASHIN et al., 2013; NORTON, 2013).

O substrato deve possuir uma rugosidade adequada, com o intuito de permitir uma melhor aderência e evitar o desprendimento do revestimento. Por isso valores de rugosidade variados são aplicados de acordo com o processo de revestimento selecionado, o material utilizado e a carga que será imposta em trabalho. Normalmente a rugosidade Ra indicada para o substrato da maioria das aplicações de revestimentos por aspensão térmica, por exemplo, é de 2,5 a 13 μm , e a aderência tende a aumentar com o aumento da rugosidade (MARQUES, 1985). Alcover Junior et. al (2016), utilizaram chapas de 10 mm de espessura, 100 mm de comprimento e 40 mm de largura de aço ABNT 1045 como substrato para a deposição de Babbitt ASTM B23-2. As chapas foram submetidas previamente a um jateamento abrasivo e adquiriram uma rugosidade Ra variando entre 6 e 10 μm para garantir a boa ancoragem da liga depositada. Após a deposição da liga, seccionou-se a chapa em diversos corpos de prova de 40 x 40 mm e a rugosidade do Babbitt foi preparada com 0,5 μm Ra, para ensaios tribológicos de pino sobre disco.

O revestimento também deve ter ajustado o seu valor de rugosidade, pois influencia diretamente no comportamento tribológico dos materiais em contato. Tanto a geometria quanto as dimensões dos picos interferem no desempenho dos mancais. Superfícies muito rugosas, por exemplo, podem perder capacidade de carga (SEP et al., 2017). LASHIN et al. (2013) e CHIAVERINI (1986a), por sua vez, consideram um revestimento cuja superfície tenha menor rugosidade como melhor para aplicações em mancais, pois a penetração e remoção de partículas tende a ser menor. Porém, para NORTON (2013) e HUTCHINGS; SHIPWAY (2017), a rugosidade provoca um aumento da taxa de desgaste e do coeficiente e da força de atrito quando aparece com valores muito baixos ou muito altos, exigindo assim que se busque um valor intermediário aceitável de acordo com os parâmetros de carga normal e velocidade de deslizamento utilizados.

O grau de rugosidade oriundo do processo de fabricação ou processamento influencia no tipo e na intensidade de desgaste que o elemento sofrerá em serviço (NORTON, 2013). Existem exemplos de aplicações de texturas superfícies com micro-sulcos, que propiciaram a melhora das propriedades de pares tribológicos, através da redução do desgaste adesivo e do atrito estático, além de promover o aumento da capacidade de carga do mancal. Zhang et al. (2016),

utilizaram uma liga Babbitt com $0,2 \mu\text{m}$ de rugosidade R_a , dureza de 70 HV e variou os parâmetros da largura e profundidade dos micro-sulcos e densidade de área para alcançar estes resultados.

Verificou-se a influência da rugosidade no desgaste de mancais de deslizamento por meio de simulações computacionais. O resultado evidenciou uma melhor resistência ao desgaste em superfícies mais rugosas, em função da remoção das partículas de desgaste das zonas de contato, porém, estes exibiram menor capacidade de carga. A texturização das superfícies atua de forma benéfica reduzindo o coeficiente de atrito, pois cria protuberâncias precisas na superfície, e os seus vales servem como um depósito de detritos de desgaste e evita que estes ou contaminantes atuem como um terceiro corpo nas zonas de contato das superfícies, ou estes vales podem se tornar uma espécie de reservatório que facilita a geração de pressão hidrodinâmica e formação de um filme de óleo (AMANOV et al., 2016; SEP et al., 2017).

Segundo Lundberg (1995) *apud* Eklund (2013), a lubrificação em qualquer dos regimes depende muito mais da rugosidade das superfícies do que propriamente da viscosidade ou da resistência ao cisalhamento do lubrificante utilizado, para modificar o desgaste ou coeficiente de atrito do contato. Hutchings; Shipway (2017), exibem uma relação do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste com a rugosidade e a espessura do filme de lubrificante formado em um contato de deslizamento metálico lubrificado, FIG 2.5.

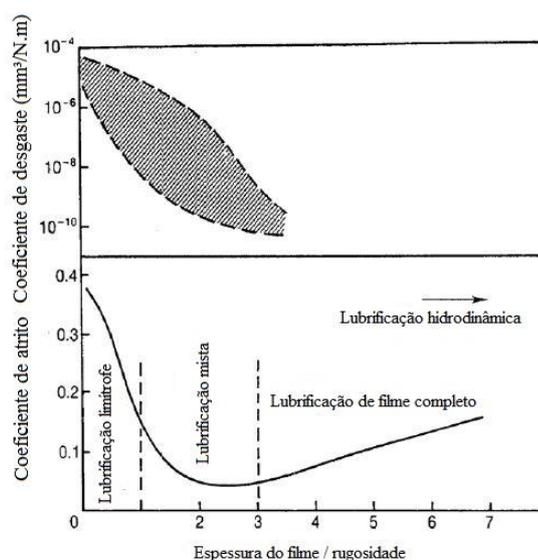


FIGURA 2.5 – Regimes de lubrificação, desgaste e coeficiente de atrito no deslizamento lubrificado de metais, em função da relação entre a espessura do filme e a rugosidade da superfície

FONTE – adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017

É possível perceber que tanto com o aumento da espessura do filme lubrificante quanto com a redução da rugosidade existe uma tendência inicial de redução do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, além de uma transição no tipo de lubrificação, passando de limítrofe para mista e tendendo a um regime hidrodinâmico. Há uma elevação posterior no coeficiente de atrito caso a rugosidade reduza ainda mais ou a espessura do filme continue sendo aumentada, possivelmente em função de uma grande adesão em virtude da baixíssima rugosidade da superfície (que tende a aumentar muito a área real de contato) e da grande espessura do filme lubrificante (maior influência da viscosidade).

De acordo com a curva de Stribeck o coeficiente de atrito apresenta uma variação conforme são modificadas a pressão de contato, a velocidade e a viscosidade do lubrificante. Esta curva tem comportamentos diferentes quando modificada a rugosidade da superfície de contato, de acordo com a equação que determina o número de Shipper, EQ (2.1), na qual S é o número de Shipper, ν é a viscosidade, v é a velocidade, P é a pressão de contato e R é a rugosidade superficial (EKLUND, 2013).

$$S = \frac{\nu \cdot v}{P \cdot R} \quad (2.1)$$

Observa-se que em altos valores de rugosidade existe a tendência de contato entre as asperezas dos corpos atritados. Portanto há necessidade de se elevar a velocidade ou reduzir a pressão de contato para se obter um menor coeficiente de atrito em função da modificação do regime de lubrificação, passando de limítrofe para misto ou de misto para de filme completo. É sugerido que existe uma diferença de valores de coeficiente de atrito para uma mesma carga, velocidade e viscosidade do lubrificante quando se varia a rugosidade no regime de lubrificação misto, FIG 2.6.

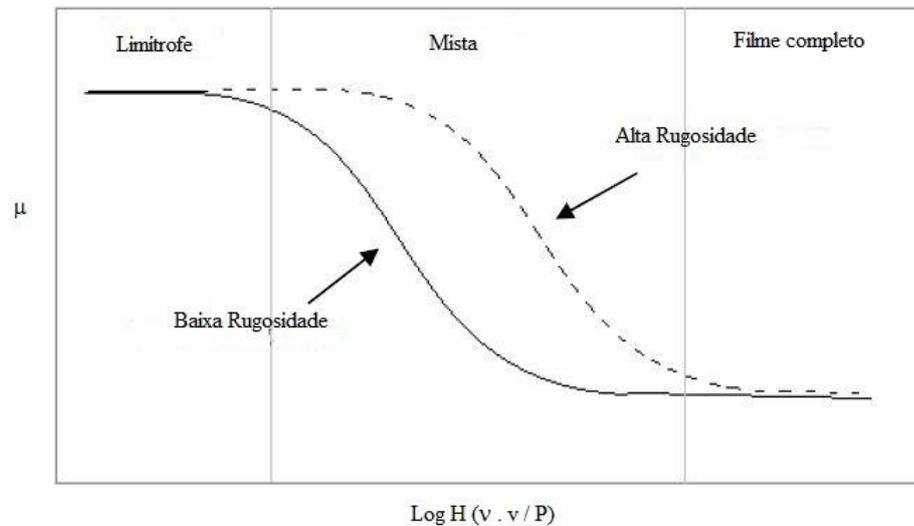


FIGURA 2.6 – Influência da rugosidade na curva de Stribeck analisada pelo Log de H (número de Hersey) X coeficiente de atrito

FONTE – adaptado de EKLUND, 2013

2.5.2 Espessura do revestimento

Na maioria das aplicações o Babbitt é depositado sobre um substrato de aço que auxilia no suporte da carga normal que incide sobre o mancal. Por isso deve-se estabelecer uma espessura adequada para a aplicação do revestimento de forma que não sejam utilizados valores muito altos ou muito baixos.

Aplicações de Babbitt com espessuras de revestimento superiores a 0,40 mm que suportam trabalhar com pressões de contato de até 35 kgf/cm² e com velocidades de deslizamento que atingem cerca de 2,5 m/s já foram realizadas (CARRETEIRO; MOURA, 1998). Também foram observados revestimentos com valores de espessura mais baixos, variando de 0,05 a 0,13 mm, potencializando o suporte de carga do mancal (VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014). Em outras situações em que se utilizaram camadas revestidas com Babbitt com espessuras inferiores a 0,75 mm e com partículas intermetálicas refinadas proporcionaram uma excelente resistência à fadiga e à fratura frágil na superfície destes materiais quando em operação. Isto contribuiu de forma considerável na vida útil dos mancais deslizantes revestidos por esta liga (KORSHUNOV et al., 2009).

O uso de revestimentos de Babbitt tem a sua espessura limitada pelo valor de carga incidente, uma vez que para aplicações mais exigentes utiliza-se revestimentos mais finos da liga

aplicada sobre substrato mais resistente (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Almeida (2014), afirma que camadas de Babbitt com espessuras inferiores a 0,1 mm de espessura possibilitam uma vida útil consideravelmente maior ao componente, pois promovem grande resistência à fadiga e a compressão. Porém, quanto mais fina se torna a película de revestimento aplicada, menor a capacidade da liga de suportar desalinhamento do eixo e o contato com partículas abrasivas, e de acomodá-las. Sendo nestes casos indicado o uso de materiais de maior resistência (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Os Babbitts à base de chumbo apresentam desempenho semelhante aos Babbitts à base de estanho em pequenas espessuras de revestimento, porém em revestimentos mais espessos os Babbitts à base de estanho se mostram melhores para serem aplicados. Camadas finas de Babbitt embora não apresentem boa capacidade de incorporação de partículas duras em relação à buchas espessas do mesmo material, apresentam melhor resistência à fadiga. As camadas mais espessas de revestimento tendem a trincar com mais facilidade e a liberar pequenas partículas conforme ocorre o esforço cíclico (ALMEIDA, 2014; NORTON, 2013). Os Babbitts possuem limitada resistência à fadiga e por isso existe a preocupação pelo fato de serem muito utilizados em cargas cíclicas. A sua resistência é muito mais dependente da espessura de material depositado sobre um substrato do que propriamente da sua composição química, FIG 2.7.

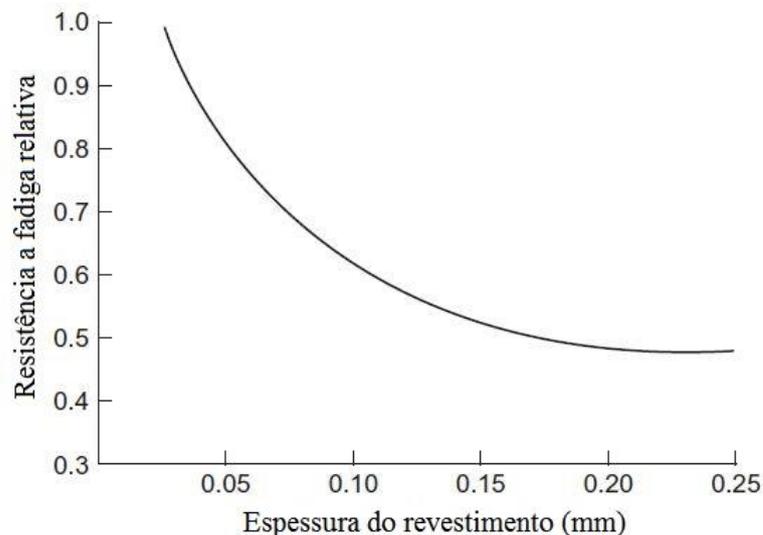


FIGURA 2.7 – Relação entre a resistência à fadiga e a espessura de revestimento de uma liga Babbitt depositada sobre um substrato de aço

FONTE – adaptado de HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017

Ji; Chen (2016), encontraram profundidades de desgaste de 70 e 200 μm em ensaios de deslizamento realizados com Babbitt. Estes são valores que podem ultrapassar determinadas espessuras de revestimento utilizadas e provocar o contato entre o eixo e o substrato do mancal, de maneira a potencializar o desgaste. Desta forma este é outro fator a ser considerado para se evitar o uso de revestimentos extremamente finos.

2.6 Processos de revestimento

Os principais processos utilizados para deposição de Babbitt são a fundição convencional, a fundição centrífuga e a aspersão térmica. A microestrutura formada e a porosidade da liga são fortemente influenciadas pelas variáveis adotadas nos processos (ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015; ÜNLÜ, 2011). A TAB 2.2 compara o percentual de porosidade mensurado em corpos de prova revestidos por alguns processos (ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015).

TABELA 2.2 – Percentual de porosidade em áreas revestidas com Babbitt por diferentes métodos.

Processo de Revestimento	Aspersão térmica à arco elétrico	Aspersão térmica à chama	Fundição por gravidade	Fundição por centrifugação
Porosidade (%)	$3,8 \pm 0,9$	$2,3 \pm 0,7$	$2,1 \pm 0,2$	$< 1,0$

FONTE – Adaptado de ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015

Goudarzi; Jahromi; Nazarboland (2009), verificaram a influência na microestrutura e na dureza de um Babbitt à base de estanho, através da variação da taxa de solidificação e do aquecimento em fundição. Eles puderam perceber que houve a supressão da formação de cubos do composto intermetálico SnSb e aumento da dureza, com o aumento da velocidade de resfriamento. Também notaram um maior arredondamento dos cantos dos precipitados em maiores temperaturas (menor tendência à ocorrência de desgaste por fadiga). Pode ser observado na FIG 2.8 a diferença verificada em quatro diferentes combinações para o resfriamento da liga ASTM B23 3. É perceptível que à medida que se aumentou a taxa de solidificação, a microestrutura tendeu a ser mais refinada (a figura ‘a’ é a maior taxa de solidificação e a ‘d’ a menor).

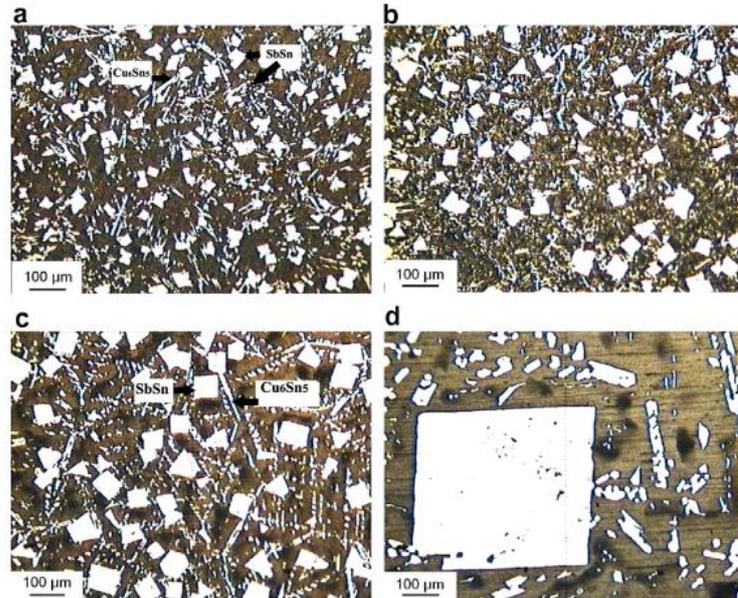


FIGURA 2.8 – Microestrutura do Babbitt ASTM B23 3 solidificado em a: molde permanente em água; b: molde permanente ao ar; c: molde de areia verde; d: no forno

FONTE – adaptado de GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009

A FIG 2.9 exibe que com o aumento do tempo de aquecimento as bordas dos precipitados tenderam a ficar mais arredondadas devido à busca natural por uma menor energia de superfície.

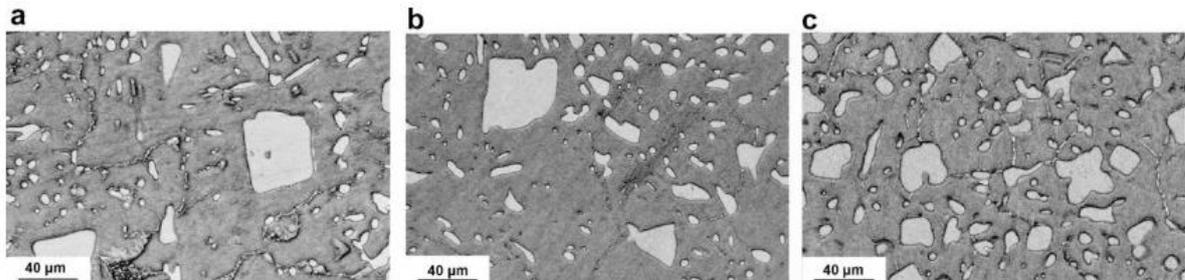


FIGURA 2.9 – Microestrutura do Babbitt ASTM B23 3 aquecido a 220 °C por a: 6 horas; b: 12 horas; c: 18 horas

FONTE – adaptado de GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009

Também foi possível produzir uma estrutura com grãos finos da fase cúbica SnSb por meio de um processo conhecido como forjamento líquido. Neste processo realiza-se a prensagem da liga fundida no momento da cristalização (surgimento dos núcleos de crescimento das células cristalinas), produzindo uma estrutura altamente homogênea e resistente ao desgaste (CHIAVERINI, 1978; VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014).

Ligas de metal branco obtidas por meio de metalurgia do pó, fundição e deposição receberam em experimentos recentes a adição de nanotubos de carbono com o intuito de melhoria de suas propriedades tribológicas (ALESHIN et al., 2016). A utilização de metalurgia do pó para fabricar ligas de Babbitt visa aumentar a vida útil dos mancais a partir da maior porosidade promovida que tende a agir como um reservatório natural de óleo, diferentemente das ligas fundidas que tendem a expulsar o óleo após o desligamento do equipamento e por isso podem elevar o desgaste na partida de equipamentos (KLAAS, 2013).

2.6.1 Aspersão Térmica

A aspersão térmica ou metalização pode ser definida como um grupo de processos que permite que metais, óxidos, compostos intermetálicos, cerâmicos ou polímeros sejam depositados em estado fundido ou semi-fundido sobre uma superfície previamente preparada por limpeza química ou jateamento com granalha de aço angular para promover uma alta rugosidade e conseqüentemente boa ancoragem e ligação mecânica. Esta superfície pode ser posteriormente usinada ou retificada para garantir o acabamento da peça (EUTECTIC CASTOLIN, 2017; MARQUES, 1985).

As primeiras aplicações de aspersão térmica foram realizadas em 1880, porém com um processo que difere muito daqueles que são utilizados nos dias de hoje (MANG et al., 2011). As suas aplicações são diversas, podendo-se citar sistemas de proteção contra corrosão, aplicações eletrônicas, recuperação dimensional, melhoria na resistência ao desgaste, entre outros (KEJELIN et al., 2010).

Com a aspersão é possível depositar revestimentos em vários tipos de substratos, sendo estes revestimentos metálicos ou não. O material de adição pode ser fornecido em forma de arame ou pó, ele é fundido por uma fonte de calor de origem elétrica ou química e impulsionado em direção ao substrato por ar comprimido ou outro tipo de gás. Desta forma, o metal de adição se adere às irregularidades superficiais por mecanismos de origem mecânica, químico-metalúrgica ou física, de acordo com os parâmetros utilizados (MARQUES, 1985). As partículas se achatam quando se chocam com a superfície a ser depositada e forma uma estrutura com aspecto lamelar, as partículas posteriores se aderem às partículas depositadas anteriormente (CHIAVERINI, 1978), conforme FIG 2.10. Pode ser necessária uma posterior

refusão do revestimento para mitigação de poros e óxidos presentes na estrutura lamelar formada (ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015).

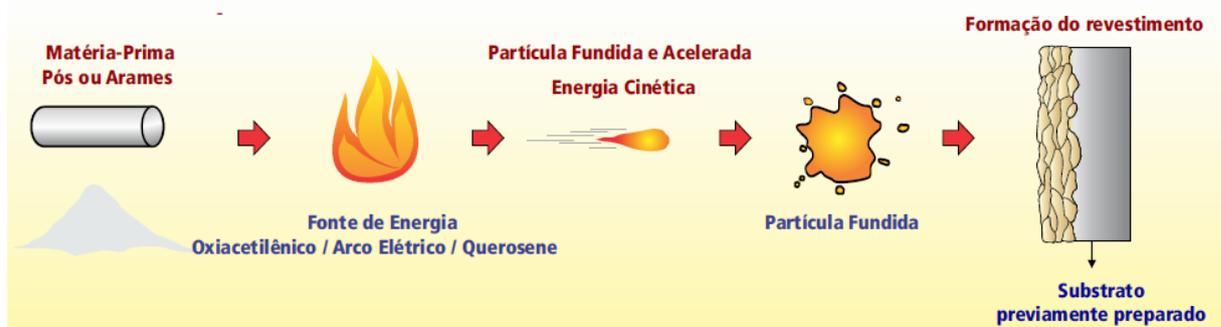


FIGURA 2.10 – Desenho esquemático do processo de aspersão térmica

FONTE - EUTECTIC CASTOLIN, 2017

As principais variáveis envolvidas na técnica de aspersão são a temperatura, a pressão, a distância entre o substrato e a pistola de aplicação, a velocidade das partículas aspergidas, o ângulo formado entre a pistola e o substrato e a rugosidade do substrato (VILLA et al. 2012 *apud* VALE JÚNIOR,2016).

A aspersão térmica vem sendo altamente utilizada na recuperação de mancais de deslizamento, em alternância aos métodos convencionais de deposição de Babbitt, em função de sua alta produtividade, fácil operação, elevada aderência e baixa tensão residual, tendo como limitação apenas a espessura a ser depositada sob o risco de elevar a presença de óxidos e poros (ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015).

Uma liga Babbitt obtida por processos de aspersão térmica, principalmente o processo FS (*flame spray*), quando submetida a um deslizamento apresentou menor desgaste em relação à mesma liga produzida por métodos convencionais de metalização (fundição centrífuga e por gravidade). Este ganho se deu devido à obtenção de uma estrutura mais refinada que foi alcançada em função de uma menor porosidade e das altas taxas de resfriamento envolvidas no processo de aspersão (ALCOVER JUNIOR et al., 2016). O Babbitt formado a partir do processo de aspersão térmica promove modificações micro estruturais e diminuição das fases intermetálicas, o que possibilita uma redução das taxas de desgaste quando comparadas as ligas Babbitt produzidas por fundição (ÜNLÜ, 2011).

Alcover Junior; Pukasiewicz (2015), desenvolveram um trabalho no qual foi depositado o Babbitt ASTM B23-2 por meio de aspersão térmica por arco elétrico - ASP (*arc spray process*) e por chama oxiacetilênica - FS (*flame spray*). Foram comparadas as microestruturas e propriedades mecânicas com aquelas obtidas nos processos convencionais, com o intuito de se verificar a influência do processo de revestimento em relação às propriedades da liga revestida. Notou-se que com o processo FS foi alcançada uma menor porosidade e melhores propriedades tribológicas, enquanto as amostras obtidas pelo processo ASP apresentaram maior dureza (possivelmente devido a sua maior taxa de resfriamento e maior formação de óxidos), FIG 2.11. As amostras fundidas exibiram dureza ainda maior, devido a maior quantidade de precipitados formados e a menor porosidade.

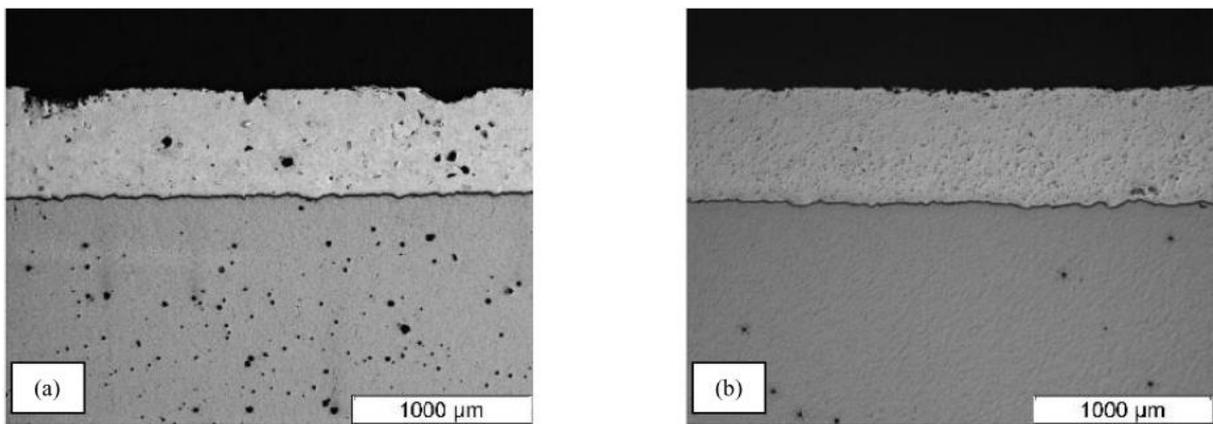


FIGURA 2.11 – Revestimentos depositados pelo processo ASP (a) e FS (b)

FONTE – Adaptado de ALCOVER JUNIOR; PUKASIEWICZ, 2015

Uma grande vantagem dos processos ASP e FS é o fato de se tratarem de processos à frio, de forma que a peça não sofra aquecimento exagerado e consiga conservar as suas características metalúrgicas e não apresente distorções (EUTECTIC CASTOLIN, 2017). Outra característica que pode ser considerada vantajosa quando utilizada de forma controlada em algumas situações é a presença de poros nas superfícies obtidas por meio de aspersão, e que utilizam óleo como lubrificante. Pois, eles tendem a facilitar o armazenamento de óleo e reduzir o desgaste (NEVEZHIN et al., 2012). Os poros sempre estão presentes em revestimentos por aspersão devido ao fato da aplicação ser realizada a distância e com isso conduz quantidade de ar significativa juntamente ao material aspergido, porém deve-se evitar que a quantidade destes ultrapasse um valor de 20 %, pois isto pode reduzir a resistência mecânica da liga (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017).

Portanto, embora não exista diluição no processo de aspersão térmica devido a não fusão do substrato e haja teoricamente a manutenção da composição química do revestimento, é importante controlar a porosidade, a oxidação e a falta de aderência ao substrato para evitar problemas como a presença de concentradores de tensão e a redução da coesão das camadas (KEJELIN et al., 2010). Um desenho esquemático da seção transversal de um revestimento aspergido termicamente pode ser visualizado na FIG 2.12.

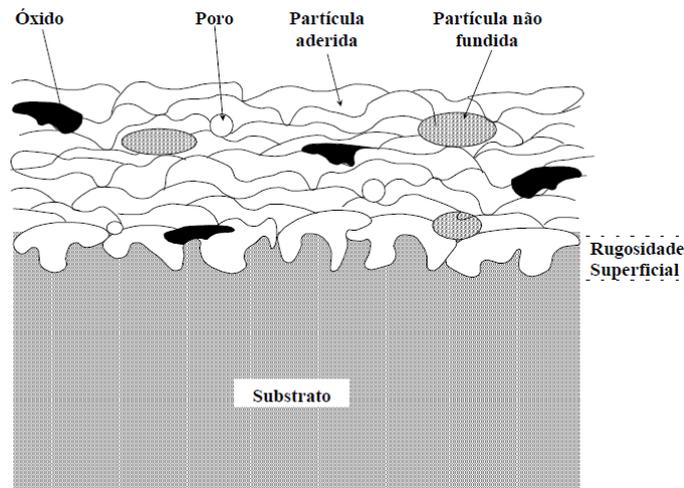


FIGURA 2.12 – Desenho esquemático da seção transversal típica de um revestimento aspergido termicamente

FONTE – MARQUES, 1985

2.7 Ensaio pino sobre disco

O ensaio de pino sobre disco é realizado em laboratório e tem a finalidade de observar o comportamento de desgaste de pares de materiais quando submetidos ao deslizamento mútuo, possibilitando determinar entre outros o coeficiente de atrito deste par de materiais em determinada condição. Neste ensaio o pino é atritado sobre o disco por certa distância e em uma determinada rotação e carga promovendo sobre a superfície do disco uma pista circular de desgaste, conforme FIG 2.13. Na qual F é a força normal, d é o diâmetro do topo esférico do pino, D é o diâmetro do disco, R é o raio da pista de desgaste e W é a velocidade de rotação do disco (ASTM, 2010).

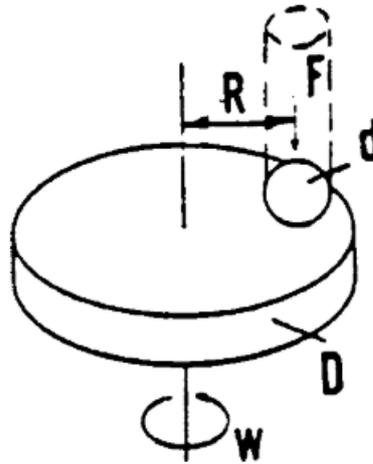


FIGURA 2.13 – Desenho esquemático de um sistema de ensaio de pino sobre disco

FONTE - ASTM, 2010

Pode-se estimar o coeficiente de atrito através de cálculos teóricos que se baseiam no princípio de atrito proposto por Coulomb, EQ (2.2). No qual μ é o coeficiente de atrito, F_a é a força de atrito, e F_N é a força normal aplicada (NORTON, 2013).

$$\mu = \frac{F_a}{F_N} \quad (2.2)$$

Esta equação também pode ser reescrita em função da resistência ao cisalhamento do material menos resistente do par tribológico (τ_c) sobre o limite de escoamento à compressão (σ_{EC}), que é um valor 3 vezes menor que a resistência a penetração de um material obtida em ensaios de dureza, EQ (2.3). O uso de lubrificante contribui para a redução do fator localizado no dividendo da equação e conseqüentemente reduz o coeficiente de atrito (NORTON, 2013).

$$\mu = \frac{\tau_c}{3\sigma_{EC}} \quad (2.3)$$

A TAB 2.3 mostra a comparação de alguns valores de coeficiente de atrito estáticos e dinâmicos de pares de materiais ensaiados sob as mesmas condições variando-se apenas o uso ou não de lubrificante.

TABELA 2.3 – Coeficiente de atrito médio de pares tribológicos.

1º Material	2º Material	Estático à seco	Estático e lubrificado	Dinâmico à seco	Dinâmico e lubrificado
Aço baixo carbono	Aço baixo carbono	0,74	0,18	0,57	0,09
Aço alto carbono	Aço alto carbono	0,78	0,17	0,42	0,11
Aço alto carbono	Babbitt	0,56	0,17	0,34	0,11

FONTE – Adaptado de NORTON, 2013

2.7.1 Ensaio tribológicos envolvendo Babbitt

Wu et al. (2011), realizaram ensaios de pino de bronze-alumínio com 5 mm de diâmetro e 5 mm de comprimento sobre disco de Babbitt à base de chumbo (B16) preparados com rugosidade Ra de 0,2 a 0,3 μm , com 24 mm de diâmetro e 8 mm de espessura. Foram variadas a velocidade (de 0,017 a 0,083 m/s) e a carga (de 10 a 120 N). Percebeu-se a diminuição do coeficiente de atrito com o aumento da velocidade de deslizamento e da carga até o valor de 30 N, e sua estabilização com a continuidade do aumento de carga. A taxa de desgaste também reduziu com o aumento da velocidade de deslizamento, porém elevou-se com o aumento da carga.

Zhang et al. (2016), realizaram ensaios tribológicos de esfera sobre disco com o uso de lubrificante e observaram a redução do coeficiente de atrito com a presença de textura superficial. Os ensaios foram conduzidos com esferas de 2 mm de diâmetro, dureza 40 HRC e rugosidade de superfície Ra = 0,02 μm . Foi utilizada uma pressão de contato de 5 MPa e velocidade de deslizamento variando entre 0,2 e 0,8 m/s.

Zeren et al. (2007), encontraram um aumento do coeficiente de atrito com o aumento da carga normal em um ensaio envolvendo Babbitt. Ishihara; Tamura; Goshima (2010), notaram um aumento da taxa de desgaste com o aumento da carga normal compressiva e também um

aumento do desgaste com a utilização de uma liga Babbitt contendo acima de 18 % de antimônio (entre 5 e 18% de adição do componente, não houve influência no desgaste).

Ji; Chen (2016), verificaram uma taxa de desgaste de $7,6 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{N.m}$ em um ensaio envolvendo o contato deslizante de uma esfera de aço contra Babbitt a uma velocidade de deslizamento de 0,5 m/s. Enquanto Zeren et. al. (2007), verificaram a perda de massa em função da distância deslizada e encontraram o valor de $4,28 \times 10^{-5} \text{ g/m}$, quando aplicada uma carga de 115 N em um corpo de prova de Babbitt.

Ünlü (2011), verificou o coeficiente de atrito e as perdas de massa oriundas do desgaste em um ensaio utilizando lubrificante para engrenagens, óleo SAE 90. Os parâmetros adotados foram carga de 20 N, velocidade de deslizamento de 0,785 m/s e 1500 rpm. Os ensaios realizados com Babbitt à base de estanho e contendo também chumbo, cobre e antimônio mostraram a importância destes elementos combinados quando se comparou os seus resultados com os resultados dos ensaios realizados sobre estanho, chumbo e cobre puros atritando contra aço. O coeficiente de atrito e a taxa de desgaste foram bem maiores quando se utilizou os elementos puros, conforme o que é descrito por CALLISTER JR; RETHWISCH (2016), que afirmam que uma liga sempre será mais dura em relação ao material puro, e, portanto, tenderá a um menor desgaste.

Klass (2013), realizou ensaios de pino sobre disco em Babbitts fabricados por metalurgia do pó utilizando um lubrificante Renolin DTA 10. Os pinos utilizados eram fabricados do aço AISI 52100 e foram aplicados os seguintes parâmetros nos ensaios: carga normal de 5 N; velocidade de deslizamento de 0,1 m/s; distância de deslizamento de 500 m e raio de pista de 5 mm. O seu objetivo era comparar a resistência ao desgaste do Babbitt fabricado por sinterização (metalurgia do pó) com o Babbitt produzido por um método convencional (fundição por gravidade) e com outra liga utilizada em mancais (bronze).

Alcover Junior et al. (2016), por sua vez, realizaram ensaios de esfera sobre disco com um tribômetro do fabricante CSM modelo TRB. Foi atritada uma liga Babbitt obtida por diferentes processamentos com uma esfera de alumina de 6 mm de diâmetro em duas trilhas de desgaste com 7 e 14 mm de raio, por uma distância de 100 m, em uma velocidade de 0,1 m/s e carga normal de 5 N. Observou-se que as amostras aspergidas termicamente exibiram menor desgaste e menor deformação plástica em relação as amostras fundidas por gravidade.

2.8 Desgaste

O desgaste é uma forma física de degradação, pois é a remoção por meios mecânicos de um material de sua superfície. Ele é considerado um modo final de falha que ocorrerá com todos os materiais e que pode ser provocado por movimentos de rolamento e/ou de deslizamento, sendo um termo bem amplo que envolve inúmeros tipos de danos distintos que modificam a superfície da peça desgastada e provoca a perda de material destas. Pode-se afirmar que é impossível o desenvolvimento de um projeto livre de falhas por desgaste, porém deve-se trabalhar para adiá-lo o máximo possível, pois em pequena quantidade ele já pode ter grande influência sobre um sistema. Fatores como dureza e resistência mecânica influenciam em muitas situações de forma diretamente proporcional na resistência ao desgaste (SHACKELFORD, 2008; NORTON, 2013).

Hutchings; Shipway (2017), afirmam que o desgaste geralmente se caracteriza por uma perda progressiva de material e sempre causará dano de pelo menos uma das superfícies que estiverem em contato relativo mútuo. Após o seu início, ele pode levar a outros problemas como o surgimento de vibração, perda de precisão dimensional e aumento de carga, o que o potencializa ainda mais o problema e pode levar o componente a falhas de outros tipos, como fadiga, por exemplo. A sua quantidade está atrelada em qualquer situação a fatores como carga aplicada, velocidade de rotação ou deslizamento, distância percorrida, características ambientais e da máquina, propriedades do material, entre outros (ASTM, 2010). Diversos estudos são desenvolvidos para se aperfeiçoar o comportamento de materiais utilizados em mancais com relação ao desgaste, pois, a resistência ao desgaste é uma das principais propriedades de um tribosistema (ÜNLÜ, 2011).

A microestrutura de um material desempenha um papel fundamental em seu aumento de resistência ao desgaste e nos mecanismos de desgaste que poderão vir a ocorrer (AMANOV et al., 2016). É necessário combinar, por exemplo, altas dureza e tenacidade com um baixo coeficiente de atrito para que um material tenha boa resistência ao desgaste adesivo, pois, quanto maior a dureza mais difícil é a penetração de qualquer corpo em um material. Aumentando-se a tenacidade, o material resiste mais ao arrancamento de partículas e melhorando o seu acabamento superficial, menor é a quantidade de protuberâncias para serem removidas. Porém é praticamente impossível obter uma liga que combine estas três

propriedades simultaneamente, e por isso busca-se a melhor relação entre elas (CHIAVERINI, 1986a; BRANDI, 2004).

Existem diversas teorias divergentes em relação aos chamados mecanismos de desgaste. Embora ainda se tenha muitas lacunas relativas ao conhecimento destes, a maioria dos pesquisadores desta área dividem o desgaste em cinco categorias: desgaste por adesão, por abrasão e por fadiga superficial (são frequentemente observadas em ensaios tribológicos controlados e serão um pouco mais detalhados), além de desgaste por erosão e por corrosão. Também existem casos que misturam mais de um tipo de mecanismo de desgaste simultaneamente (NORTON, 2013). Um estudo exibiu um desgaste simultâneo por abrasão e por fadiga que ocorreu devido ao acúmulo de defeitos na superfície de contato de uma bucha e de um eixo (BARYKIN; SADYKOV; ASLANIAN, 2000).

O desgaste adesivo é observado no contato entre superfícies limpas e pressionadas uma contra a outra devido às forças de atração entre os átomos superficiais dos dois materiais, que tenderão a aderir às asperezas em contato e à medida que ocorra um deslizamento entre as partes, poderá ocorrer transferência de um dos corpos para o outro, ou até mesmo a remoção de material e a permanência deste como um terceiro corpo de desgaste, podendo causar riscos e sulcos em ambas as peças (*escoring* ou *scuffing*) (NORTON, 2013). Normalmente quando ocorre transferência no desgaste adesivo, esta se dá do corpo mais fraco e macio para o de maior dureza e resistência mecânica (ALMEIDA, 2014).

Por sua vez o desgaste abrasivo ocorre normalmente no contato deslizante entre uma superfície rugosa e dura sobre uma superfície menos rugosa, no qual são produzidos diversos sulcos no material liso e há a formação de partículas de desgaste. Por fim o desgaste devido à fadiga superficial é visto no deslizamento repetitivo sobre a mesma trilha de desgaste cujo acúmulo de trincas superficiais ou subsuperficiais conduzem ao rompimento da superfície (SHACKELFORD, 2008).

Os desgastes ocasionados por abrasão e fadiga produzem flocos do material e são considerados mecanismos de desgaste de origem mecânica, enquanto os desgastes por aderência geram partículas grosseiras e são nomeados mecanismos de desgaste moleculares (KALASHNIKOV et al., 2018).

Normalmente, em superfícies produzidas por processos convencionais de usinagem, o contato entre as asperezas tendem a promover um maior desgaste abrasivo em razão de uma maior deformação plástica (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Por sua vez, o principal tipo de desgaste observado em mancais revestidos por Babbitt é o desgaste adesivo (ZHANG et al., 2015) e o movimento cíclico existente no trabalho dos mancais de deslizamento é responsável pelo surgimento de trincas por fadiga nas superfícies revestidas por Babbitt (BARYKIN; SADYKOV; ASLANIAN, 2000).

2.8.1 Resultados de desgaste envolvendo Babbitt

Goudarzi; Jahromi; Nazarboland (2009), verificaram o desgaste ocorrido em um ensaio pino sobre disco realizado à seco, com o auxílio de uma balança Kern com sensibilidade de 0,1 mg, e utilizou um microscópio eletrônico de varredura Oxford S360 para analisar as superfícies desgastadas. Foram apresentados os resultados de desgaste em três regiões distintas e explicou-se o comportamento da taxa de desgaste em cada uma das regiões. Segundo os pesquisadores, a primeira região representa a remoção das asperezas superficiais, a segunda região é caracterizada por uma superfície altamente polida (porque as asperezas foram removidas no início do ensaio) que promove a redução da taxa de desgaste. Cria-se uma deformação plástica ao longo do ensaio e conseqüentemente ocorre delaminação, o que gera o aumento da taxa de desgaste na terceira região, na qual, a perda de massa é proporcional de forma linear à distância de deslizamento (estado estacionário). A FIG 2.14 exhibe a curva da perda de massa em função da distância deslizada durante o ensaio.

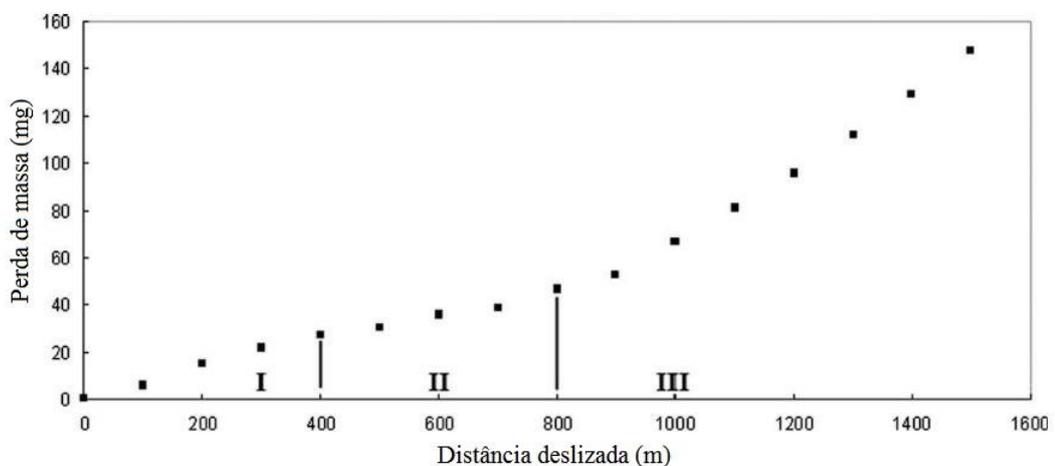


FIGURA 2.14 – Perda de massa X distância deslizada (Babbitt ASTM B23 3; carga normal: 14 N; rotação: 250 rpm)

FONTE – adaptado de GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND , 2009

Outro fator que favorece o comportamento da curva de desgaste apresentada sugerido por Goudarzi; Jahromi; Nazarboland (2009), é o aumento de resistência do Babbitt em função de um encruamento inicial (redução da taxa de desgaste da primeira para a segunda região) e recristalização da liga ocorrendo à temperatura ambiente após determinada deformação (a recristalização reduz a dureza da liga e conseqüentemente aumenta o desgaste na terceira região).

Valeeva; Valeev; Fazlyakhmetov (2014), observaram comportamento semelhante no primeiro e segundo estágios ao apresentado por Goudarzi; Jahromi; Nazarboland (2009), porém encontraram uma taxa de desgaste ainda decrescente no terceiro estágio para todos os corpos de prova (CP's) ensaiados por eles em Babbitts produzidos por diferentes processamentos, FIG 2.15. Eles realizaram os ensaios de desgaste em uma máquina de ensaio de atrito SMTs-2 utilizando lubrificação limítrofe com óleo de compressor KS-19 e determinaram a perda de massa com uma balança ALC210d4. A rotação utilizada foi de 300 rpm e 12,5 MPa de pressão de contato.

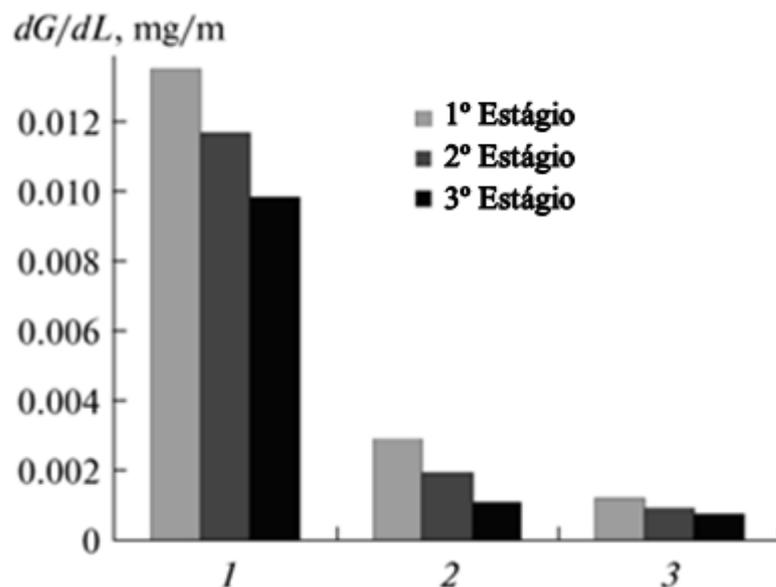


FIGURA 2.15 – Taxa de desgaste de um Babbitt: fundido (1); pressurizado na fase de cristalização (2) e que sofreu forjamento líquido (3)

FONTE – adaptado de VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014

As microestruturas desgastadas após os ensaios de deslizamento são exibidas na FIG 2.16. Nela pode-se observar que o corpo de prova fundido sofreu um desgaste elevado, apresentando grandes cavidades devido à fragmentação dos cristais cúbicos da fase β (SnSb).

Enquanto os corpos de prova que passaram pelos dois outros processamentos apresentaram superfícies suavemente desgastadas, com pequenas cavidades e riscos.

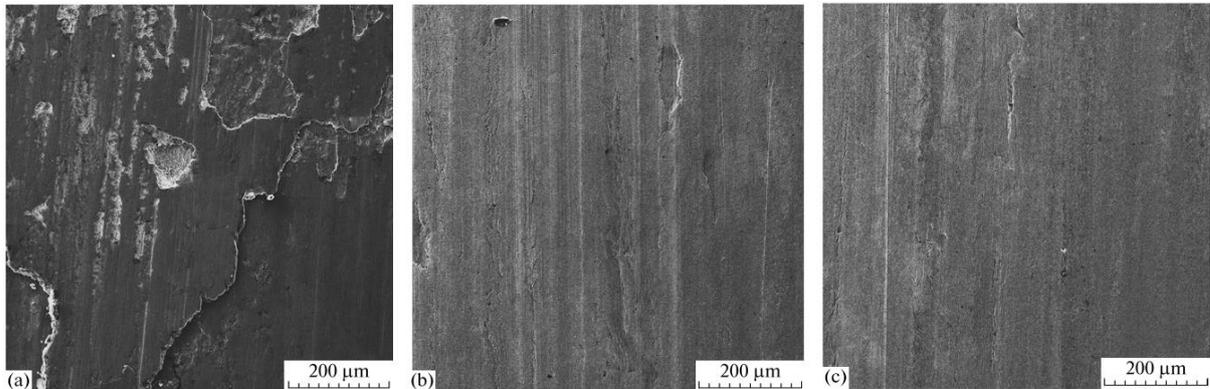


FIGURA 2.16 – Superfícies desgastadas de um Babbitt: fundido (a); pressurizado na fase de cristalização (b) e que sofreu forjamento líquido (c)

FONTE - VALEEVA; VALEEV; FAZLYAKHMETOV, 2014

As FIGURAS 2.17 e 2.18 possibilitam visualizar a influência que a carga normal teve no comportamento de desgaste de Babbitts ASTM B 23. É perceptível que houve aumento do desgaste conforme a carga foi elevada e também que a região dois foi bem discreta ou inexistente nos ensaios para os dois materiais quando se utilizou a maior carga. Ou seja, o efeito de transição no desgaste foi reduzido à medida que se elevou a carga normal aplicada. Outras afirmações que podem ser feitas é que a liga ASTM B 23 2 é mais resistente ao desgaste e que com a menor carga, ambas as ligas apresentaram os menores valores de desgaste (GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009).

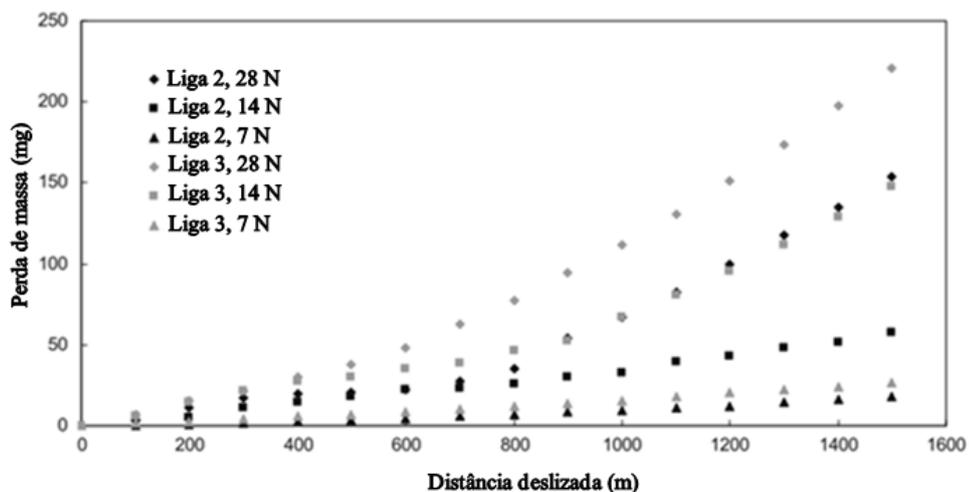


FIGURA 2.17 – Perda de massa X distância deslizada (Babbitt ASTM B23 2 e 3; rotação: 250 rpm)

FONTE – adaptado de GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND, 2009

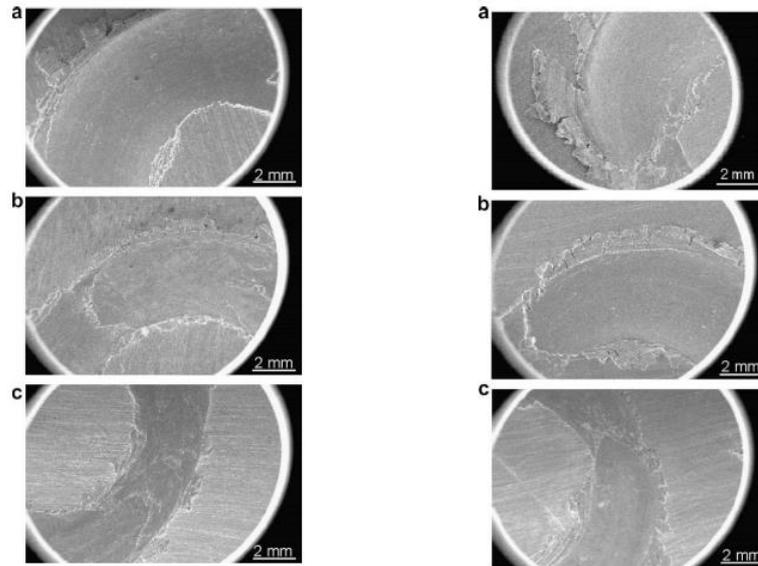


FIGURA 2.18 – Superfícies desgastadas das amostras da liga ASTM B23 2 com rotação de 250 rpm: (a) 28 N, (b) 14 N e (c) 7 N (à esquerda) e da liga ASTM B23 3 com rotação de 250 rpm: (a) 28 N, (b) 14 N e (c) 7 N (à direita)

FONTE - GOUDARZI; JAHROMI; NAZARBOLAND , 2009

2.9 Considerações parciais

Embora as variáveis mais estudadas em tribologia sejam a carga normal (ou pressão de contato) e a velocidade de deslizamento (BLAU, 2008), este estudo buscou verificar a influência da rugosidade e da espessura do revestimento por serem grandezas que foram pouco exploradas nos trabalhos consultados como referência.

Os valores de rugosidade utilizados foram baseados na afirmação de Norton (2013), para verificar se realmente não haveria grande influência no coeficiente de atrito na faixa descrita. Segundo o autor a rugosidade não influencia de forma tão considerável no coeficiente de atrito obtido no contato entre dois materiais dentro de certa faixa de valores. Ele afirma que materiais com rugosidade R_a inferiores a $0,25 \mu\text{m}$ (acabamento superficial extremamente fino) o μ pode chegar a um valor próximo de 2, devido a um aumento na área real de contato em função da baixa altura das asperezas. Por outro lado, quando se prepara uma superfície com acabamentos grosseiros (R_a acima de $1,27 \mu\text{m}$), também existe a possibilidade de ocorrer um determinado aumento nos valores de coeficiente de atrito. Este aumento com a alta rugosidade se daria em função da alta energia necessária para sulcar as asperezas e para cisalhar as ligações adesivas que se formam entre os picos durante o deslizamento.

Com relação a aderência da liga ao substrato é importante que haja uma preparação adequada da superfície que receberá a deposição, para se evitar problemas tanto de ancoragem quanto de ordem metalúrgica. Almeida (2014), realizou um tratamento de modificação superficial por meio de preparação mecânica e tratamento químico de remoção de contaminantes em um substrato de aço que receberia Babbitt. Com isso foi possível promover uma resistência maior ao cisalhamento mesmo com uma menor rugosidade do substrato em relação a outro não tratado. Para verificação da força de ligação interfacial e garantia da segurança em serviço, ensaios de cisalhamento podem ser realizados (ALCOVER JUNIOR, 2017; MIRANDA et al., 2015).

A diluição se mostra como um meio alternativo à rugosidade para favorecer a aderência da liga ao substrato. Zhou (2017), observou um aumento na resistência ao cisalhamento interfacial de uma liga Babbitt à base de estanho de 73 para 155 MPa quando elevou-se a corrente utilizada no processo de revestimento (brasagem por solda TIG – *Tungsten Inert Gas*) de 50 para 90 A. Isto foi possível devido a elevação na diluição com uma maior temperatura envolvida no processo de revestimento, o que proporcionou uma maior ancoragem da liga ao substrato. Porém, a diluição pode ser um grande problema tanto de composição química quanto de ordem metalúrgica na aplicação de revestimentos, por se tratar de um processo que envolve a união de materiais dissimilares (materiais muito distintos em termos de composição química). Quando ela ocorre em valores muito elevados pode promover a incorporação de ferro ou outras inclusões na zona fundida de um Babbitt depositado sobre aço, por exemplo (KEJELIN et al., 2010; ZEEMANN, 2003). Portanto, a diluição deve possuir um valor adequado em aplicações de revestimento de Babbitt em substratos de aço com o intuito de promover excelente aderência da liga ao substrato sem que ocorra a fragilização da mesma (BOLOTOVA et al., 2018).

Outro aspecto importante é relativo a utilização de lubrificante nos ensaios, pois de acordo com Blau (2008), este atrasa a transferência metálica que ocorre no contato entre dois metais, retardando desta forma transições no atrito e no desgaste. Isto evita a existência de camada transferida que pode atuar como um terceiro corpo e formar um tribofilme que pode amortecer a carga normal ou ser uma fonte de formação de detritos. Além disso, superfícies não lubrificadas tendem a promover a elevação da rugosidade das superfícies em contato.

Destaca-se que na pesquisa conduzida por Amanov et al. (2016), foram analisadas as superfícies de desgaste após ensaio por espectroscopia de dispersão de energia por raios-X (EDS) com o intuito de auxiliar na definição dos mecanismos de desgaste atuantes e verificar a existência ou não de transferência de material durante o contato deslizante. Percebeu-se a presença de inúmeros elementos após os ensaios à seco (como por exemplo ferro) que não foram notados no ensaio lubrificado. Ou seja, existe tendência a transferência metálica somente na condição à seco enquanto na condição lubrificada a composição química tende a se manter inalterada.

Um contato que ocorre no regime de lubrificação mista, embora possibilite prevenir a transferência metálica fica sujeito a inúmeros tipos de mecanismos de desgaste. Stolarski (1979) apud Klaas (2013), destaca principalmente o desgaste adesivo como o mais difícil de ser evitado ou suavizado nestas condições. Portanto, é difícil alcançar estabilidade em ensaios realizados neste tipo de regime de lubrificação e é possível que haja travamento em virtude da adesão entre as superfícies, principalmente quando são utilizados materiais macios. Em ensaios de pino sobre disco utilizando lubrificante conduzidos por Klaas (2013), foi observado um tempo muito curto para a estabilização do atrito. Esse comportamento ocorre porque o uso de lubrificante evita o contato metálico e tende a agir como uma região de baixa tensão de cisalhamento, se rompendo facilmente e evitando o fenômeno do crescimento de junções.

Outra possível explicação para este comportamento é relacionada a não influência da quebra de camada de óxido para este tipo de liga. Pois, ela se comporta da mesma forma do início ao fim do contato em função de uma baixa resistência da camada de óxido que é facilmente quebrada mesmo em baixas cargas. Geralmente a aplicação de carga normal só promove a quebra da camada de óxido que se forma instantaneamente entre dois materiais metálicos expostos ao ar e colocados em contato deslizante, quando ela é elevada. Com isso, provoca a elevação do coeficiente de atrito e da taxa de desgaste, conforme a camada vai sendo penetrada. Porém, para ligas macias (como as ligas de estanho e chumbo) o coeficiente de atrito é mais estável independente da carga normal aplicada, uma vez que elas possibilitam um maior contato entre as duas superfícies mesmo com baixas cargas, devido à baixa resistência que possui a camada de óxido (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Deste modo, o Babbitt exhibe um coeficiente de atrito um pouco maior em relação a outras ligas utilizadas em

mancais de deslizamento, porém é mais estável. Sendo este o fator que o destaca para esta aplicação.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A seguir serão apresentados os equipamentos que foram utilizados nas fases de preparação, ensaios e caracterização. Também serão informados os materiais utilizados para a realização da pesquisa bem como a metodologia de preparação dos mesmos e de obtenção dos resultados.

3.1 Equipamentos

3.1.1 Centro de usinagem CNC

Para a remoção de material de forma a deixar os corpos de prova com as dimensões padronizadas e com as espessuras de revestimento necessárias para os ensaios, foi adotado o fresamento frontal no centro de usinagem ROMI Discovery 560 do laboratório de usinagem do DEMEC (Departamento de Engenharia Mecânica) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), FIG 3.1.



FIGURA 3.1 – Centro de usinagem ROMI Discovery 560.

FONTE – O AUTOR

3.1.2 Tribômetro

O equipamento utilizado para os ensaios tribológicos de pino sobre disco foi o tribômetro Microtest modelo MT/60/NI com capacidade de rotação de 500 rpm, e capacidade de carga normal de 60 N do laboratório de tribologia: desgaste e fricção do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET) da UFMG, FIG 3.2. Ele trabalha associado ao software Nanovea Versão 1.5.3, que realiza a aquisição dos dados do ensaio.



FIGURA 3.2 – Tribômetro microtest MT/60/NI.

FONTE – O AUTOR

3.1.3 Durômetro e microdurômetro

Foi utilizado o durômetro INSIZE ISH-R150 para a medição da dureza do pino de aço ABNT 1045 e do Babbitt revestido sobre a chapa de aço que também era de aço ABNT 1045. Para os ensaios de microdureza utilizou-se o equipamento Mitutoyo MVK-H1 do laboratório de metrologia do DEMEC da UFMG, FIG 3.3.



FIGURA 3.3 – Microdurômetro Mitutoyo MVK-H1.

FONTE – O AUTOR

3.1.4 Microscópio eletrônico de varredura

Foi utilizado o microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6360LV pertencente ao centro de microscopia da UFMG para auxiliar na caracterização da amostra, FIG 3.4.



FIGURA 3.4 – Microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6360LV.

FONTE – O AUTOR

3.1.5 Rugosímetro e perfilômetro 3D

A rugosidade linear dos corpos de prova foi medida com um rugosímetro digital portátil INSIZE modelo ISR-16 e os perfis das pistas de desgaste foram obtidos por meio do perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T8000 do laboratório Nanotech Tribologia pertencente ao DEMET da UFMG. Ele utiliza o software Hommelmap, o apalpador TKU 300/600 e uma ponta de diamante Stylus, FIG 3.5.

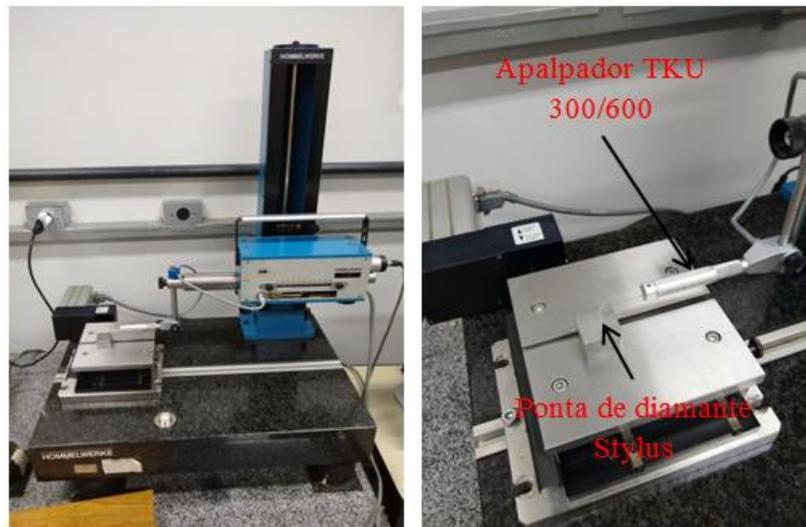


FIGURA 3.5 – Perfilômetro 3D HOMMELWERKE modelo T8000.

FONTE – O AUTOR

3.2 **Materiais e métodos**

3.2.1 Preparação dos pinos e dos corpos de prova

Os pinos utilizados nos ensaios tribológicos são do tipo topo esférico com 6 mm de diâmetro, fabricados em aço ABNT 1045. Todos os detalhes dimensionais dos pinos podem ser vistos na FIG 3.6.

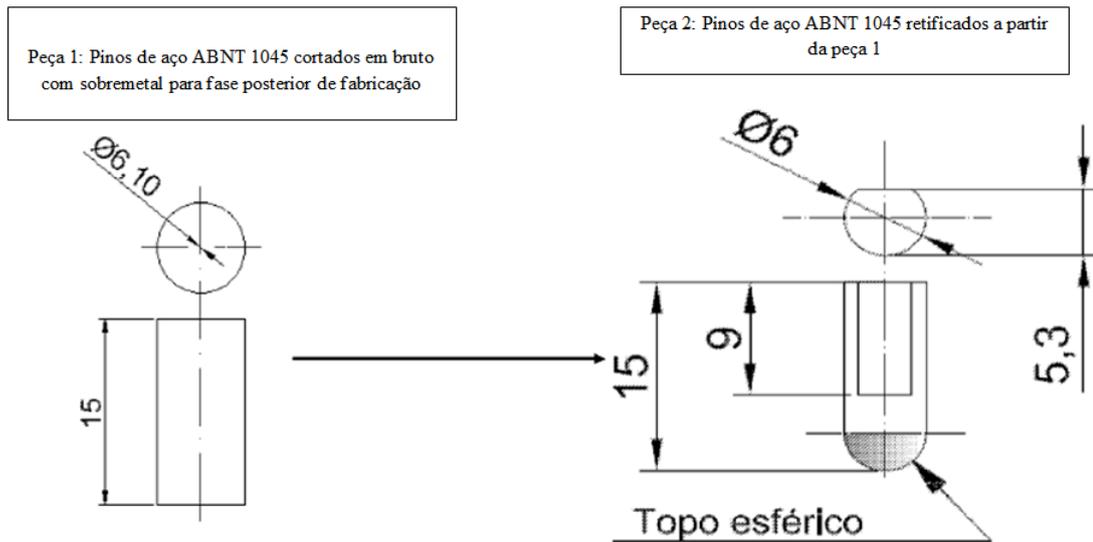


FIGURA 3.6 – Pino de aço ABNT 1045.

FONTE – O AUTOR

Os CP's preparados para a realização dos ensaios tribológicos eram compostos de um substrato de aço ABNT 1045 revestido por um Babbitt, classificado pelo fabricante como MP 85.W01. Trata-se de um Babbitt à base de estanho, cuja composição química está descrita na TAB 3.1.

TABELA 3.1 – Composição química do Babbitt MP 85.W01 (%p).

Sn	Sb	Cu	Pb	Fe	Zn	As	Bi	Cd	Al
Restante	10,3	5,3	0,0651	0,006	0,001	0,0061	0,0073	0,0006	< 0,0005

FONTE – FABRICANTE SOFTMETAIS

O processo de revestimento utilizado para depositar o Babbitt sobre o substrato de aço foi a aspersão térmica por chama à gás, na qual foi utilizada uma pistola para a saída dos gases oxigênio e acetileno pelo seu bocal, além do arame do metal de adição (Babbitt).

O Babbitt foi projetado no estado fundido em forma de gotas sobre a superfície do substrato de aço que havia sido previamente preparada por jateamento com granalha abrasiva, com o objetivo de conferir uma adequada rugosidade de ancoragem do revestimento no substrato. Na FIG 3.7 é possível observar as dimensões da chapa revestida e na FIG 3.8 pode-se observar a chapa após usinagem de acabamento.

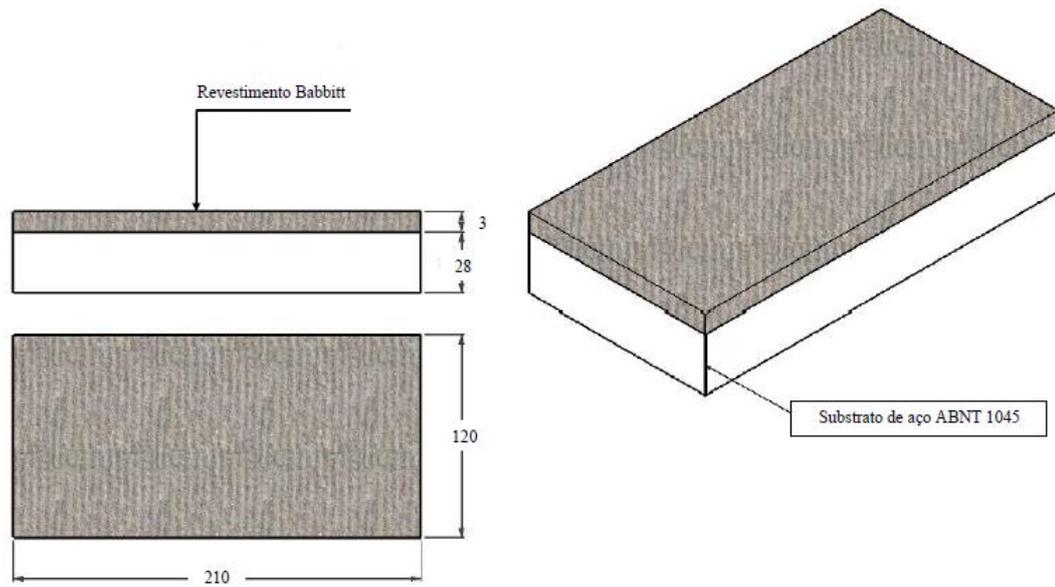


FIGURA 3.7 – Dimensões da chapa de aço ABNT 1045 revestida com Babbitt.

FONTE – O AUTOR

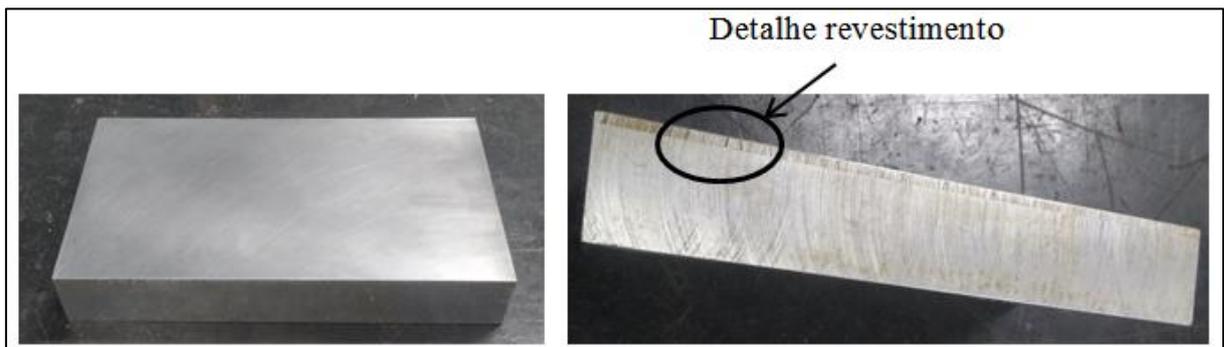


FIGURA 3.8 – Chapa de aço ABNT 1045 revestida com Babbitt após usinagem de acabamento.

FONTE – O AUTOR

Os corpos de prova passaram por um processo de fresamento frontal para que se tivesse a espessura de revestimento nos valores desejados. Eles foram cortados em uma serra semiautomática Starret S1101 para adquirirem as dimensões de 30 X 30 X 26 mm e apenas a rugosidade intermediária da face revestida com Babbitt foi alcançada pelo processo de fresamento, os outros dois valores foram obtidos por preparação posterior por meio de lixamento, FIG 3.9.

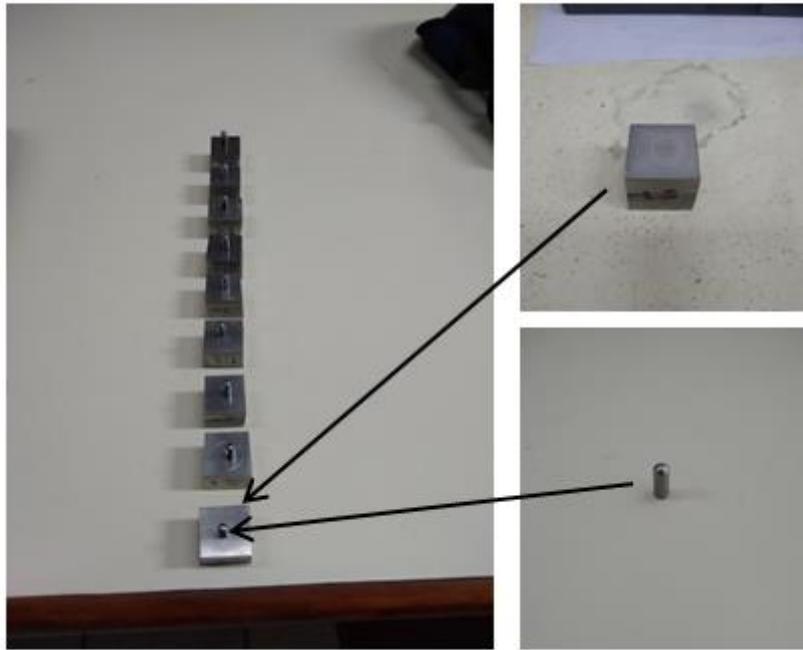


FIGURA 3.9 – Corpos de prova com espessuras e rugosidades de revestimento desejadas e pinos de topo esférico.

FONTE – O AUTOR

Os CP's que tiveram a rugosidade modificada após o fresamento foram lixados em uma politriz semiautomática Arotec Aropol VV cuja rotação varia de 50 a 600 rpm. Foram utilizadas lixas com granulometria de 180 a 1200 mesh para atingirem os valores de rugosidade desejados. Portanto foi realizada a combinação de três níveis de rugosidade e espessura do revestimento, TAB 3.2.

TABELA 3.2 – Corpos de prova utilizados nos ensaios pino sobre disco.

Corpo de prova	Espessura do revestimento (mm)	Rugosidade média – Ra (μm)
1	$0,23 \pm 0,05$	$0,45 \pm 0,02$
2	$0,23 \pm 0,05$	$0,69 \pm 0,02$
3	$0,23 \pm 0,05$	$1,24 \pm 0,20$
4	$0,45 \pm 0,07$	$0,43 \pm 0,03$
5	$0,45 \pm 0,07$	$0,71 \pm 0,03$
6	$0,45 \pm 0,07$	$1,17 \pm 0,18$
7	$1,08 \pm 0,17$	$0,47 \pm 0,01$
8	$1,08 \pm 0,17$	$0,74 \pm 0,13$
9	$1,08 \pm 0,17$	$1,29 \pm 0,20$

FONTE – O AUTOR

Também foram preparadas amostras de topo do Babbitt e do perfil do revestimento (Babbitt e aço ABNT 1045) para análise por microscopia eletrônica de varredura. As amostras foram devidamente cortadas, embutidas, lixadas e polidas, FIG 3.10.



FIGURA 3.10 – Amostras embutidas do topo e do perfil.

FONTE – O AUTOR

Assim como fizeram Zhang et. al. (2016) e Valeeva; Valeev; Fazlyakhmetov (2017b), que utilizaram Nital para atacar amostras de Babbitt, estas amostras foram utilizadas posteriormente para medição da microdureza de suas fases, e por isto também foram atacadas com Nital a 3% de forma a permitir a diferenciação das fases no microscópio óptico embutido ao durômetro.

3.2.2 Parâmetros do ensaio de pino sobre disco

É recomendado por norma um acabamento superficial de no máximo 0,8 μm de rugosidade R_a nos corpos de prova utilizados em ensaios tribológicos devido a uma possível maior dificuldade em se medir as marcas de desgaste em superfícies mais rugosas. Por isso se utiliza rugosidades além deste valor somente quando se tem interesse em observar a influência deste parâmetro em faixas maiores (ASTM, 2010). Este é o caso de uma das situações deste estudo.

Os resultados de ensaios tribológicos podem ser apresentados em termos tanto de parâmetros operacionais como carga aplicada, velocidade e tempo, quanto por parâmetros estruturais e de interação como a dureza, a microestrutura e a relação entre a espessura e a rugosidade de um filme de revestimento de determinado material (ASM HANDBOOK VOLUME 18, 1992).

Sendo este último caso (espessura e rugosidade) aquilo que foi modificado nos ensaios deste trabalho para observação da sua influência.

Utilizou-se uma velocidade relativamente baixa nos ensaios de pino sobre disco devido a limitações do equipamento quando se utiliza lubrificante, e, portanto o ensaio alternou em momentos de lubrificação de filme completo (possivelmente elasto-hidrodinâmica em função do contato pontual do pino com o disco) e em momentos de lubrificação limítrofe, na qual houve o contato de asperezas em determinados pontos. Ou seja, os ensaios foram conduzidos com lubrificação mista.

Foi realizada uma adaptação no equipamento de ensaio com uma caixa que permitiu vedar a superfície do corpo de prova e realizar o ensaio em banho de óleo. O óleo utilizado foi o V SAE 40 ISO, indicado para ser utilizado entre outras aplicações, em mancais de deslizamento.

Os ensaios foram realizados no laboratório de tribologia: desgaste e fricção do departamento de metalurgia e materiais da UFMG. Foi realizada a réplica de cada ensaio e todos foram conduzidos de acordo com os parâmetros descritos:

- Ensaios lubrificados;
- Velocidade de deslizamento = 0,82 m/min;
- Carga normal = 1 N;
- Tempo = 10 minutos;
- Raio da pista = 5 mm.

3.2.3 Avaliação de dureza e microdureza

As avaliações de dureza foram realizadas de acordo com a norma ABNT NBR NM ISO 6508-1 – Ensaio de Dureza Rockwell normal, e ela atende as exigências das normas internacionais correlatas (ABNT, 2008).

Foram mensuradas as durezas Rockwell do Babbitt e do pino de aço ABNT 1045, em laboratório com temperatura de 25 °C. Os valores foram convertidos para serem apresentados na escala Vickers com o objetivo de utilizar a mesma escala aplicada no ensaio de microdureza.

A avaliação de microdureza seguiu a norma ASTM E384, na qual foram realizadas 4 medições em cada uma das fases do Babbitt e do substrato. Foi aplicada uma carga de 50 gf por um tempo de 10 segundos.

3.2.4 Perfilometria e análise por microscopia eletrônica de varredura

A avaliação do perfil de desgaste das pistas de ensaios de pino sobre disco é um meio para determinar com exatidão a forma final das superfícies desgastadas e desta maneira ter embasamento para calcular o volume de material perdido em decorrência do desgaste (ASTM, 2010).

Quando somente o disco apresenta desgastes significativos, é possível determinar a perda volumétrica da amostra pela EQ (3.1). Na qual P_V é a perda volumétrica do disco, r_t é o raio da trilha de desgaste, b_t é a largura da trilha de desgaste e r_p é o raio do topo esférico do pino. Este foi o método utilizado para calcular a perda volumétrica neste estudo, pois não houve desgaste significativo no pino (ASTM, 2010).

$$P_V = \frac{r_t \times b_t}{6 \times r_p} \quad (3.1)$$

Para o mapeamento perfilométrico das pistas de desgaste, foi necessário realizar previamente limpeza ultrassônica dos corpos de prova para a remoção do óleo lubrificante usado nos ensaios de pino sobre disco. A amostra ficou imersa em um banho com álcool absoluto por 15 minutos sendo agitada em uma frequência de 40 kHz.

O levantamento topográfico se deu em uma área de 1 mm², de forma que houve um deslocamento de 1 mm no eixo x e um deslocamento de 0,016 mm no eixo y a cada trilha realizada, totalizando 60 trilhas.

As amostras antes de análise no MEV (microscópio eletrônico de varredura) passaram por outro processo de limpeza (com acetona) para remover contaminações e oxidações remanescentes.

No MEV foi aplicada uma energia do feixe de elétrons de 20 keV, com magnificações variando entre 100 e 1500 X utilizando-se detectores de elétrons secundários (SE), elétrons

retroespalhados (BSE) e EDS com o objetivo de se analisar e obter um melhor conhecimento da microestrutura e morfologia do material. Além de realizar aquisição de imagens das pistas de desgaste obtidas durante os ensaios tribológicos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo são apresentados detalhes sobre a caracterização do material utilizado na pesquisa e os principais resultados obtidos nos ensaios realizados, bem como a sua compreensão e justificativa por meio das explicações dispostas na literatura referente ao tema.

4.1 Caracterização do material

Na medição de dureza do pino de aço e do Babbitt, os valores foram obtidos nas escalas Rockwell B e F, respectivamente, e foram convertidos para a escala Vickers. A dureza do pino de topo esférico possui 272 HV e do Babbitt 60 HV.

A dureza do pino está um pouco acima dos valores indicados para eixos que trabalham apoiados sobre mancais revestidos por Babbitt, pois estes devem se situar entre 160 e 210 HV. A razão de dureza, por sua vez, possui um valor aproximado de 4,5 (a dureza do pino é cerca de 4,5 vezes maior que a dureza do Babbitt). Recomenda-se um valor de no mínimo 3 para a razão de dureza existente entre eixos e os materiais utilizados na fabricação de buchas e revestimentos de mancais de deslizamento que irão acomodar estes eixos. Isto é importante para garantir a acomodação de partículas abrasivas oriundas principalmente do desgaste do eixo. O valor de razão de dureza indicado especificamente para eixos de aço e Babbitts à base de estanho é de cerca de 6 vezes e para eixos de aço em contato com Babbitts à base de chumbo é de 8 vezes. Portanto, neste caso a razão de dureza encontrada estaria um pouco abaixo do recomendado (NORTON, 2013).

Foi realizado também um ensaio de microdureza, uma vez que a liga Babbitt é altamente heterogênea, e, portanto necessita de uma análise da microestrutura para se obter um conhecimento mais aprofundado do material. Os resultados de microdureza estão apresentados após a análise micrográfica do substrato e do revestimento.

Amostras de topo e de perfil que foram retiradas da chapa de aço revestida por Babbitt foram observadas por MEV e permitiram um melhor conhecimento da composição química

elementar da liga e do substrato; bem como observar a região da interface substrato-revestimento; as possíveis fases, inclusões e poros presentes; entre outros detalhes.

O aspecto geral da liga Babbitt utilizada e a sua morfologia são apresentadas na FIG 4.1. Observou-se a existência de uma região dendrítica que se formou possivelmente em virtude do rápido resfriamento e solidificação da liga durante o processo de deposição. Pois, a formação de grãos diminui com o aumento da taxa de resfriamento, o que pode promover o surgimento de dendritas no lugar de fases com morfologia cúbica, melhorando desta forma a tenacidade da liga sem alterar a sua resistência (ASM HANDBOOK VOLUME 18, 1992). Também foi possível perceber o pequeno, porém existente surgimento de poro.

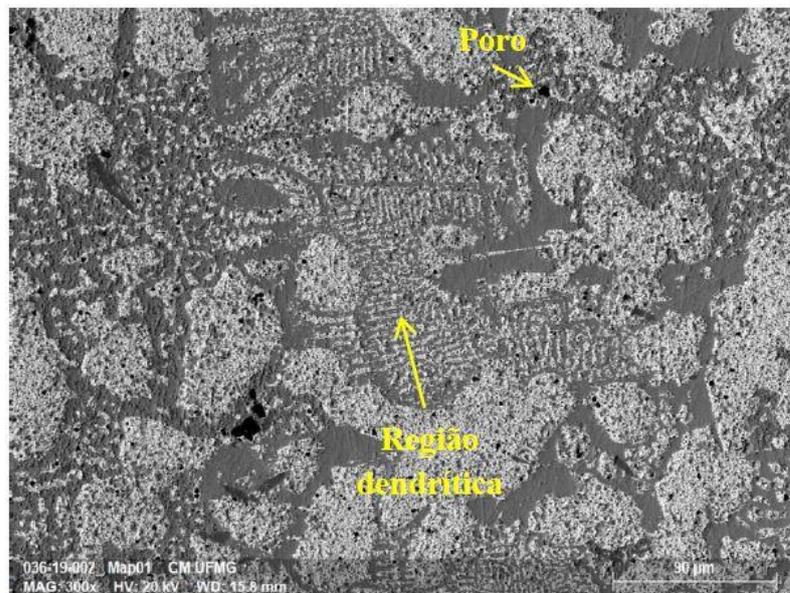


FIGURA 4.1 – Morfologia da liga Babbitt.

FONTE – O AUTOR

Nas FIG 4.2 e 4.3 é possível identificar a localização e a composição química elementar de cada uma das quatro fases que constituem a liga, bem como de inclusões que se formaram possivelmente durante o processo de deposição.

As fases possuem colorações diferentes na FIG 4.2 e estão identificadas de 1 a 5. A liga é possivelmente formada pelas fases α -Pb (região 1), β -Sn na região 2, grãos de SnSb na região 3 (cor alaranjada em função da mistura do verde do Sn e do vermelho do Sb na FIG 4.2) e pelas agulhas de CuSn vistas na região 4 da FIG 4.2 na cor azul, e que são identificadas em função do seu formato característico.

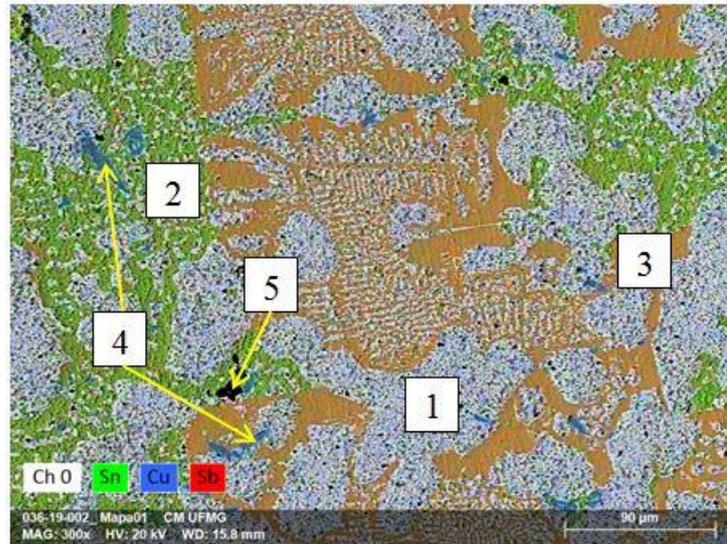


FIGURA 4.2 – Mapa de EDS do Babbitt com aumento de 300 X.

FONTE – O AUTOR

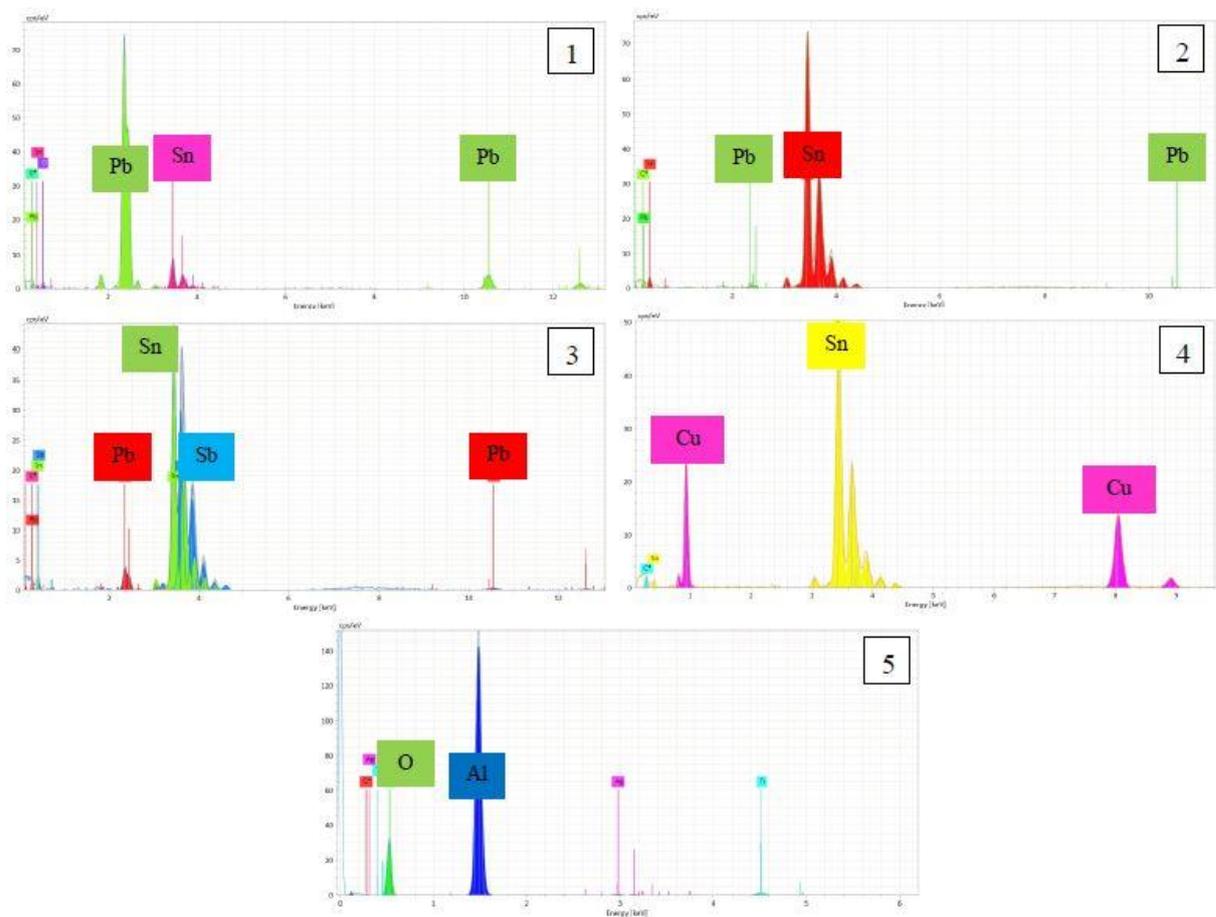


FIGURA 4.3 – Gráficos de EDS das regiões de 1 a 5 do Babbitt.

FONTE – O AUTOR

Possivelmente devido a uma velocidade de resfriamento relativamente alta da liga que ocorreu em virtude do processo de revestimento utilizado, não se formaram cubos do composto intermetálico SnSb. Além disso, foi observada a possível presença de inclusões de óxido de alumínio na região 5 da amostra, que provavelmente se formaram durante a deposição do revestimento.

A liga contém, conforme apresentado, uma alta concentração de chumbo, o que difere da composição química fornecida pela empresa responsável pela deposição (TAB 3.1 e Anexo A). Alcover Junior (2017), também observou precipitados com alto teor de chumbo em um Babbitt à base de estanho depositado por fundição por gravidade. Porém, isto ocorreu em função da baixa e não homogênea temperatura envolvida no processo por ele utilizado e pela baixa taxa de resfriamento. No caso da aspensão térmica a taxa de resfriamento é bastante elevada e, portanto neste caso sugere-se que não se trata de uma liga à base de estanho e sim um Babbitt à base de estanho e chumbo.

A quantidade presente de cada elemento em cada uma das regiões identificadas na FIG 4.2 é exibida na TAB 4.1, o que reforça que não se trata de chumbo segregado e sim do surgimento de uma nova fase. Observa-se na tabela que a quantidade de chumbo presente na fase de estanho ultrapassou aquilo que é recomendado por Carreteiro; Moura (1998) para se evitar o enfraquecimento da fase (recomenda-se no máximo 3,5 % de Pb), enquanto que na matriz de chumbo a quantidade de estanho está dentro da faixa adequada (o máximo recomendado é 11 % de Sn). Ou seja, a solubilidade de chumbo em estanho foi um pouco maior do que o ideal para ligas Babbitt à base de estanho e chumbo.

TABELA 4.1 – EDS das diferentes áreas de uma determinada região do Babbitt (%p).

Área	Pb	Sn	Sb	Cu	C	O	Al	Ti	Ag
Região 1: α – Pb	85,11	7,21	-	-	4,21	3,47	-	-	-
Região 2: β – Sn	5,70	91,12	-	-	3,18	-	-	-	-
Região 3: SnSb	8,08	29,19	61,52	-	1,20	-	-	-	-
Região 4: CuSn	-	41,08	-	53,53	5,39	-	-	-	-
Região 5: Óxido de alumínio	-	-	-	-	0,75	41,20	55,59	1,35	1,11

FONTE – O AUTOR

Os mapas de EDS da FIG 4.4 facilitam a observação dos locais nos quais estão presentes cada um dos principais componentes da liga. Destaca-se a ausência de coloração na região que foi destacada como poro na FIG 4.1, o local onde se encontram concentrados o alumínio e o oxigênio (aparentemente óxido de alumínio incluso) nas FIG 4.4a e 4.4b, o acúmulo de cobre na região das agulhas na FIG 4.4c e a grande quantidade de chumbo na FIG 4.4d.

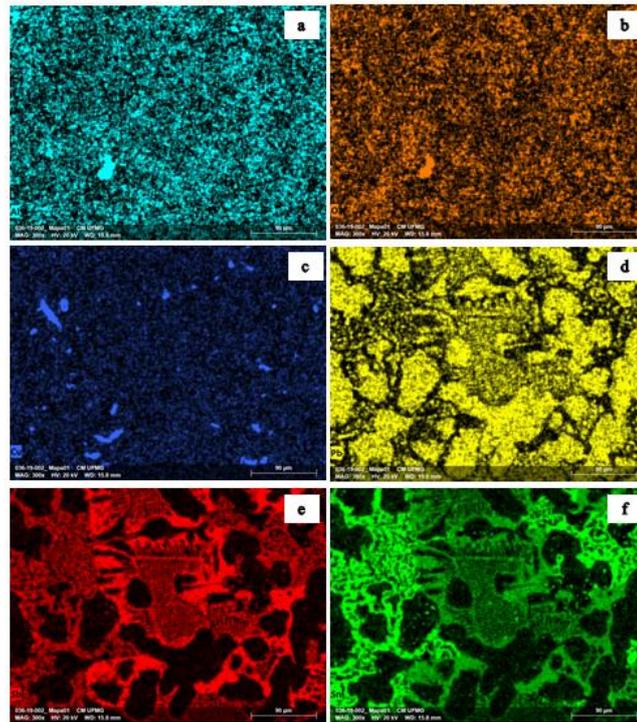


FIGURA 4.4 – Mapas de EDS dos componentes do Babbitt com aumento de 300 X. a: Alumínio; b: Oxigênio; c: Cobre; d: Chumbo; e: Antimônio; f: Estanho.

FONTE – O AUTOR

A região do substrato também foi observada. Na FIG 4.5, foi utilizada uma ampliação de 100 X e possibilitou perceber a existência de poros também no aço.

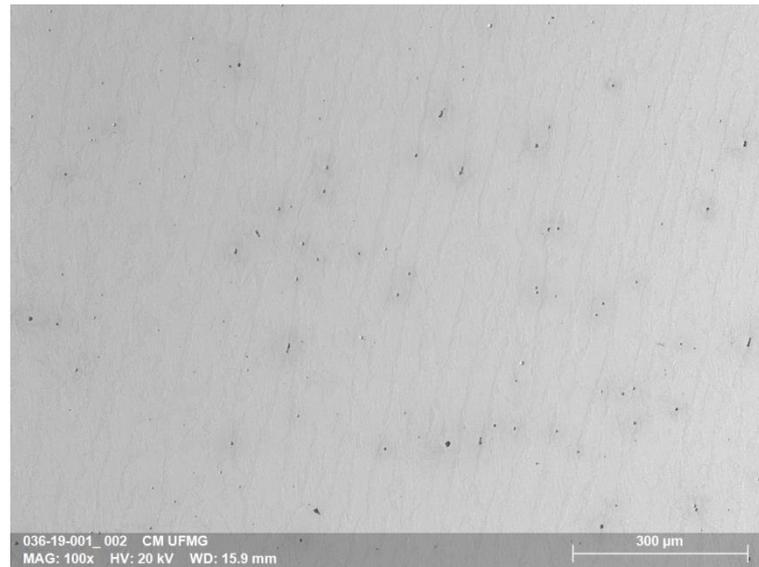


FIGURA 4.5 – Substrato utilizado para a deposição de Babbitt.

FONTE – O AUTOR

Na observação do perfil da amostra com uma ampliação de 200 X na FIG 4.6, foi possível visualizar a morfologia das fases do aço, do Babbitt e das possíveis inclusões de óxido de alumínio presentes na interface e no Babbitt. Além disso, notou-se o aspecto rugoso da chapa de aço que foi produzido para aumentar a ancoragem do revestimento sobre o substrato. Percebe-se também, que a microestrutura do aço ABNT 1045 era formada por uma matriz ferrítica e lamelas de perlita deformadas pelo processamento da chapa (provavelmente por laminação).



FIGURA 4.6 – Interface Babbitt – substrato.

FONTE – O AUTOR

Nos mapas de EDS feitos para cada um dos principais elementos da região da interface do revestimento gerados em separado, destacam-se nas FIG 4.7a e 4.7b a presença de alumínio e oxigênio, respectivamente, reforçando a formação de inclusões de óxido de alumínio; a presença de cobre não somente nas agulhas de CuSn mas também segregado na interface matriz-substrato, FIG 4.7c e a grande quantidade de chumbo na FIG 4.7d, reforçando que realmente não se trata de chumbo segregado em uma pequena região do Babbitt.

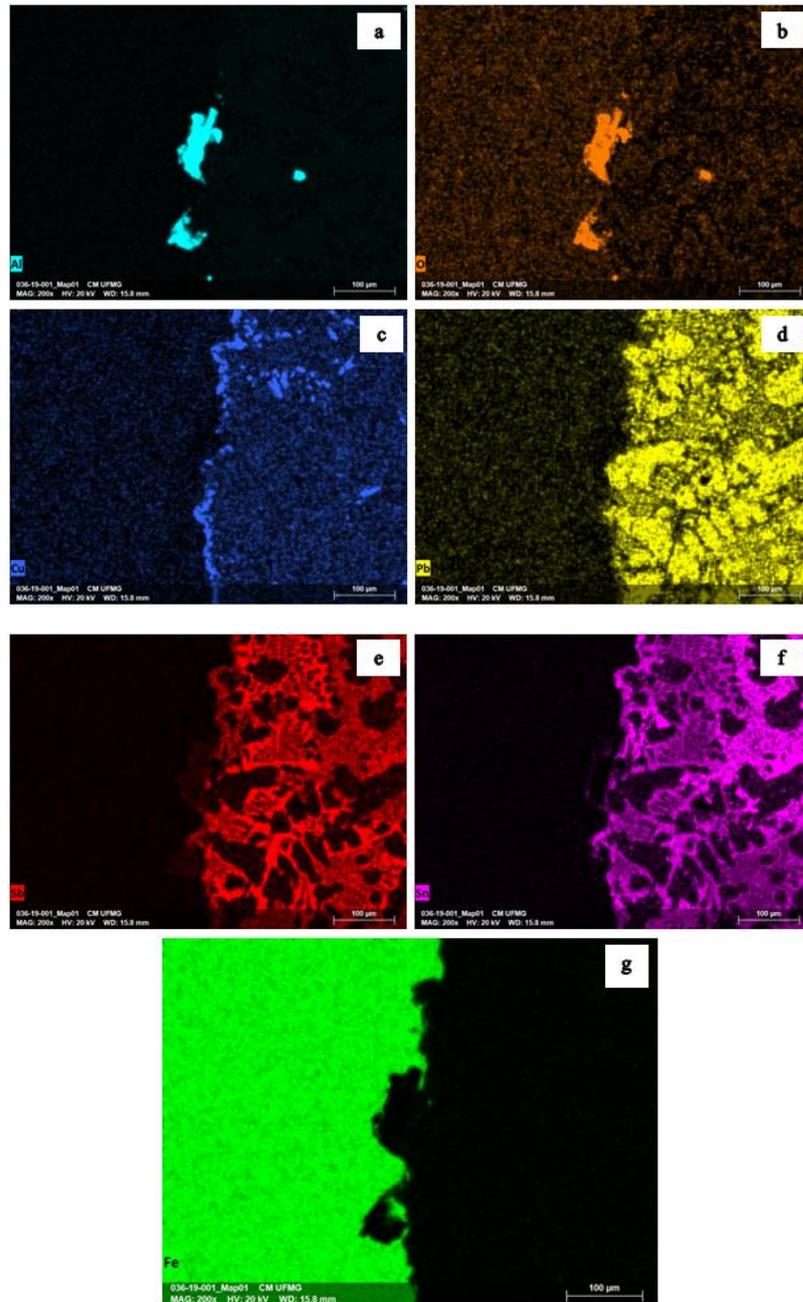


FIGURA 4.7 – Mapas de EDS da interface do revestimento de Babbitt sobre o substrato de aço com aumento de 200 X. a: Alumínio; b: Oxigênio; c: Cobre; d: Chumbo; e: Antimônio; f: Estanho; g: Ferro.

A microdureza média observada em cada uma das regiões tanto do Babbitt quanto do aço é apresentada na TAB 4.2. Não foi possível mensurar a microdureza da fase em formato de agulhas (CuSn), pois estava fora da capacidade dimensional do microdurômetro devido a sua reduzida dimensão, semelhante ao que ocorreu com Dong et.al., (2018). Porém, Potekhin et. al (2009) conseguiram determinar a dureza da fase Cu₃Sn de um Babbitt e obtiveram um valor cerca de 7 vezes maior em relação ao composto intermetálico SnSb.

TABELA 4.2 – Microdureza dos componentes do Babbitt e do aço.

Material	Fase	Microdureza (HV)
Babbitt	α -Pb	12,9 \pm 0,3
	β -Sn	23,2 \pm 2,7
	SnSb	31,2 \pm 1,4
Aço	Ferrita	182,4 \pm 3,5
	Perlita	272,0 \pm 11,5

FONTE – O AUTOR

Percebe-se pelos valores de microdureza que o elemento mais duro do Babbitt (dentre as fases mensuradas) é o que se sugere que seja o composto intermetálico SnSb, enquanto o mais macio é a matriz de chumbo. Não houve variação considerável na microdureza de nenhuma das fases conforme se modificou a profundidade de medição na amostra de perfil.

4.2 Coeficiente de atrito

Foi observada a influência da rugosidade nos três níveis de espessura de revestimento, sendo que para a espessura de 0,23 \pm 0,05 mm o coeficiente de atrito variou conforme FIG 4.8. Observa-se que para a menor espessura de revestimento o coeficiente de atrito tendeu a cair conforme se elevou a rugosidade dos corpos de prova revestidos. De acordo com Zhang et. al. (2015), a maior presença de vales na superfície mais rugosa proporciona o armazenamento de óleo e um menor coeficiente de atrito.

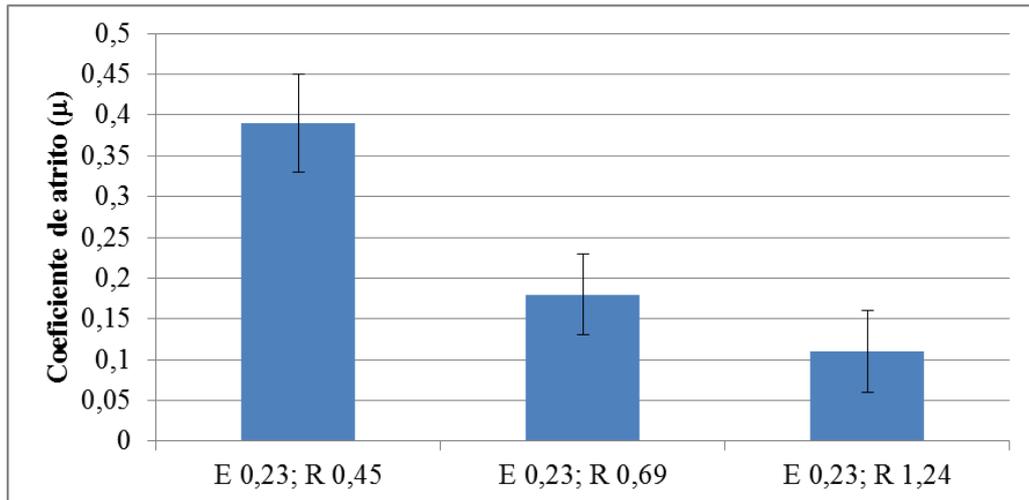


FIGURA 4.8 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm.

FONTE – O AUTOR

A espessura intermediária de revestimento ($0,45 \pm 0,07$ mm) exibiu um maior coeficiente de atrito para a rugosidade intermediária ($0,71 \pm 0,03$ μm), seguido pela maior rugosidade ($1,17 \pm 0,18$ μm) e menor rugosidade ($0,43 \pm 0,03$ μm), respectivamente, FIG 4.9.

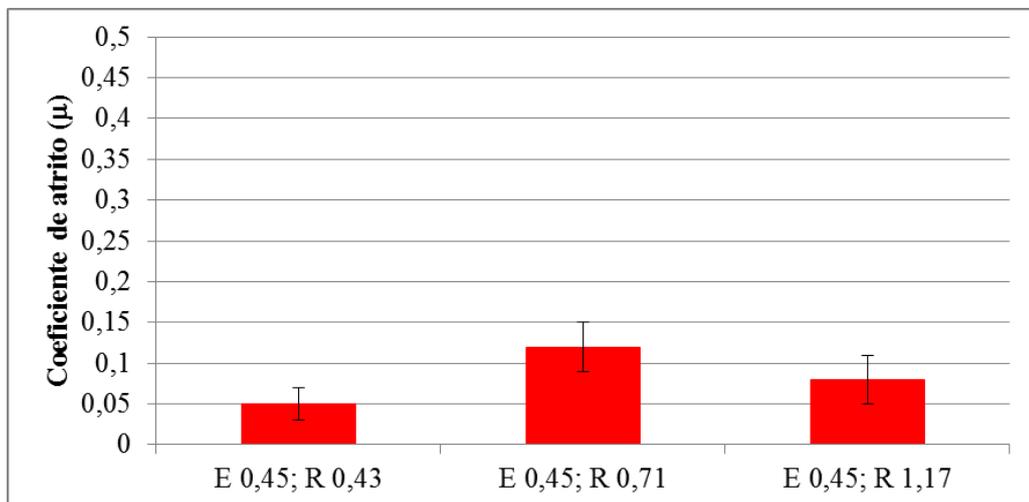


FIGURA 4.9 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm.

FONTE – O AUTOR

Por sua vez, nos ensaios que utilizaram os corpos de prova com maior espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm), o comportamento do coeficiente de atrito modificou-se conforme FIG 4.10. O maior valor de coeficiente de atrito foi mensurado no ensaio com

rugosidade de $0,47 \pm 0,01 \mu\text{m}$, seguido pela rugosidade de $1,29 \pm 0,20 \mu\text{m}$ e por último a rugosidade de $0,74 \pm 0,13 \mu\text{m}$. O que indica uma variação semelhante à teoria apresentada por Hutchings; Shipway (2017), na qual o coeficiente de atrito tende a valores maiores quando a rugosidade do corpo de prova possui valores maiores e menores dentro da faixa trabalhada.

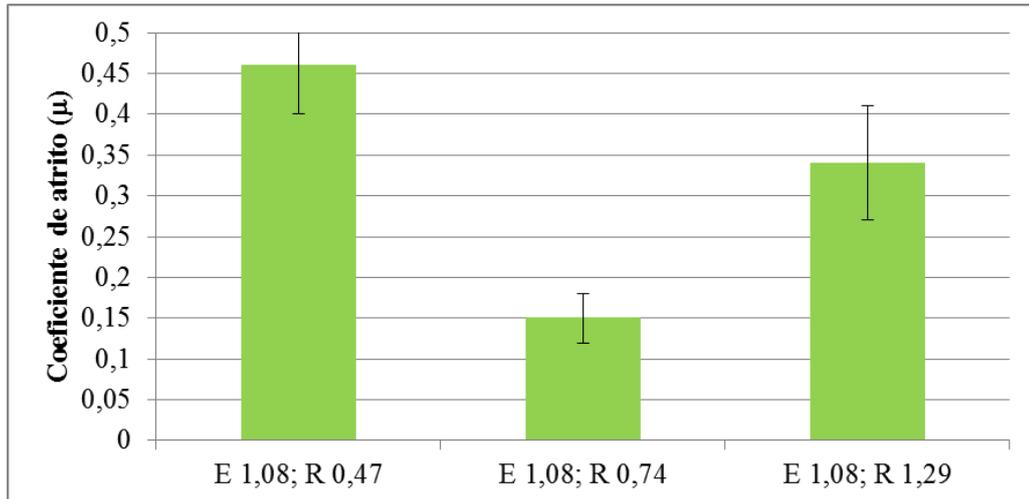


FIGURA 4.10 – Influência da rugosidade no coeficiente de atrito dos corpos de prova com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17 \text{ mm}$.

FONTE – O AUTOR

Os dados de coeficiente de atrito do contato entre o pino de aço ABNT 1045 e o Babbitt revestido sobre o mesmo aço para todos os ensaios realizados são apresentados na FIG 4.11.

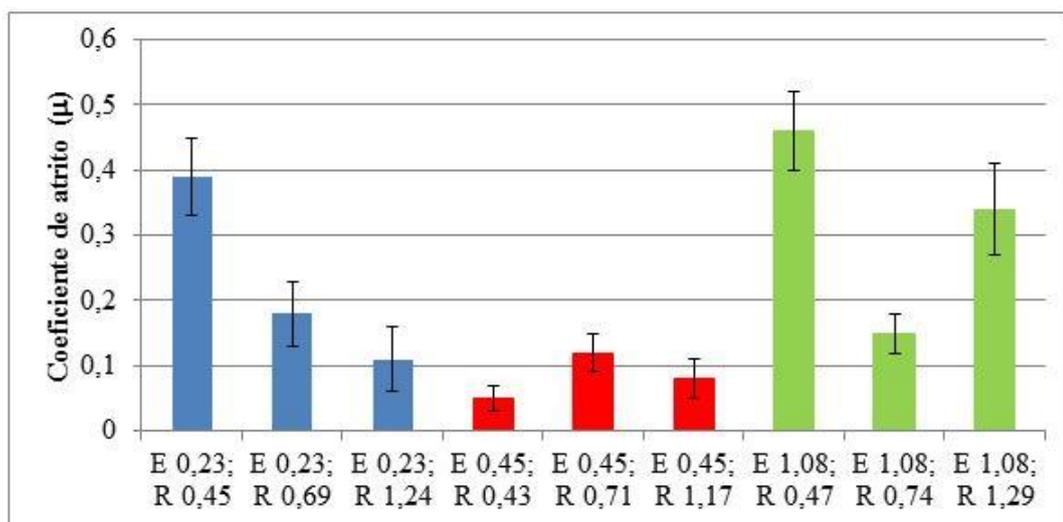


FIGURA 4.11 – Influência da modificação da rugosidade no coeficiente de atrito de todos ensaios de pino sobre disco.

FONTE – O AUTOR

Pode-se perceber que o ensaio que apresentou o maior coeficiente de atrito foi aquele em que o corpo de prova utilizado possuía a maior espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm) e a menor rugosidade Ra ($0,47 \pm 0,01$ μ m). Ele apresentou um coeficiente de atrito no valor de $0,46 \pm 0,06$, enquanto o menor valor de coeficiente de atrito foi registrado pelo ensaio que possuía a espessura intermediária ($0,45 \pm 0,07$ mm) e menor rugosidade Ra ($0,43 \pm 0,03$ μ m). Entre os três maiores coeficientes de atrito encontram-se dois corpos de prova com a maior espessura de revestimento.

Em relação à influência da espessura de revestimento nos três diferentes níveis de rugosidade, observa-se que para os menores valores de rugosidade foi obtido um valor de coeficiente de atrito extremamente baixo de $0,05 \pm 0,02$ para a espessura intermediária ($0,45 \pm 0,07$ mm), seguido por um coeficiente de atrito de $0,39 \pm 0,06$ para a espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm e $0,46 \pm 0,06$ para a maior espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm), FIG 4.12.

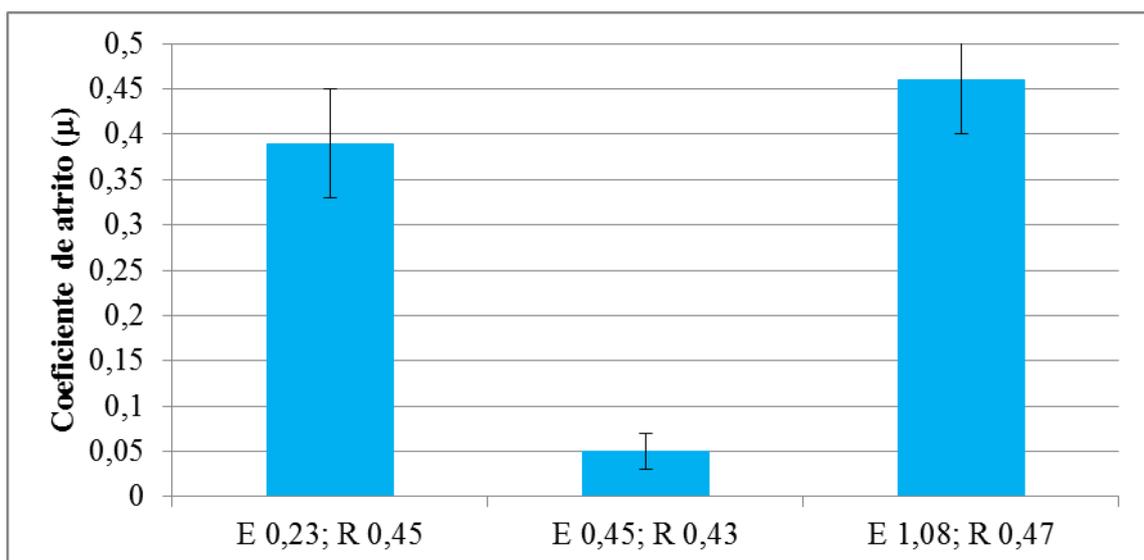


FIGURA 4.12 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os menores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

No caso da rugosidade intermediária a espessura de $0,45 \pm 0,07$ mm também apresentou o menor coeficiente de atrito, porém o segundo menor valor foi registrado pela espessura superior e o maior valor de coeficiente de atrito pertenceu à espessura de $0,23 \pm 0,05$ mm, FIG 4.13.

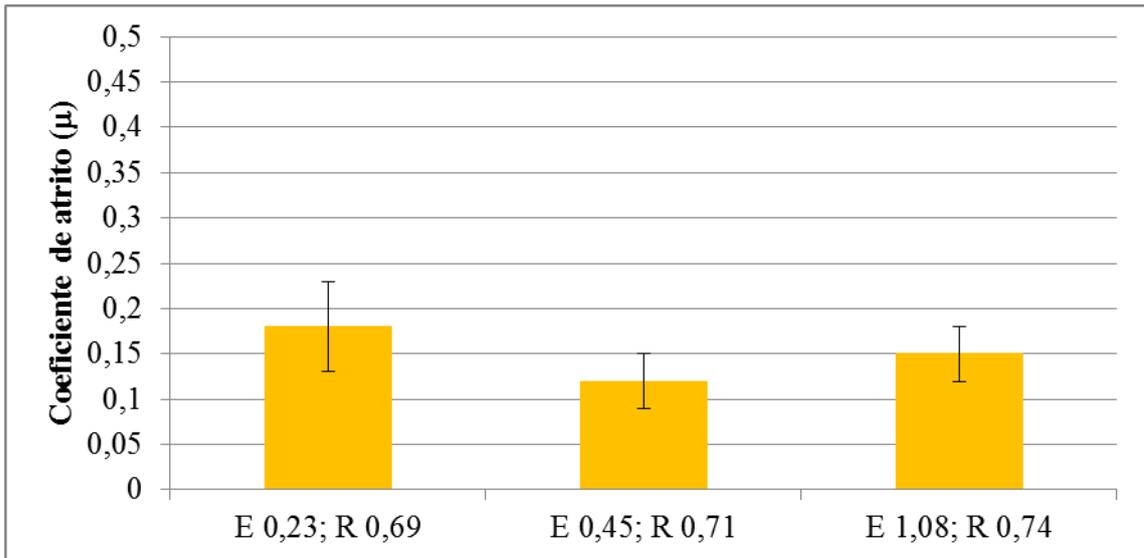


FIGURA 4.13 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os valores intermediários de rugosidade Ra na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

Uma ordem de valores de coeficiente de atrito semelhante à observada para as menores rugosidades também ocorreu para as rugosidades mais elevadas, FIG 4.14. Desta forma, o menor valor de coeficiente de atrito para esta rugosidade foi da espessura de $0,45 \pm 0,07$ mm ($\mu = 0,08 \pm 0,03$), registrou-se um coeficiente de atrito de $0,34 \pm 0,07$ para a maior espessura de revestimento e um valor intermediário de coeficiente de atrito de $0,11 \pm 0,05$ refere-se a menor espessura.

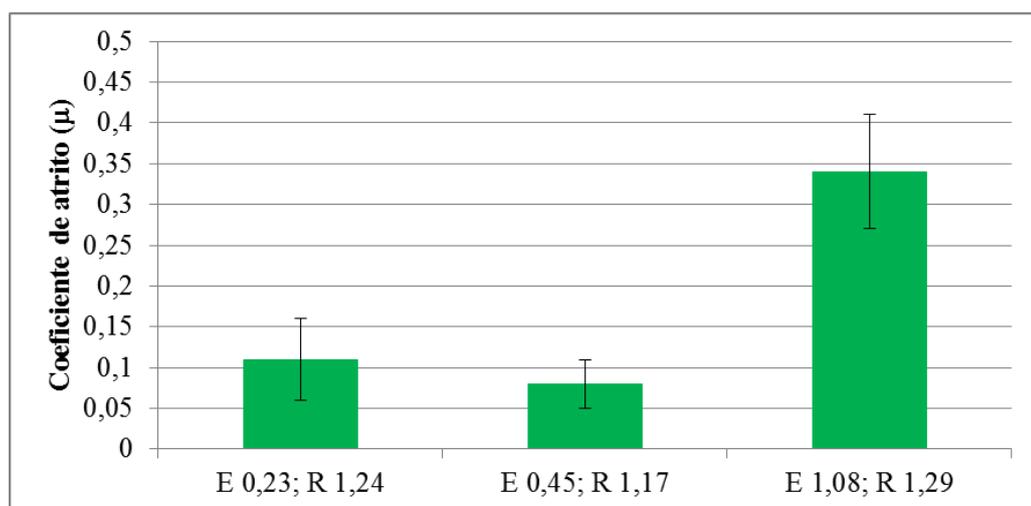


FIGURA 4.14 – Influência da espessura do revestimento no coeficiente de atrito dos corpos de prova com os maiores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

Variando-se a espessura do revestimento em qualquer uma das rugosidades utilizadas percebe-se que os valores de coeficiente de atrito tenderam a elevar-se tanto no menor quanto no maior valor, FIG 4.15. Este é um comportamento semelhante ao que é retratado por Hutchings; Shipway (2017), no qual valores menores e maiores de espessura de revestimento tendem a apresentar altos coeficientes de atrito porque há a tendência do contato entre as asperezas do substrato e do pino ou o revestimento tende a começar a suportar carga normal, respectivamente. Para o menor valor de rugosidade houve a maior variação do coeficiente de atrito quando se elevou ou reduziu a espessura de revestimento.

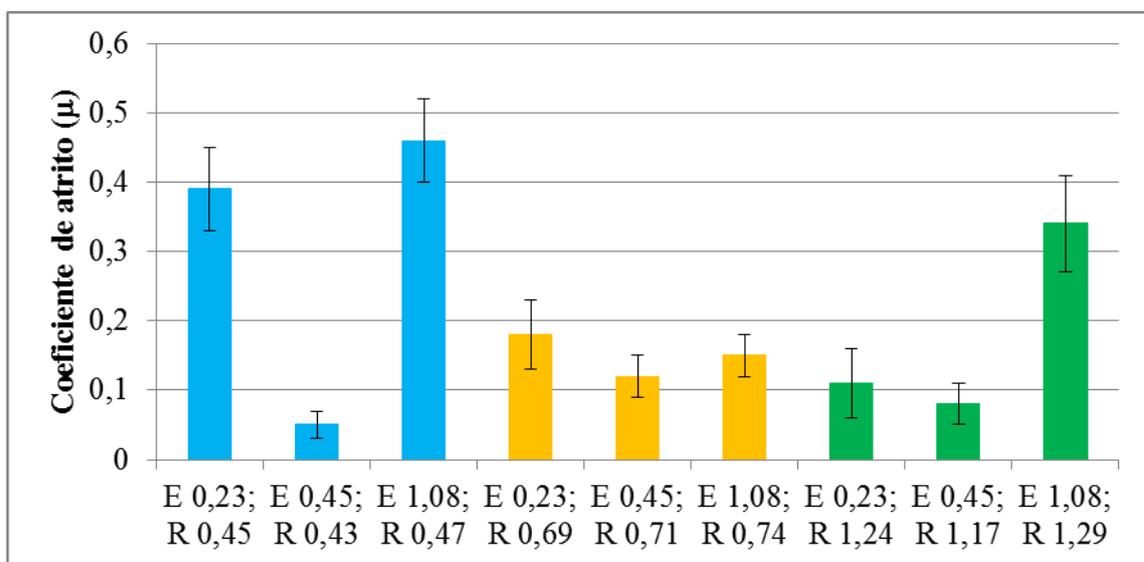


FIGURA 4.15 – Influência da modificação da espessura do revestimento no coeficiente de atrito de todos ensaios de pino sobre disco.

FONTE – O AUTOR

4.3 Avaliação do desgaste

A avaliação de desgaste dos ensaios foi realizada pela análise do volume de material perdido pelo corpo de prova dividido pela distância deslizada durante o ensaio de pino sobre disco. A análise por perfilometria permitiu mensurar a largura das pistas de desgaste, FIG 4.16, para aplicá-la na EQ (3.1).

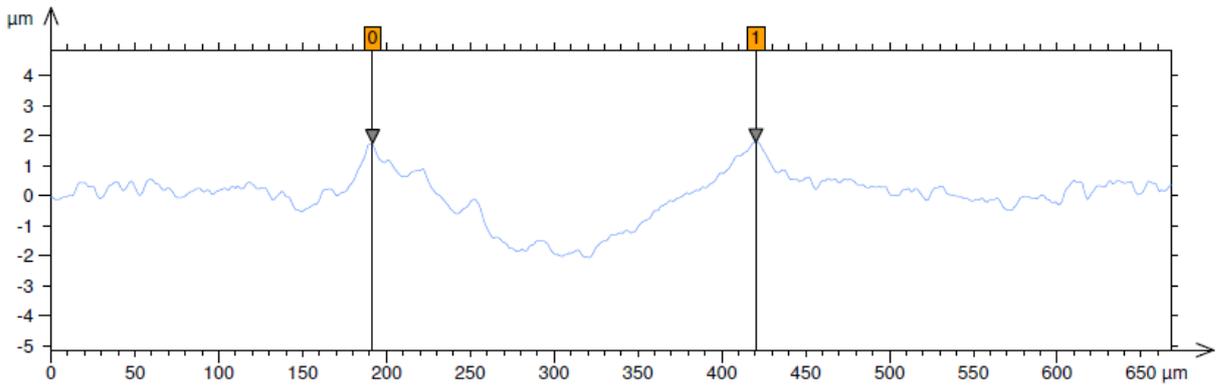


FIGURA 4.16 – Medição de largura de uma das pistas de desgaste dos ensaios pino sobre disco.

FONTE – O AUTOR

Foi utilizada a metodologia de perda de volume do disco para mensurar o desgaste, pois não houve desgaste considerável no pino de aço, conforme estabelecido por norma (ASTM, 2010), e o mapeamento do topo esférico de um dos pinos é apresentado na FIG 4.17. O aspecto das pistas de desgaste e os mecanismos de desgaste atuantes, por sua vez, foram analisados por meio de microscopia eletrônica de varredura.

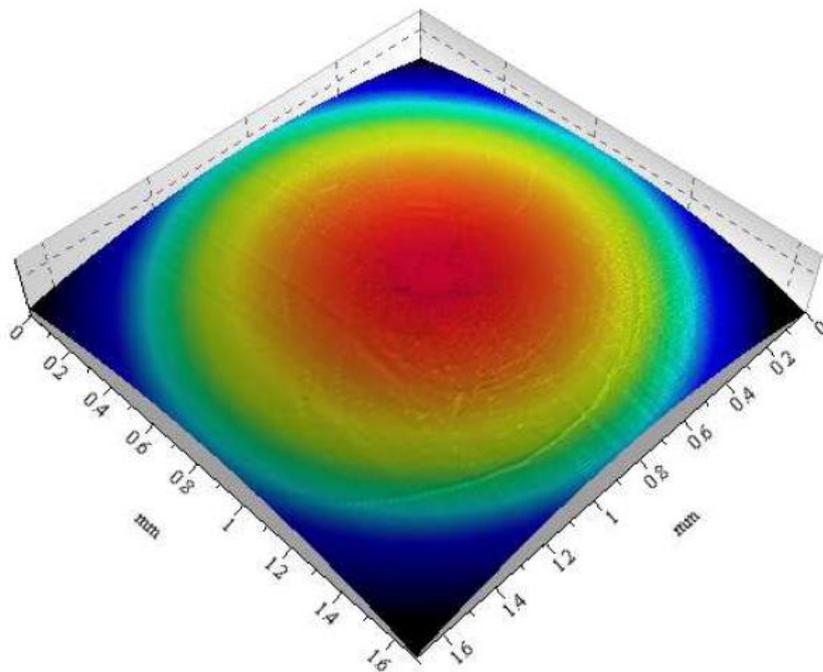


FIGURA 4.17 – Mapeamento perfilométrico de um pino de aço.

FONTE – O AUTOR

Comparando-se somente os ensaios em que os corpos de prova possuíam a mesma espessura de revestimento e somente a rugosidade variava, foram observados comportamentos distintos. Os ensaios com espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm apresentaram menores valores de desgaste tanto com o menor quanto com o maior valor de rugosidade, FIG 4.18.

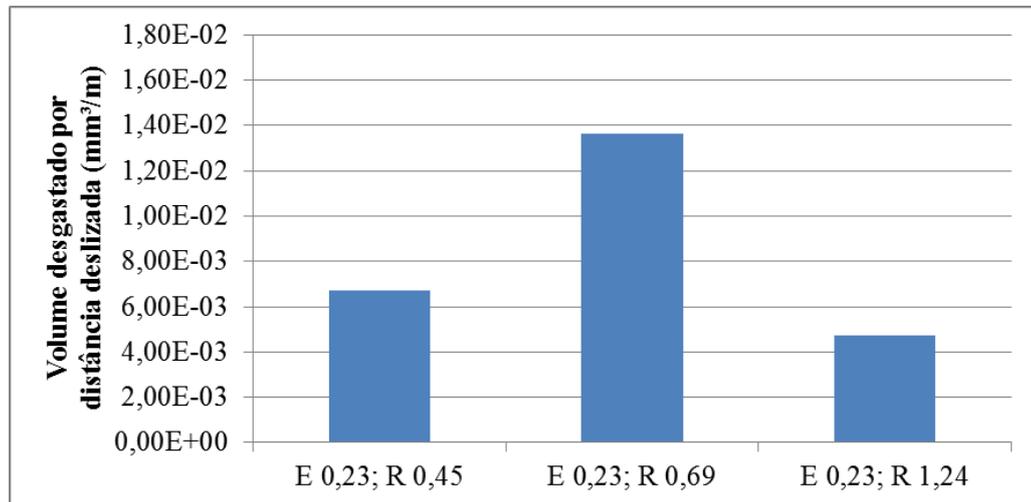


FIGURA 4.18 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ mm.

FONTE – O AUTOR

Para a espessura intermediária foi observado um comportamento bem parecido com aquele verificado nos ensaios com menor espessura de revestimento, o que se modificou foi somente que o menor desgaste para a espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm foi observado para a menor rugosidade, conforme descrito por Chiaverini (1986a), que afirma que o desgaste tende a ser menor em superfícies menos rugosas, enquanto que para a menor espessura de revestimento o menor desgaste ocorreu para a maior rugosidade, FIG 4.19.

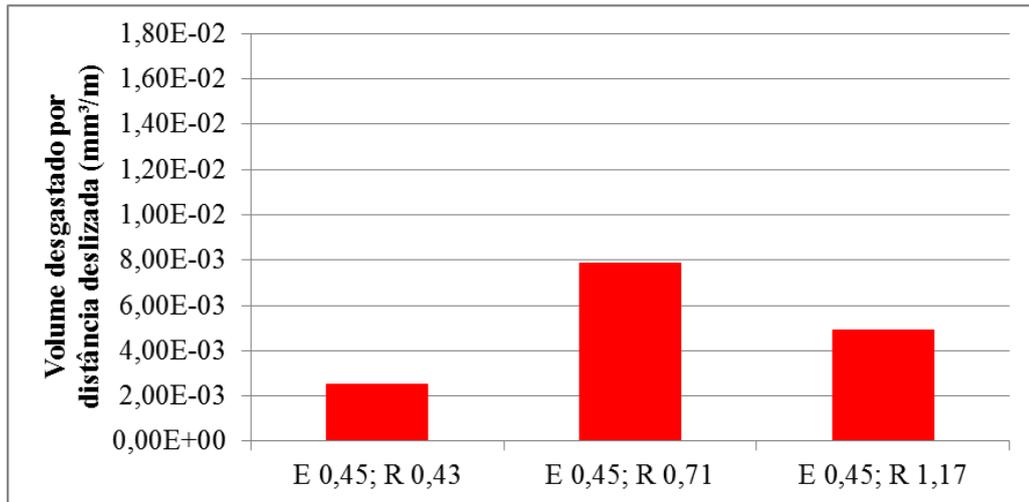


FIGURA 4.19 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm.

FONTE – O AUTOR

Nos ensaios com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17$ mm o menor desgaste foi registrado no corpo de prova com rugosidade R_a de $0,74 \pm 0,13$ μm , seguido pelo CP de rugosidade de $0,47 \pm 0,01$ μm e posteriormente pelo CP de rugosidade de $1,29 \pm 0,20$ μm , FIG 4.20.

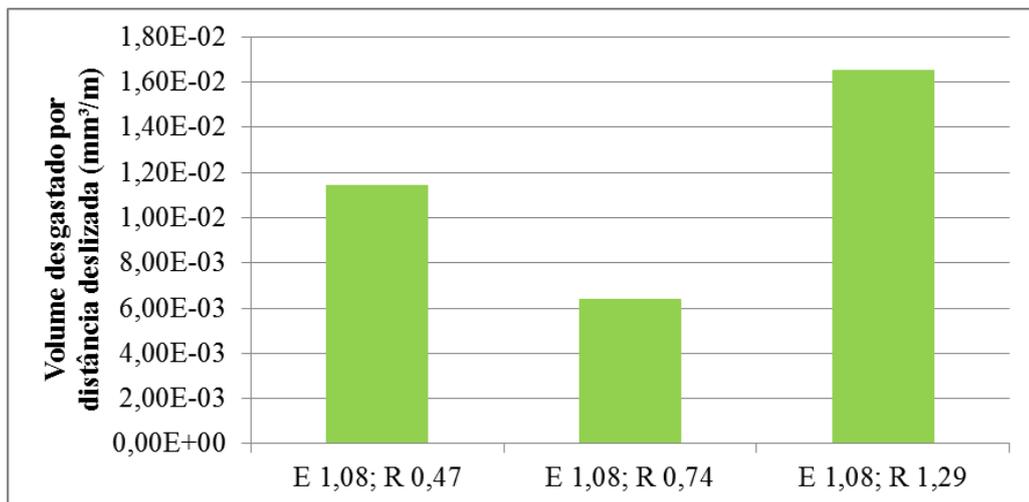


FIGURA 4.20 – Influência da rugosidade no desgaste dos corpos de prova com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,07$ mm.

FONTE – O AUTOR

Os resultados de desgaste para todos os ensaios de pino sobre disco são apresentados na FIG 4.21. Pode ser observado que os ensaios que envolveram os corpos de prova com maior

espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm) e rugosidades Ra de $1,29 \pm 0,20$ μm e $0,47 \pm 0,01$ μm , apresentaram o maior e o terceiro maior desgaste, respectivamente. Eles também se posicionaram entre os maiores valores de coeficiente de atrito, alternando somente a ordem em que cada um ficou posicionado (primeiro e terceiro maiores valores).

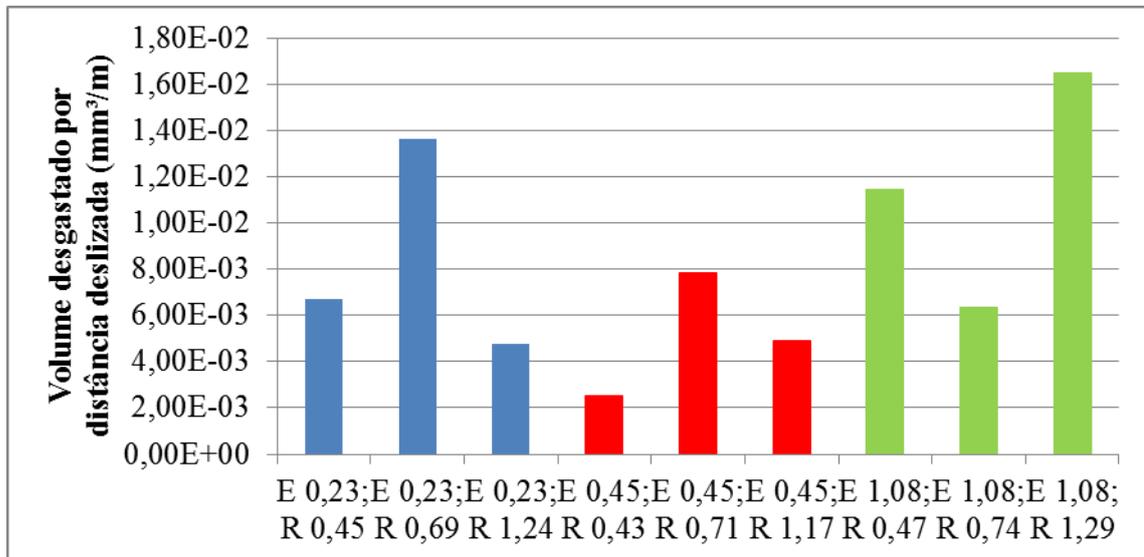


FIGURA 4.21 – Influência da modificação da rugosidade no volume de desgaste por distância deslizada de todos os ensaios de pino sobre disco.

FONTE – O AUTOR

O menor desgaste foi observado no ensaio realizado com o corpo de prova que possuía a espessura intermediária ($0,45 \pm 0,07$ mm) e rugosidade Ra de $0,43 \pm 0,03$ μm . Este também foi o ensaio que exibiu o menor coeficiente de atrito de todos.

Os CP's com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17$ mm foram os únicos que exibiram valores de desgaste maiores quando a rugosidade foi aumentada ou diminuída. Para as outras duas espessuras, o comportamento foi inverso, isto é, o maior valor de desgaste ocorreu para a rugosidade intermediária.

As imagens feitas por MEV de todas as pistas ensaiadas e com ampliação de 500 vezes, podem ser visualizadas na FIG 4.22. Foram realizadas análises de composição química elementar por EDS no interior das trilhas de desgaste objetivando a identificação das variações de composição química do material ao longo do processo de desgaste. Porém não foram observadas variações significativas.

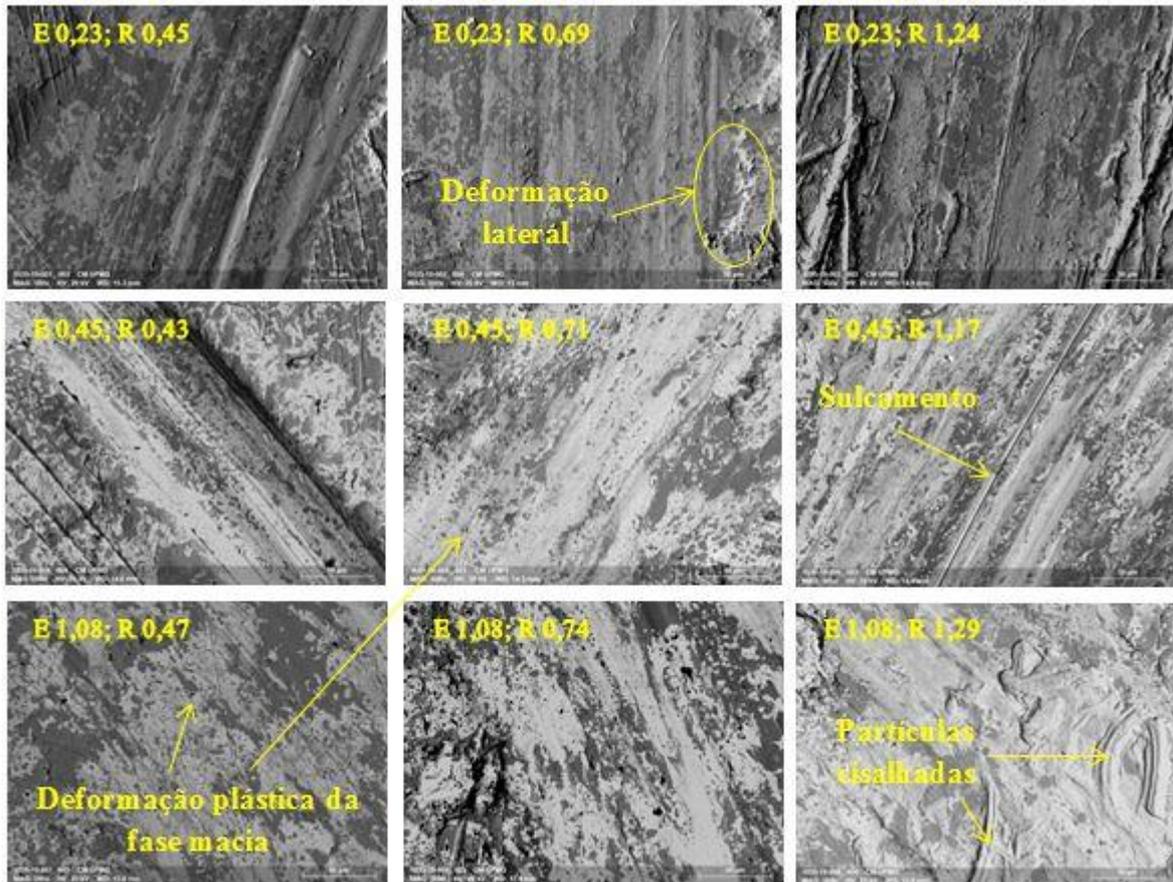


FIGURA 4.22 – Pistas de desgaste dos ensaios pino sobre disco com ampliações de 500 X.

FONTE – O AUTOR

Percebe-se no ensaio E 1,08; R 1,29 que pelo fato deste possuir a maior espessura de revestimento e a maior rugosidade, facilitou a liberação de pequenas partículas de material que foram sulcadas e posteriormente cisalhadas conforme o pino se deslocava pela trilha durante o ensaio e por isso apresentou o mais elevado desgaste, semelhante ao que é descrito por Norton (2013) e Almeida (2014). Aparentemente as partículas de desgaste da interface que possuíam baixa resistência ao cisalhamento foram exibidas na forma de chapas laminadas (*flake like*). Segundo Hutchings; Shipway (2017), a espessura de Babbitt depositado sobre um substrato tem muito mais influência na resistência à fadiga da liga do que propriamente a sua composição química, e conforme se eleva a espessura de um revestimento de Babbitt, menor é a sua resistência à fadiga.

No caso do segundo maior desgaste, a amostra do ensaio E 0,23; R 0,69 pelo fato de possuir a menor espessura de revestimento, não liberou partículas de forma facilitada (melhor resistência à fadiga e a fratura frágil), porém apresentou grande deformação lateral e os

detritos gerados não incorporaram com facilidade na matriz macia exatamente pelo motivo da baixa espessura de revestimento (NORTON, 2013). Ou seja, camadas mais finas de revestimento de Babbitt apresentam baixa capacidade de incorporação e sendo assim, as partículas geradas provavelmente se tornaram partículas de desgaste e elevaram o desgaste em função da ocorrência de atrito de três corpos.

O ensaio E 1,08; R 0,47 apesar de ter usado a maior espessura de revestimento e ter apresentado o terceiro maior desgaste, não exibiu partículas de desgaste semelhantes às aquelas observadas no CP do ensaio E 1,08; R 1,29 e sim grande deformação plástica da fase macia de chumbo. Muito possivelmente o seu desgaste foi predominantemente adesivo em virtude da baixa rugosidade. Os outros CP's com baixa e média rugosidade também exibiram maior deformação da fase macia de chumbo em função de uma maior adesão.

Com relação aos ensaios que resultaram nos menores desgastes, se encontram como o terceiro e o segundo menor respectivamente, os CP's dos ensaios E 0,45; R 1,17 e E 0,23; R 1,24. Em ambos é perceptível sulcamento longitudinal nas pistas de desgaste, o que é indicativo de deformação plástica, porém sem grande remoção de material. Além disso, o ensaio E 0,23; R 1,24 possuía uma alta capacidade de suporte de carga normal em virtude da baixa espessura de revestimento (substrato suportando a carga), sem desgaste adesivo (somente deformação devido à alta rugosidade e pequena delaminação).

O ensaio E 0,45; R 0,43 foi aquele que obteve o menor desgaste entre todos os ensaios realizados e exibiu a pista menos larga. Por possuir baixa rugosidade, a sua superfície possuía menor quantidade de protuberâncias para serem removidas e este fator sobressaiu neste caso em relação à adesão.

A espessura de revestimento da liga influenciou nos ensaios para os três níveis de rugosidade utilizadas de três formas distintas. Quando se utilizou os corpos de prova com rugosidade R_a de menores valores, as espessuras menor e maior obtiveram maior volume de desgaste, enquanto a espessura intermediária para esta rugosidade exibiu o menor desgaste de todos os ensaios, FIG 4.23.

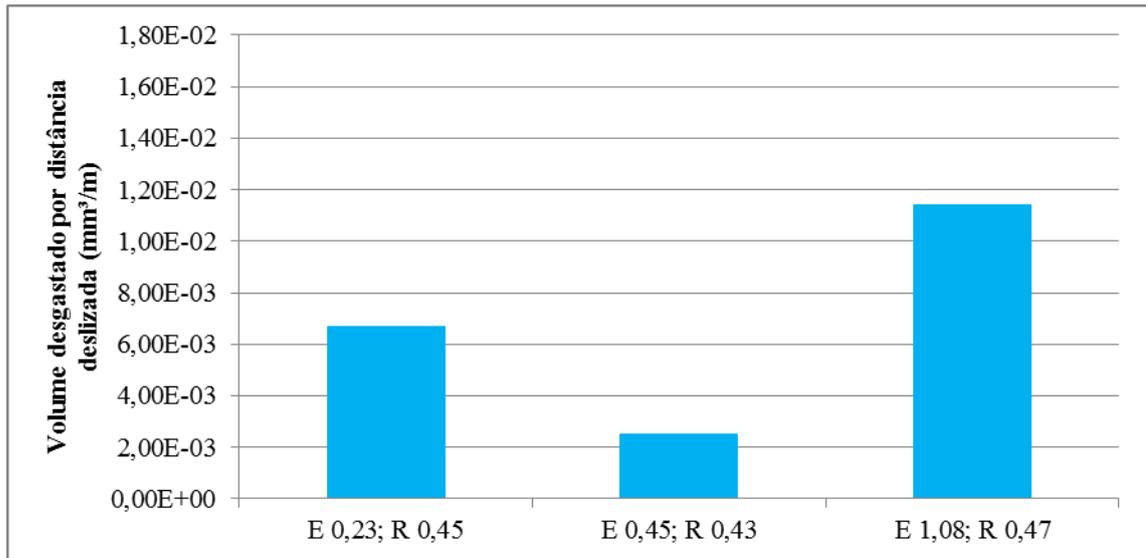


FIGURA 4.23 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os menores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

Ao ensaiar os corpos de prova com rugosidade Ra nos valores intermediários, o volume desgastado nos corpos de prova por distância deslizada durante o ensaio apresentou uma queda conforme se aumentava a espessura do revestimento, FIG 4.24. Enquanto os corpos de prova com as maiores rugosidades Ra, exibiram uma relação inversa à observada para a rugosidade intermediária, na qual o desgaste aumentou conforme se elevou a espessura do revestimento, destacando-se uma variação muito pequena da espessura de $0,23 \pm 0,05$ para $0,45 \pm 0,07$ mm (de $4,75 \times 10^{-3}$ mm³/m para $4,89 \times 10^{-3}$ mm³/m) e um aumento considerável para a maior espessura ($1,65 \times 10^{-2}$ mm³/m), FIG 4.25.

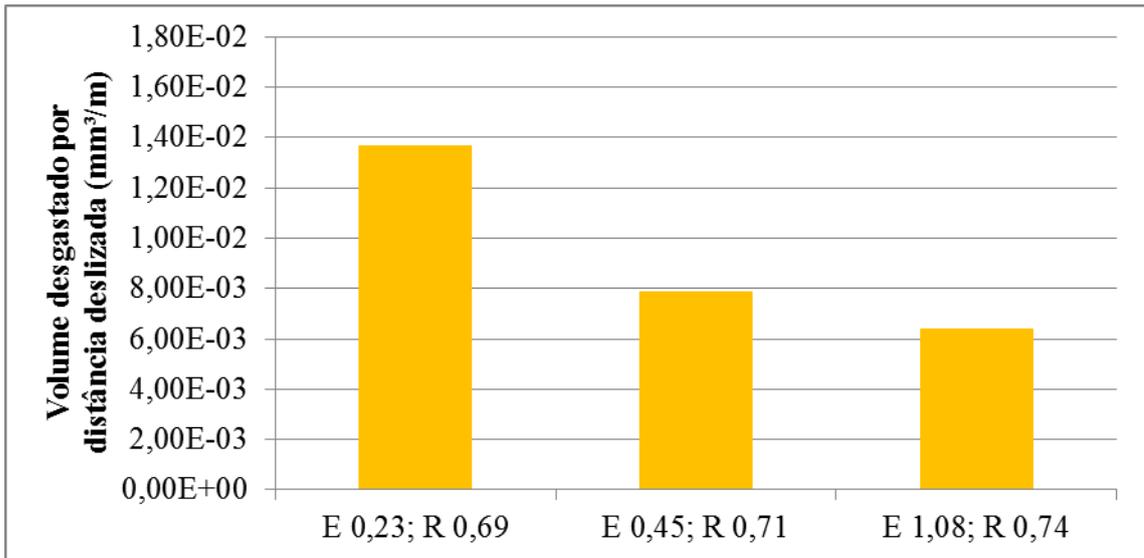


FIGURA 4.24 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os valores intermediários de rugosidade Ra na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

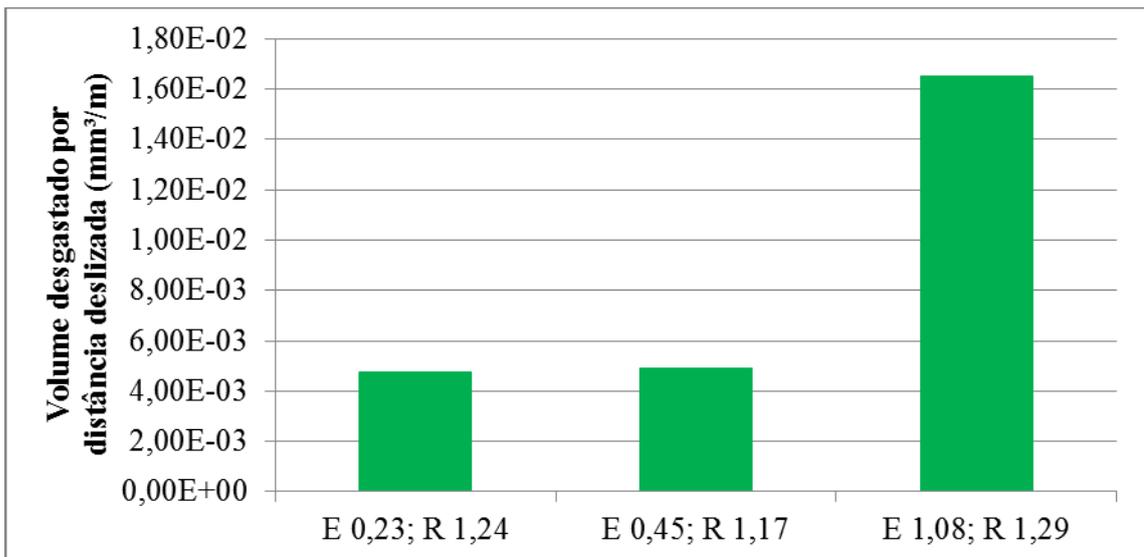


FIGURA 4.25 – Influência da espessura do revestimento no desgaste dos corpos de prova com os maiores valores de rugosidade Ra dentro na faixa estudada.

FONTE – O AUTOR

A FIG 4.26 apresenta em conjunto o resultado do desgaste de todos os ensaios de pino sobre disco, levando em consideração a modificação da espessura do revestimento para cada nível de rugosidade.

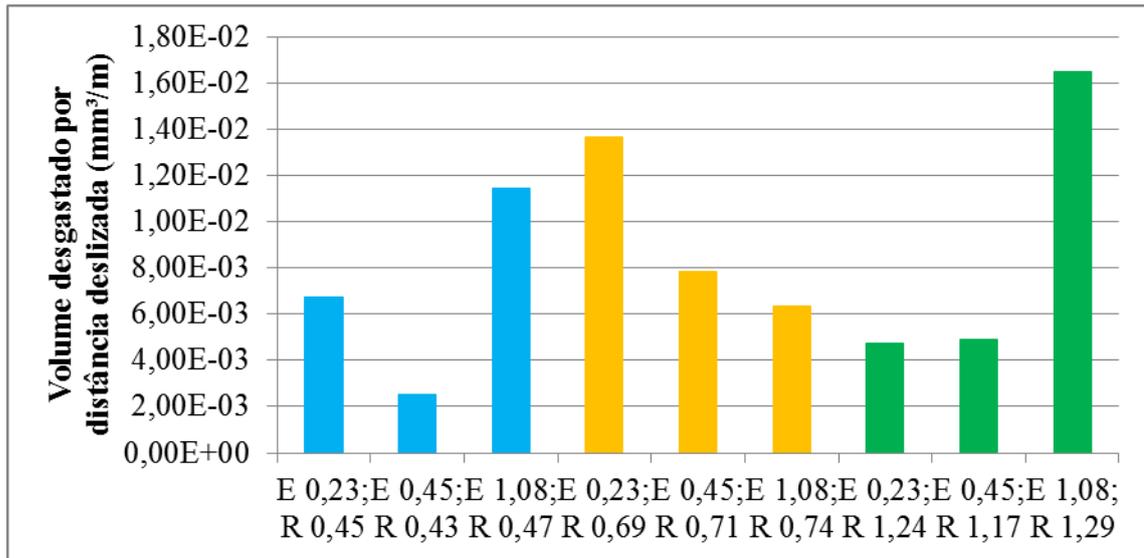


FIGURA 4.26 – Influência da modificação da espessura do revestimento no desgaste de todos ensaios de pino sobre disco.

FONTE – O AUTOR

4.4 Discussão

As amostras com maior rugosidade e com espessuras de revestimento menor e intermediária apresentaram valores relativos de desgaste e coeficiente de atrito muito baixos, o que pode ser justificado pelo o que foi encontrado por SEP et. al. (2017). Foi verificada a influência da rugosidade no desgaste de mancais de deslizamento e percebeu-se uma melhoria na resistência ao desgaste em superfícies mais rugosas. Isto se deu devido ao fato dos vales agirem como reservatório de óleo, além da ação de remoção das partículas de desgaste das zonas de contato, pois as mesmas tenderam a se deslocar para os vales, o que diminuiu a ocorrência de atrito de três corpos. Também se pode considerar a redução do desgaste adesivo e do atrito estático na partida do movimento, além do aumento do suporte de carga normal propiciados por uma maior rugosidade (AMANOV, 2016; ZHANG et al., 2016).

Por outro lado o ensaio que utilizou o disco que possuía o revestimento com maiores espessura e rugosidade exibiu o maior desgaste de todos. Isto pode ser explicado pelo fato do revestimento ser submetido ao suporte da carga normal incidente, quando aparece em espessuras elevadas (HUTCHINGS; SHIPWAY, 2017). Além disso, sabe-se que a presença de chumbo na liga em camadas de revestimento mais espessas, reduz a sua capacidade de carga. Korshunov et al. (2009), ainda sugerem nestes casos há ocorrência de deformação plástica severa em função do deslizamento do pino de aço sobre uma superfície relativamente

espessa de material de baixa resistência, o que tende a sulcar o material e reduzir a sua capacidade em resistir ao desgaste.

Nos ensaios nos quais os pinos de aço deslizaram sobre os CP's com rugosidade de revestimento com os menores valores, o coeficiente de atrito tendeu a se elevar, apresentando os maiores valores para os ensaios realizados sobre os CP's com maior espessura e menor espessura de revestimento, respectivamente. Isso pode ser justificado pelo grande aumento da área real de contato que ocorre em virtude da baixa altura das asperezas e propiciou grande atrito adesivo. Por sua vez o CP com a menor rugosidade e com espessura intermediária não seguiu esta tendência, possivelmente porque neste caso a espessura influenciou de forma mais considerável, e o coeficiente de atrito foi menor de acordo com o que é descrito por Hutchings; Shipway (2017), para estes casos (maiores coeficientes de atrito para as espessuras maiores e menores de revestimento).

Quando se analisa as amostras com maior espessura de revestimento, somente aquela que possui rugosidade intermediária apresentou valores mais baixos de coeficiente de atrito e de volume de desgaste, enquanto as amostras espessas e com rugosidade do revestimento com o maior e o menor valor situaram-se entre os maiores valores de coeficiente de atrito e desgaste, o que também segue aquilo que a teoria de Hutchings; Shipway (2017), traz sobre a influência da rugosidade no coeficiente de atrito e desgaste (ambos tendem a aumentar com a redução ou aumento da mesma) e sobre a espessura de revestimento (quanto maior a espessura do filme de revestimento, maior a tendência a este começar a ser solicitado no suporte da carga normal e conseqüentemente maior o coeficiente de atrito).

Nos ensaios pino sobre disco que foram realizados utilizando discos que possuem revestimento com menor espessura, foi observado que conforme houve aumento na rugosidade, o coeficiente de atrito reduziu, comportamento contrário ao apresentado por Eklund (2013), em relação à curva de Stribeck no regime de lubrificação misto.

5 CONCLUSÃO

A análise dos resultados da caracterização e dos ensaios de pino sobre disco de pinos de aço ABNT 1045 contra corpos de prova revestidos com Babbitt nos quais foram variadas a rugosidade e a espessura do revestimento, permite concluir:

Quanto à caracterização do revestimento e do substrato:

- A composição química observada difere daquela que foi informada pela empresa responsável pela aplicação do revestimento. A mesma apresentou uma quantidade elevada de chumbo.
- Foram observados poros, tanto no aço quanto no Babbitt e a possível presença de inclusões de óxido de alumínio remanescentes da etapa de deposição do revestimento, na interface e na microestrutura do Babbitt.
- Também foi possível observar uma região dendrítica no Babbitt que se formou possivelmente em virtude da alta taxa de resfriamento observada no processo de aspersão térmica.
- A microestrutura observada na região do substrato de aço é formada por uma matriz ferrítica e lamelas de perlita deformadas pela conformação sofrida pela chapa.

Quanto à análise dos resultados dos ensaios de pino sobre disco:

- O coeficiente de atrito do ensaio que utilizou o CP com espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17$ mm e rugosidade R_a de $0,47 \pm 0,01$ μm foi cerca de 9 vezes maior em relação ao ensaio com o CP de $0,45 \pm 0,07$ mm de espessura de revestimento e com a rugosidade R_a de $0,43 \pm 0,03$ μm . Sendo inclusive este primeiro, o ensaio que apresentou o maior coeficiente de atrito entre todos os ensaios, e o segundo o ensaio que apresentou os menores coeficiente de atrito e desgaste.
- A redução do coeficiente de atrito foi de 77 % quando foi diminuída a espessura de revestimento de $1,08 \pm 0,17$ mm para $0,45 \pm 0,07$ mm nos ensaios envolvendo os corpos de prova com as maiores rugosidades R_a dentro da faixa analisada ($1,29 \pm 0,20$ μm e $1,17 \pm 0,18$ μm , respectivamente).

- A variação do desgaste não foi significativa entre os ensaios com os corpos de prova com rugosidade Ra de maiores valores e espessuras de revestimento de $0,23 \pm 0,05$ e $0,45 \pm 0,07$ mm, porém aumentou cerca de 3 vezes quando se elevou a espessura de revestimento para $1,08 \pm 0,17$ mm nesta mesma faixa de rugosidade. Sendo este o ensaio que apresentou o maior desgaste.
- Na menor faixa de rugosidade trabalhada, o ensaio envolvendo o CP com espessura de revestimento de $0,45 \pm 0,07$ mm obteve um desgaste 78 % menor em relação ao CP de maior espessura de revestimento ($1,08 \pm 0,17$ mm).
- Os pinos de aço não apresentaram desgaste considerável.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresenta resultados de uma investigação de alguns parâmetros pré-selecionados. Contudo, propõe-se como possível sequência nesta linha de pesquisa:

- Avaliação da influência de outros parâmetros de rugosidade no comportamento de atrito de ligas Babbitt, uma vez que somente o parâmetro de rugosidade R_a muitas vezes não fornece informações suficientes sobre uma superfície e pode haver comportamentos distintos em atrito de deslizamento ou de rolamento entre duas superfícies que possuam o mesmo R_a . Os parâmetros indicados para serem avaliados nesse caso são a assimetria (R_{sk}) e o achatamento (R_{ku}) da superfície, para verificar a quantidade de picos e vales e as dimensões destes picos e vales, respectivamente.
- Adição de diferentes lubrificantes sólidos (Grafita, Bissulfeto de molibdênio – MoS_2 etc.) em diferentes quantidades ao Babbitt com o objetivo de reduzir coeficiente de atrito e desgaste para uma mesma espessura de revestimento e rugosidade.

REFERÊNCIAS

ABD EL-SALAM, F.; NADA, R. H.; ABD EL-KHALEK, A. M. Effect of Cu additions on the structural and mechanical properties of Sn-Zn alloy. **Materials Science and Engineering A**, v. 448, n. 1–2, p. 171–176, 2007.

Alcover Junior, P. R. C., 2017, “**MICROESTRUTURA, PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DE METAL PATENTE DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa.

Alcover Junior, P. R. C.; Pukasiewicz, A. G. M.; Bozza, G. M.; Torres, R. D. **PROPRIEDADES MECÂNICAS E TRIBOLÓGICAS DE METAL PATENTE DEPOSITADO POR ASPERSÃO TÉRMICA**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 9., 2016, Fortaleza.

Alcover Junior, P.R.C; Pukasiewicz, A. G. M. **ESTUDO COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS OBTIDAS EM LIGA DE METAL PATENTE DEPOSITADAS POR ASPERSÃO TÉRMICA ASP E POR CHAMA FS**. 12º CONGRESO IBEROAMERICANO DE INGENIERÍA MECANICA Guayaquil, 10 a 13 de Noviembre de 2015.

ALESHIN, N. P. et al. Plasma–powder application of antifrictional babbitt coatings modified by carbon nanotubes. **Russian Engineering Research**, v. 36, n. 1, p. 46–52, 2016.

Almeida, J. P. P., 2014, “**Revestimento de Chumaceiras com Ligas à Base de Estanho: Caracterização da interface e estudo da adesão do revestimento ao substrato**”, Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Universidade de Coimbra, Portugal.

AMANOV, A; AHN, B; LEE, M. G.; JEON, Y.; PYUN, Y. **Friction and Wear Reduction of Eccentric Journal Bearing Made of Sn-Based Babbitt for Ore Cone Crusher**. *Materials*, v. 9, p. 950-961, Nov. 2016.

American Society for Testing and Materials. ASTM B 23: **Standard Specification for White Metal Bearing Alloys (Known Commercially as “Babbitt Metal”)**. USA, 2000.

American Society for Testing and Materials. ASTM E384: **Standard Test Method for Knoop and Vickers Hardness of Materials**. USA. 2011.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM G 99 - 05: **Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus**. United States, 2010.

ASM International - American Society of Metals. **Friction, Lubrication and Wear Technology Handbook v. 18**. USA, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287: **Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 6508-1: Materiais metálicos – Ensaio de dureza Rockwell**. Rio de Janeiro. 2008.

BARYKIN, N. P.; FAZLYAKHMETOV, R. F.; VALEEVA, A. K. EFFECT OF THE STRUCTURE OF BABBIT B83 ON THE INTENSITY OF WEAR OF TRIBOCOUPINGS. v. 48, p. 88–91, 2006.

BARYKIN, N. P.; SADYKOV, F. A.; ASLANIAN, I. R. Wear and Failure of Babbitt Bushes in Steam Turbine Sliding Bearings. v. 9, n. February, p. 110–115, 2000.

Blau, P. J., 2008, **“Friction science and technology: from concepts to applications”**, Society of Tribologists and Lubrication Engineers, 2 ed., New York, United States, 420 p.

BOLOTOVA, L. K. et al. Structure and Properties of the B83 Babbitt Alloy Based Composite Materials Produced by Extrusion. v. 9, n. 3, p. 478–483, 2018.

BRANDI, S.D. **Revestimento duro por soldagem**. In: WAINER, E.; BRANDI, S.D.; MELLO, F.D.H. Soldagem: processos e metalurgia. São Paulo: Edgard Blucher, 2004. p.335-358.

CALLISTER JR, W. D; RETHWISCH, D. G. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

CARRETEIRO, Ronald P; BELMIRO, Pedro Nelson A. **Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás: Lubrificantes & lubrificação industrial**. 1 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2006, 504 p.

CARRETEIRO, Ronald P; MOURA, Carlos R. S. **Lubrificantes e Lubrificação**. 1 ed. São Paulo: Makron Books, 1998, 493 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedade das Ligas Metálicas**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986a, 266 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Materiais de Construção Mecânica**. 1 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1978. 359 p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica: Processos de Fabricação e Tratamento**. 2 ed. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1986b. 315 p.

DONG, Q. et al. Effects of Ag micro-addition on structure and mechanical properties of Sn-11Sb-6Cu. **Materials Science & Engineering A**, v. 722, n. January, p. 225–230, 2018.

DUARTE JUNIOR, Durval. **Tribologia, lubrificação e mancais de deslizamento**. 1 ed. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2005, 239 p.

EUTECTIC CASTOLIN. **Catálogo geral de aspersão térmica**. Disponível em <<http://www.eutectic.com.br/catalogos/catalogo-metalizacao-aspersao-termica.pdf>>. Acesso em 23 de out. 2018.

Eklund, Sofie., 2013, “**Roughness effect on friction and wear of lubricated plain bearings**”, Master’s Thesis, Master of Science in Engineering Technology Materials Technology, Lulea University of Technology Department of Engineering Sciences and Mathematics, Sweden.

GOUDARZI, M. M.; JAHROMI, S. A. J.; NAZARBOLAND, A. Investigation of characteristics of tin-based white metals as a bearing material. **Materials and Design**, v. 30, n. 6, p. 2283–2288, 2009.

Hutchings, I.; Shipway, P. “**Tribology: Friction and wear of engineering materials**”. 2. ed. London: Butterworth-Heinemann, 2017, 412 p.

ISHIHARA, S.; TAMURA, K.; GOSHIMA, T. Effect of amount of antimony on sliding wear resistance of white metal. **Tribology International**, v. 43, n. 5–6, p. 935–938, 2010.

JI, X.; CHEN, Y. Tribological Behavior of Babbitt Alloy Rubbing Against Si₃N₄ and Steel Under Dry Friction Condition. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 25, n. 3, p. 750–755, 2016.

KALASHNIKOV, I. E. et al. Local Elastic Moduli of Particle-Filled B83 Babbitt-Based Composite Materials Prepared by Powder Metallurgy Techniques. v. 52, n. 4, p. 473–478, 2016.

KALASHNIKOV, I. E. et al. Friction Surfaces and Wear Products of Sn – Sb – Cu-Based Composite Materials. v. 2018, n. 4, p. 377–382, 2018.

KAMAL, M. et al. Copper effects in mechanical properties of rapidly solidified Sn-Pb-Sb Babbitt bearing alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 530, n. 1, p. 327–332, 2011.

KEJELIN, N. Z.; ROEDEL, R.; PEREIRA, A. S.; PAMPLONA, A. S.; BUSCHINELLI, A. J. A. **APLICAÇÃO DA ASPERSÃO TÉRMICA E DA SOLDAGEM TIG COM ALIMENTAÇÃO DE ARAME PARA O REVESTIMENTO DE AÇOS C-Mn COM LIGAS A BASE DE NÍQUEL**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande.

Klaas, L. S., 2013, “**Estudo da viabilidade de obtenção do metal patente por metalurgia do pó e comparação do desgaste com liga fundida e bronze sinterizado**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville.

KOBELEVA, L. I. et al. Composite Granules of Tin Based Alloy. v. 7, n. 3, p. 395–401, 2016.

KORSHUNOV, L. G. et al. Effect of severe plastic deformation on the microstructure and tribological properties of a babbitt B83. **The Physics of Metals and Metallography**, v. 108, n. 5, p. 519–526, 2009.

LASHIN, A. R. et al. Study of some physical properties of the rapidly solidified Sn-Sb-Cu-Zn alloys. **Materials and Design**, v. 43, p. 322–326, 2013.

LASHIN, A. R.; MOSSA, M.; KAMAL, M. Indentation creep and mechanical properties of quaternary Sn – Sb based alloys. **Materials Science & Engineering A**, v. 528, n. 10–11, p. 3568–3572, 2011.

MANG, T; BOBZIN, K; BARTELS, T. **Industrial Tribology: Tribosystems, Friction, Wear and Surface Engineering, Lubrication**. Weinheim: Wiley-VCH, 2011, 644 p.

MARQUES, P. V. **Aspersão Térmica**, Infosolda, Rio de Janeiro, 1985. Disponível em <<http://www.infosolda.com.br/artigos/prosol05.pdf>>. Acesso em 10 de dez. 2018.

MIRANDA, E. C. DE et al. Avaliação do Uso do Tecimento sobre o Nível de Diluição e Geometria do Cordão de Solda na Soldagem TIG com Alimentação Automática de Arame Frio. v. 20, n. 2, p. 180–190, 2015.

NEVEZHIN, S. V et al. Effect of Production Methods on Tribological Characteristics of Babbitt Coatings. v. 33, n. 3, p. 190–194, 2012.

Norton, R.L., “**Projeto de máquinas: uma abordagem integrada**”, 2013, Bookman, 4 ed., Porto Alegre, Brasil, 1028 p.

POTEKHIN, B. A. et al. EFFECT OF CASTING METHODS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF TIN BABBIT. *Metal Science and Heat Treatment*. v. 51, n 8, p. 16-21, 2009.

Rodrigues, S. M. M. B., 2009, “**Desenvolvimento de Novos Produtos em Estanho**”, Dissertação de Mestrado, Instituto de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal.

SADYKOV, F. A. et al. Influence of the Structural State on Mechanical Behavior of Tin Babbit. v. 12, n. February, p. 29–36, 2003.

SEP, J. et al. The study on abrasive wear of grooved journal bearings. **Wear**, v. 376–377, p. 54–62, 2017.

SHACKELFORD, J. F. **Ciência dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.

ÜNLÜ, B. S. Determination of the tribological and mechanical properties of SnPbCuSb (white metal) bearings. **Materials Science**, v. 46, n. 4, p. 478–485, 2011.

VALEEVA, A. K. et al. On the mechanism of running-in during wear tests of a babbitt B83. **The Physics of Metals and Metallography**, v. 116, n. 5, p. 509–511, 2015.

VALEEVA, A. K.; VALEEV, I. S.; FAZLYAKHMETOV, R. F. Effect of structure of B83 babbitt on its wear. **Journal of Friction and Wear**, v. 35, n. 4, p. 311–315, 2014.

VALEEVA, A. K.; VALEEV, I. S.; FAZLYAKHMETOV, R. F. Microstructure of the β - Phase in the Sn11Sb5 . 5Cu Babbit. v. 118, n. 1, p. 51–54, 2017a.

VALEEVA, A. K.; VALEEV, I. S.; FAZLYAKHMETOV, R. F. On the wear rate of an Sn11Sb5.5Cu Babbitt. **Journal of Friction and Wear**, v. 38, n. 1, p. 53–57, 2017b.

Vale Júnior, E., 2016, “**Estudo de materiais alternativos para a remoção de compostos orgânicos de efluentes por oxidação anódica**”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

Williams, J. (2005). **Engineering Tribology**. Cambridge: Cambridge University Press.

WU, H. et al. **Friction and wear properties of Babbitt alloy 16-16-2 under sea water environment**. Tribology International, v. 44, n. 10, p. 1161–1167, 2011.

ZEEMANN, Annelise. **Diluição**, Infosolda, Rio de Janeiro, 2003. Disponível em: <<http://www.infosolda.com.br/artigos/metsol06.pdf>>. Acesso em 05 de jan. 2019.

ZEREN, A. Embeddability behaviour of tin-based bearing material in dry sliding. **Materials and Design**, v. 28, n. 8, p. 2344–2350, 2007.

ZHANG, D. et al. Tribological properties of Tin-based Babbitt bearing alloy with polyurethane coating under dry and starved lubrication conditions. **Tribology International**, v. 90, p. 22–31, 2015.

ZHANG, D. et al. Study on tribological properties of multi-layer surface texture on Babbitt alloys surface. **Applied Surface Science**, v. 390, p. 540–549, 2016.

ZHOU, F. Microstructure and tribological behavior of tungsten inert gas welding arc brazing tin-based babbitt. **Rare Metals**, 2017.

ANEXO A

Composição química informada para o Babbitt utilizado na deposição



SOFT METAIS LTDA.

Av. João Ferreira Penna, 281 - Distrito Industrial III

14707-002 - Bebedouro - SP

Fone: (17) 3344 8000 DDG 0800 1000 52

Internet: www.softmetais.com.br e-mail: gq@softmetais.com.br

Cliente:	METALCROMO METALIZAÇÃO E CROMO DURO IND LTDA.	
Produto:	MP85.W01	Sn 85 x Sb 10 x Cu 5
NF:	63421	23/11/2016
Lote:	2607	Validade: Indeterminada
Quantidade:	50g	

Análise do lote			
% Sn	Estanho	%	dif
% Pb	Chumbo	%	0,0651
% Sb	Antimônio	%	10,3
% Cu	Cobre	%	5,3
% Fe	Ferro	%	0,0060
% Zn	Zinco	%	0,001
% As	Arsênio	%	0,0061
% Bi	Bismuto	%	0,0073
% Cd	Cádmio	%	0,0006
% Al	Alumínio	%	<0,0005

Especificação			
% Sn	Estanho	%	Diferença
% Pb	Chumbo	%	Máx. 0,35
% Sb	Antimônio	%	9 a 11
% Cu	Cobre	%	4 a 6
% Fe	Ferro	%	Máx. 0,08
% Zn	Zinco	%	Máx. 0,005
% As	Arsênio	%	Máx. 0,10
% Bi	Bismuto	%	Máx. 0,08
% Cd	Cádmio	%	Máx. 0,05
% Al	Alumínio	%	Máx. 0,005