

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

JOSÉ FERNANDO BATISTA JUNIOR

**ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE UMA LIGA DE
BRONZE AO CHUMBO VIA ROTA DE METALURGIA DO PÓ**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

LONDRINA

2019

JOSÉ FERNANDO BATISTA JUNIOR

**ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE UMA LIGA DE
BRONZE AO CHUMBO VIA ROTA DE METALURGIA DO PÓ**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcio Andreato
Batista Mendes

LONDRINA

2019



TERMO DE APROVAÇÃO

JOSÉ FERNANDO BATISTA JUNIOR

ESTUDO DO REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS DE UMA LIGA DE BRONZE AO CHUMBO VIA ROTA DE METALURGIA DO PÓ

Trabalho de conclusão de curso apresentado no dia 22 de agosto de 2019 como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Márcio Andreato Batista Mendes
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof. Dr. Odney Carlos Brondino
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)

Prof^a. Dr^a. Silvia Midori Higa
(UTFPR – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais)
Coordenadora do Curso de Engenharia de Materiais

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso.”

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos meu pais e irmã que confiaram a mim a capacidade de concluir o curso de Engenharia de Materiais, dando apoio de todas as maneiras; A minha namorada que além de motivação proveu ensinamentos na área de pesquisa, e aos amigos do curso que compartilharam os desafios dessa etapa de maneira descontraída.

Agradeço ao meu Orientador Marcio Andreato e aos demais professores da UTFPR Londrina que compartilharam ideias, conhecimento, ensinaram e cederam recursos para construção desse trabalho.

Agradeço ao Departamento de Física da UEL, em especial ao técnico Paulo Rogério responsável pelo laboratório de Filmes Finos e Materiais, pela disponibilização do forno tubular, qual foi imprescindível para esse estudo.

RESUMO

BATISTA Jr., J. F. **Estudo do Reaproveitamento de Cavacos de Uma Liga de Bronze ao Chumbo Via Rota de Metalurgia do Pó.** 2019. 47 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Londrina, 2019.

Devido às questões ambientais bastante discutidas atualmente, métodos alternativos de reaproveitamento de cavacos vêm sendo tema de pesquisas com o objetivo de reduzir perdas nas rotas de processamento de metais e criar vias alternativas de processamento, geralmente utilizando rotas da metalurgia do pó e da conformação à quente. Em processos de usinagem perde-se grande quantidade de material na forma de cavacos, que na maioria das vezes são reciclados por meio da refusão, porém esse processo apresenta perdas de material devido às reações de oxidação entre o metal e constituintes atmosféricos, além de ter um custo operacional alto. Diante dessa problemática, este trabalho consiste em um estudo do reaproveitamento de cavacos de uma liga de cobre ao chumbo, resultante de um processo de usinagem convencional de torneamento. Por meio da moagem mecânica dos cavacos em um moinho de jarros de escala laboratorial, obteve-se partículas em faixas de tamanhos micrométricas. Para fim de análise microestrutural do cavaco e do pó obtido, ambos foram submetidos à técnica de difração de raios X, enquanto que para análise morfológica e química do pó empregou-se a técnica de MEV/EDS. A pré-consolidação do pó obtido foi feita por meio de prensagem uniaxial e a consolidação final das amostras por meio de sinterização, em forno de atmosfera controlada e não controlada. A análise de densificação das amostras foram feitas realizando ensaio de Arquimedes e as propriedades mecânicas determinadas pelo ensaio de compressão uniaxial. Concluiu-se que a sinterização em temperaturas acima de 800 °C não foi favorável para o tipo de liga estudada e a sinterização em fornos de atmosfera oxidante resultou em um material de baixa resistência e comportamento frágil. Além disso, no caso das amostras submetidas a sinterização em atmosfera inerte, foi possível constatar a formação de fase líquida de chumbo durante a sinterização devido à precipitação de chumbo na superfície das amostras na forma de gotículas, e, no caso da sinterização em atmosfera oxidante, verificou-se por meio de estereoscopia que houve segregação de fases ao longo material.

Palavras-chave: Cavacos de usinagem. Metalurgia do pó. Liga de cobre ao chumbo.

ABSTRACT

BATISTA Jr., J. F. **Study of the reaprovement of leaded bronze chips through the route of metalurgy of powder.** 2019. 30 f. Course conclusion work – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019.

Due to environmental issues much discussed recently, alternative methods of chip reuse have been the subject of research, with the aim of reducing losses in metal processing routes and creating alternative ways of obtaining raw material for powder metallurgy and hot forming routes. In machining processes, a large amount of material is lost in the form of chips, which are mostly recycled by melting, but this process has material losses and a high operating cost. In view of this problem, this work proposes a study of the reuse of chips from a leaded copper alloy, resulting from a conventional machining process. Applying mechanical milling in a jar mill, particles were obtained in bands of micrometric sizes and for the purpose of microstructural analysis of the chip and the powder obtained both were submitted to X ray diffraction, whereas for morphological and chemical analysis of the powder the MEV / EDS technique was used. The samples were compacted by uniaxial pressing and sintered in controlled atmosphere furnace also in no controlled atmosphere. The Arquimedes test was applied on sintered material to determine the densification, and to obtain the mechanical properties a compression test was applied. The sinterization made on controlled atmosphere furnace was not efficient, the samples got green compact properties, hence there was not possible to proceed with the tests, the material submitted on no controlled atmosphere furnace get brittle e low strength, but there was possible do apply tests on it. The liquid phase was detected and it must be the cause of the inefficient sintering process.

Keywords: Machinning chips. Powder Metallurgy. Leaded Bronze

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Cavacos da liga de cobre estudada.	15
Figura 2 - MEV das partículas de cavaco de bronze ao alumínio submetido à moagem juntamente com NbC por 50 h com aumento de 200X (a) e 6300X em (b).....	17
Figura 3 - Microestruturas dos cilindros de cavacos extrudados obtidos por meio de compactação à frio (a) e à quente (b).	18
Figura 4 - Fluxograma resumido do processo de M/P.....	19
Figura 5 - Diagrama de fase esquemático da liga Cu-Pb.....	21
Figura 6 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.....	24
Figura 7 - Cavacos de bronze logo após cominuição.....	25
Figura 8 - Amostra prensada pronta para sinterização.	27
Figura 9 - Etapas do processo de sinterização.	28
Figura 10 - Segunda sinterização em atmosfera inerte.....	29
Figura 11 - Sinterização em atmosfera oxidante em forno mufla.	30
Figura 12 - Micrografia do cavaco da liga de bronze ao chumbo. Ataque com solução ácida de cloreto férrico (a). Micrografia de uma liga de cobre ao chumbo C93700.....	33
Figura 13 - Difratoograma do cavaco de bronze como recebido.....	34
Figura 14 - Gráfico de peneiramento onde destaca-se o tamanho médio das partículas (d50).	35
Figura 15 - Faixa de tamanho do pó obtido com a moagem dos cavacos de bronze.	36
Figura 16 - Micrografia (MEV) do pó obtido com aumento 200X (a) e 45X (b). 37	
Figura 17 - Comparação entre difratogramas do cavaco antes e após moagem.	38
Figura 18 – Fase de chumbo precipitada na forma de gotículas na superfície das amostras.....	40
Figura 19 - Amostras sinterizadas em atmosfera oxidante.	41
Figura 20 - Estereoscopia da amostra sinterizada em atmosfera oxidante.....	42
Figura 21 - Curva tensão-deformação do ensaio de compressão das amostras sinterizadas em atmosfera oxidante (a) curva tensão deformação de liga de bronze ao alumínio.....	45

Figura 22 - Cronograma dos procedimentos experimentais utilizado..... 48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição da liga estuda e da liga UNS C98840 (% em massa). 38	
Tabela 2 - Valores médios das densidades calculadas..... 43	
Tabela 3 - Valores dimensionais das amostras antes e depois da sinterização ao ar. 44	

LISTA DE SIGLAS

UNS	<i>Unified Numbering System</i>
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
SLPS	<i>Supersolidus Liquid Phase Sintering</i>
PLPS	<i>Permanent Liquid Phase Sintering</i>
DRX	Difração de raios X
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
DAEMA	Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (UTFPR-LD)
UTFPR-LD	Universidade Tecnológica Federal do Paraná-Londrina
LCE	Laboratório de Caracterização Estrutural
DEMa	Departamento de Engenharia de Materiais
UFSCAR	Universidade Federal de São Carlos
UEL	Universidade Estadual de Londrina
NBR	Norma Brasileira
CR	Como recebido
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
OFC	Ortorrômica de Fase Centrada
CS	Cúbica Simples
CFC	Cúbica de Fase Centrada
UNS	Unified Numbering System

LISTA DE ABREVIações

M/P	Metalurgia do Pó
NbC	Carbeto de Nióbio
VC	Carbeto de Vanádio
Sn	Estanho
Fe	Ferro
Zn	Zinco
Cu	Cobre
LTDA	Limitada
λ	Comprimento de Onda
ρ_v	Densidade a verde
m	Massa da amostra a verde
V	Volume da amostra a verde
d	Diâmetro da amostra a verde
h	Altura da amostra a verde
ρ_A	Densidade aparente
m_s	Massa da amostra seca
m_u	Massa da amostra úmida
m_i	Massa da amostra imersa em água
$\rho_{\text{água}}$	Densidade aproximada da água
ρ_T	Densidade teórica do material CR
ϵ_A	Fração volumétrica aparente de poros
d_{50}	Tamanho médio de partícula
Cu_3Sn	Fase intermetálica
Pb	Chumbo
at%	Porcentagem atômica
wt%	Porcentagem mássica
h	Horas
min	Minutos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS	12
1.1.1 Objetivo geral	12
1.1.2 Objetivos específicos	12
1.2 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 FORMAÇÃO DO CAVACO NO PROCESSO DE USINAGEM	14
2.2 REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS	15
2.3 REAPROVEITAMENTO DE CAVACOS VIA REAÇÃO NO ESTADO SÓLIDO	16
2.4 METALURGIA DO PÓ	18
2.5 COMINUIÇÃO MECÂNICA DE PARTÍCULAS METÁLICAS	19
2.6 LIGAS DE BRONZE AO CHUMBO	20
2.7 SINTERIZAÇÃO COM FORMAÇÃO DE FASE LÍQUIDA	21
3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO	23
3.1 MATERIAIS	23
3.2 MÉTODOS	23
3.2.1 Análise metalográfica do cavaco de bronze ao chumbo	24
3.2.2 Cominuição dos cavacos	25
3.2.3 Classificação granulométrica	26
3.2.4 Análise de difração de raios X.....	26
3.2.5 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)	26
3.2.6 Compactação uniaxial	27
3.2.7 Sinterização	28
3.2.7 Ensaio de Arquimedes e determinação de densidade a verde	30
3.2.8 Ensaio de compressão uniaxial.....	31
3.2.9 Estereoscopia	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 ANÁLISE MICROESTRUTURAL DO CAVACO DE BRONZE AO CHUMBO	33
4.2 CLASSIFICAÇÃO GRANULOMÉTRICA E CARACTERIZAÇÃO DO PÓ	34
4.1.1 Tamanho médio de partícula e rendimento de moagem	34

4.1.2 Análise morfológica e microestrutural do pó	36
4.1.3 Análise química da liga de bronze ao chumbo	38
4.3 SINTERIZAÇÃO	39
4.3.1 Amostras sinterizadas em atmosfera inerte	39
4.3.2 Amostras sinterizadas em atmosfera oxidante	41
4.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE APARENTE E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DE POROS	43
4.5 ENSAIO DE COMPRESSÃO AXIAL	44
5 CONCLUSÃO	46
6 TRABALHOS FUTUROS	47
7 CRONOGRAMA	48

1 INTRODUÇÃO

Indústrias do setor metal mecânico que empregam processos de usinagem convencional, como o torneamento e o fresamento, em sua linha de produção, geram uma quantidade expressiva de sucata metálica na forma de cavacos, e para cumprir responsabilidades ambientais e reduzir custos de produção, os cavacos são separados e destinados à reciclagem. A refusão dos cavacos tem sido o método de reciclagem mais empregado, porém atualmente pesquisadores buscam técnicas alternativas que possibilitem um maior rendimento e que causem menos danos ao meio ambiente. O reaproveitamento dos cavacos empregando processamentos não convencionais, como a metalurgia do pó e a extrusão a quente, vem sendo estudado visando o entendimento da influência dos parâmetros de processamento nas propriedades do produto final obtido por meio desses métodos. Essa preocupação de reaproveitamento se estende a ligas ferrosas ou não.

Ligas de cobre são ligas que possuem elementos de liga em sua composição em várias proporções, resultando em uma variedade de ligas disponível no mercado. No geral, ligas de cobre possuem boa conformabilidade devido a boa ductilidade do cobre, boa condução térmica, boa resistência ao desgaste e boa resistência a corrosão quando comparadas aos aços comuns. Essas ligas são utilizadas na fabricação de válvulas, conexões hidráulicas, buchas auto lubrificantes, entre outras peças que requerem as propriedades citadas. Peças de ligas de bronze são fabricadas tanto por meio da usinagem quanto da fundição, forjamento, conformação à quente e à frio, e metalurgia do pó (M/P), porém peças como buchas auto lubrificantes são fabricadas via M/P visto que, para ser auto lubrificante é necessária o controle de poros.

O processamento via rota da metalurgia do pó ocupa cada vez mais espaço no setor metal mecânico. As peças obtidas por M/P apresentam propriedades satisfatórias, senão melhores comparando às outras rotas de processamento, possuem bom acabamento superficial, e eliminam processos de acabamento como a usinagem. Algumas características, como controle de porosidade, requerida em algumas aplicações, são exclusivas de peças sinterizadas. A M/P apresenta limitações em alguns aspectos, como na

dimensão e na geometria possível de ser fabricada. Outra limitação é o custo, sendo que os equipamentos empregados na rota de processamento, como as matrizes, prensas e fornos de atmosfera controlada, podem encarecer o processo assim como a obtenção da matéria-prima empregada; portanto, a viabilidade do emprego da M/P depende, dentre outros fatores, do número de peças a serem fabricadas.

Com base no que foi apresentado e em fundamentos teóricos presentes nas sessões posteriores, neste trabalho propôs-se o reaproveitamento dos cavacos de uma liga de cobre ao chumbo gerados no processo de torneamento, com objetivo de trazer novas perspectivas a respeito desse tema e contribuir no desenvolvimento de estudos futuros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O presente trabalho visa o reaproveitamento dos cavacos de usinagem convencional da liga de bronze ao chumbo de composição próxima à norma UNS C98840, por meio da rota de processamento e manufatura da metalurgia do pó.

1.1.2 Objetivos específicos

- Redução do tamanho dos cavacos por meio de moagem mecânica para obter partículas de dimensões micrométricas;
- Análise da composição e da morfologia do pó obtido por meio de técnicas de análise química e microscópica;
- Consolidação do pó obtido por meio da compactação uniaxial e da sinterização;

- Análise das propriedades mecânicas de resistência à compressão e densificação das amostras sinterizadas.

1.2 Motivação e justificativa

A implementação de normas ambientais vem sendo utilizada como estratégia de mercado pelas grandes empresas, e a destinação inteligente de sucatas e rejeitos faz parte desse processo de responsabilização ambiental. Como resultado disso, surge um grande número de pesquisas que buscam aplicações tecnológicas para sucatas e rejeitos de processos industriais. Nesse quesito, a engenharia de materiais se destaca, já que esse processo consiste em associar a microestrutura, propriedades e aplicação dos materiais.

O ganho energético da reciclagem de metais, como o cobre e o alumínio, pode ultrapassar 85%, ou seja, a energia para processar tais materiais a partir de técnicas de reciclagem equivale a 15% da energia para processar esses mesmos materiais a partir de fontes primárias (PADILHA, 2000).

Dessa forma, o presente trabalho de conclusão de curso se justifica por trazer novas perspectivas com relação as técnicas de reaproveitamento de cavacos por meio de reações no estado sólido e contribuir com estudos futuros sobre esse tema.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Formação do cavaco no processo de usinagem

No processo de torneamento, os cavacos são formados como resultado da deformação do material usinado, que por fim resulta em sua ruptura. O processo de formação do cavaco é dividido em etapas, onde na primeira etapa ocorre a penetração do gume cortante da ferramenta no material, fazendo com que parte do material ainda unido a peça seja pressionado contra a superfície de saída da ferramenta. Na segunda etapa, ocorre inicialmente a deformação elástica do material, e logo depois a deformação plástica, que aumenta até atingir a ruptura do material, ocorrendo majoritariamente por cisalhamento. Os cavacos podem ser classificados quanto a sua continuidade: contínuos, descontínuos e segmentados; já o tipo do cavaco dependerá principalmente da ductilidade da liga, de como é feito o avanço da ferramenta e da velocidade de corte da operação (MACHADO et al., 2015). Os tipos podem ser: curto, longo ou de fácil usinagem. Os cavacos curtos são característicos de ligas multifásicas, apresentam formatos curvos e são frágeis. Cavacos longos são característicos de ligas monofásicas, são contínuos e levemente curvados. Cavacos de fácil usinagem são fragmentados e frágeis, característicos de ligas de cobre que contém chumbo em sua composição, elemento esse que reduz a ductilidade dessas ligas mas, sem influenciar tanto no limite de resistência, tornando possível usinar essas ligas em altas velocidade de corte (ASM ESPECIALTY HANDBOOK, 2001, p.265).

Devido às características do cavaco depender de vários fatores, nem sempre apresentará homogeneidade em sua forma, como pode ser observado na Figura 1. Nota-se na imagem a presença de cavacos curtos e curvos, ambos obtidos do mesmo processo de usinagem de uma liga de bronze ao chumbo.

Figura 1 – Cavacos da liga de cobre estudada.



Fonte: Autoria própria.

2.2 Reaproveitamento de cavacos

O método mais comum de reaproveitamento de cavacos é por meio da sua reciclagem, que consiste na refusão dessa sucata em grandes quantidades, seja para obter a liga original ou para acerto de composição de outras ligas, porém, no processo de refusão ocorre a oxidação do metal devido às altas temperaturas, causando perda de parte do material fundido. Outros fatores negativos da refusão são os altos custos de mão de obra e os gastos com proteção ambiental necessários, devido à produção de fumos durante o processo. Também é importante destacar que a energia empregada nos processos de fundição são altas, contribuindo para um alto custo final desse processo (GRONOSTAJSKI; MATUSZAK, 1999).

Pesquisadores vêm apresentando procedimentos de reaproveitamento que se baseiam em reações de estado sólido, onde não ocorre a refusão dos cavacos. Dentre esses métodos estão os processos de metalurgia do pó e os de conformação a quente: laminação e extrusão. Hoje já é possível encontrar pesquisas desse tema que empregam ligas de titânio, magnésio, alumínio e ligas ferrosas (AFSHARI; GHAMBARI, 2016).

STEFAN et al. (2015), realizaram um trabalho com o objetivo de reaproveitar cavacos de usinagem de uma liga de bronze com 10 wt% Pb, por meio de procedimentos da metalurgia do pó. Para reduzir os cavacos a pó, realizaram a moagem mecânica em moinho planetário, e para pré-consolidar as amostras, utilizaram prensagem uniaxial. As amostras foram sinterizadas em forno elétrico de atmosfera inerte de argônio em temperatura de 820 °C por 40 min. O material sinterizado teve suas propriedades de dureza e coeficiente de fricção testadas. Os valores médios das propriedades foram próximos aos valores de uma liga de bronze sinterizada feita do pó de mesma composição, porém de origem comercial.

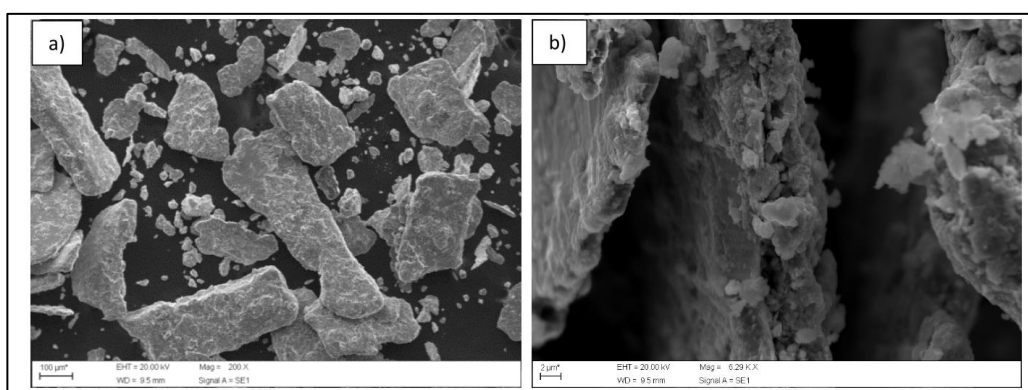
A aplicação das técnicas citadas utilizando cavacos de ligas de cobre com maior importância econômica também vem sendo investigada, como, por exemplo, em ligas de bronze ao alumínio. Em alguns casos, principalmente quando o objetivo é obter um compósito, aditivos são misturados ao cavaco como fase de reforço, como os carbetos, e, em outros casos, o cavaco é processado sozinho após passar por um tratamento de cominuição mecânica. Segundo Gronostajski e Matuszak (1999), a conversão direta, ou seja, sem aplicar a refusão, de cavacos de alumínio em produtos acabados economiza em torno de 40% de material, 26% a 31% de energia e 16% dos gastos com mão de obra.

2.3 Reaproveitamento de cavacos via reação no estado sólido

O reaproveitamento de cavacos por meio das técnicas de reação de estado sólido é geralmente estudado em ligas que possuem alta importância econômica, como as ligas de alumínio aeronáuticas e as de cobre ao alumínio, porém também se estuda a aplicação dessas técnicas em ferros fundidos e aços. No trabalho desenvolvido por Dias (2018), foi estudado o reaproveitamento de cavacos de usinagem de uma liga de bronze ao alumínio por meio da moagem de alta energia, compactação e sinterização. Em seu estudo foi utilizado um moinho planetário de alta energia, com uma proporção massa/esfera de 1:20 e com adição de NbC e VC com a finalidade de aumentar a eficiência da moagem

dos cavacos e servir como fase de reforço no produto acabado. Como aditivo de moagem, foi utilizado ácido esteárico para evitar formação de óxidos e diminuir o efeito de solda fria. Foram aplicados tempos de moagem de 10, 30, 50, 70 e 100 h e obteve-se partículas com tamanho médio entre 193 μm e 39 μm . Na Figura 2 é mostrado a microscopia eletrônica de varredura (MEV) das partículas obtidas pelo autor.

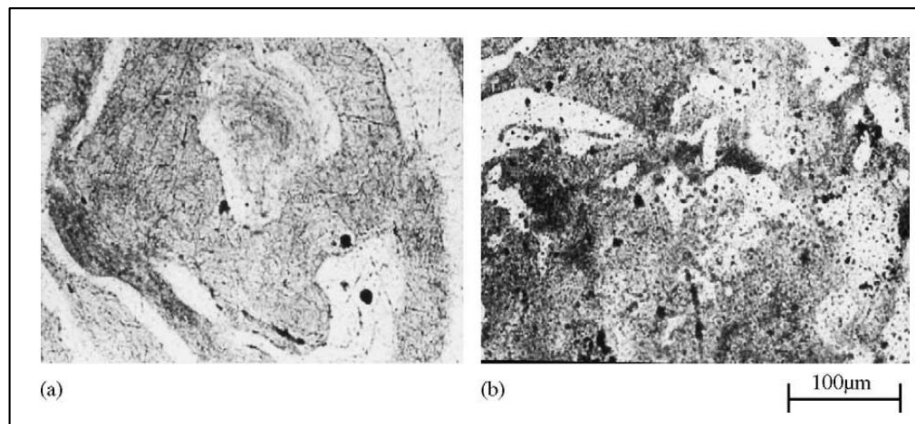
Figura 2 - MEV das partículas de cavaco de bronze ao alumínio submetido à moagem juntamente com NbC por 50 h com aumento de 200X (a) e 6300X em (b).



Fonte: Adaptado de Dias (2018).

Algumas rotas de reaproveitamento direto não aplicam a moagem dos cavacos, sendo que, para isso, os cavacos são processados por meio de conformação a quente, como, por exemplo, via extrusão a quente. Fogagnolo et al. (2003) compararam duas estruturas feitas por meio da extrusão a quente de dois cilindros, sendo um deles obtido por compactação dos cavacos à frio e o outro pela compactação dos cavacos a quente, realizado a 500°C por 50 min. Na micrografia que consta na Figura 3 é possível notar que o processo de extrusão não foi capaz de homogeneizar as fases formadas, identificadas por contrastes diferentes.

Figura 3 - Microestruturas dos cilindros de cavacos extrudados obtidos por meio de compactação à frio (a) e à quente (b).

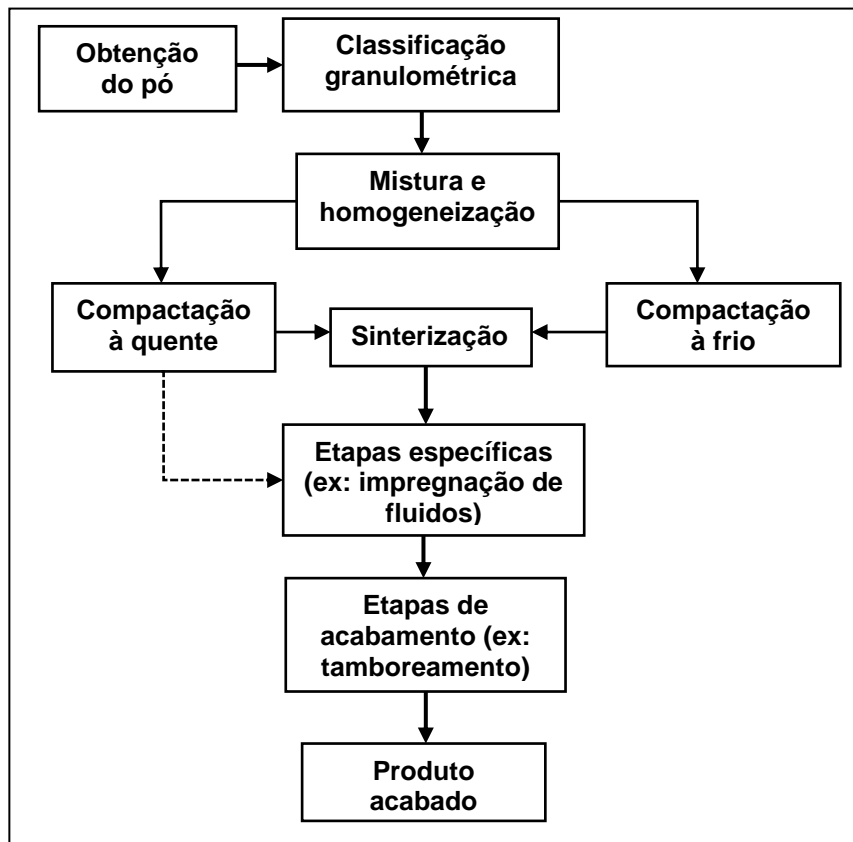


Fonte: Adaptado de Fogagnolo et al. (2003)

2.4 Metalurgia do pó

A metalurgia do pó é uma rota de processamento de peças metálicas que utiliza como matéria prima ligas metálicas em pó, pós elementares e fases de reforço, como carbetos. A consolidação da matéria prima no formato final da peça se dá por meio de uma reação em estado sólido conhecida como sinterização. Em casos onde há a adição de pós com baixo ponto de fusão, a sinterização pode ocorrer com formação de fase líquida. A M/P vem se destacando frente a outras rotas de processamento devido a algumas características como: produzir peças próximo da geometria final (*near net shape*), reduzindo ou eliminando a necessidade do processo de usinagem, excelente acabamento superficial, controle de porosidade, permitindo assim a produção de peças auto lubrificantes, alto controle dimensional a longo prazo, processo ecológico e energeticamente eficiente, apresentando perdas inferiores a 5% da matéria prima inicial (ANTÔNIO; PALLINI, 2006). A Figura 4 apresenta um fluxograma resumido da rota de M/P.

Figura 4 - Fluxograma resumido do processo de M/P.



Fonte: Adaptado de Chiaverini (2001).

2.5 Cominuição mecânica de partículas metálicas

Para que os cavacos possam ser reduzidos à pó sem que seja empregado o processo de refusão e atomização aplica-se métodos de cominuição mecânica, ou seja, reduz-se o tamanho dos cavacos submetendo-os a uma série de impactos com corpos moedores em equipamentos conhecidos como moinhos. Os parâmetros do processo de moagem que irão influenciar no processo de cominuição mecânica são: o tempo de moagem, tempo que leva para que os cavacos sejam reduzidos a pó de uma determinada faixa de tamanho, esse tempo depende do tipo e dimensão do moinho e pode ser bem extenso; proporção mássica entre corpos moedores e cavacos; velocidade de moagem, esse parâmetro depende da dimensão do moinho e está ligado

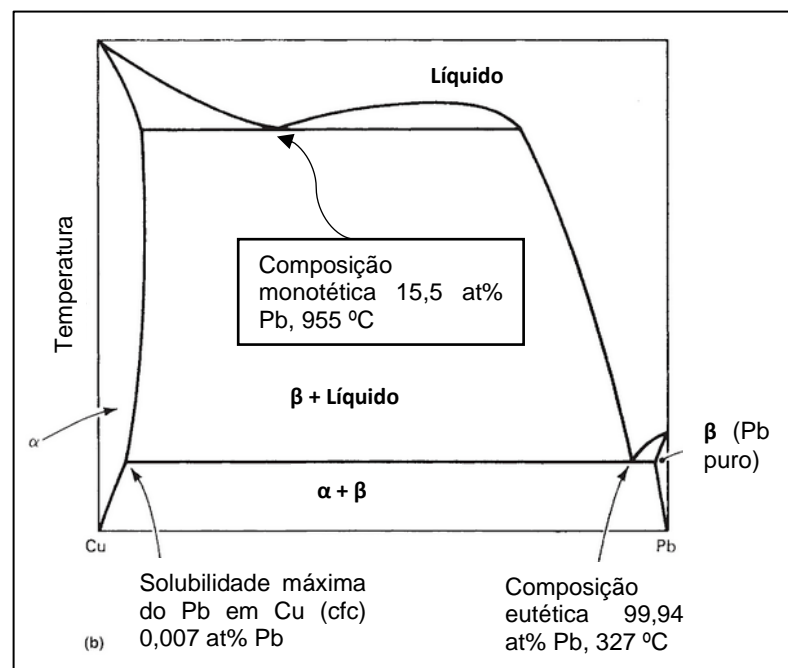
diretamente à eficiência da moagem. A atmosfera do moinho pode ser controlada com gases inertes quando deseja-se evitar reações durante o processo, e pode-se utilizar fluidos refrigerantes para controlar a temperatura da câmara evitando que ocorra aglomeração das partículas. Em relação ao método de atomização a moagem mecânica pode produzir pós de tamanhos menores, partículas de morfologia achatada, densidade e fluidez diferentes. O encruamento das partículas é característico desse tipo de cominuição e dependendo da liga submetida a esse procedimento pode ocorrer a produção fora do equilíbrio de fases metaestáveis tais como ligas amorfas, extensas soluções sólidas e estruturas nanocristalinas (ASM HANDBOOK VOL. 7, 1998, p. 134).

O grau de densificação após a sinterização é influenciado diretamente pela superfície de contato entre partículas que é inversamente proporcional ao tamanho da partícula, portanto um tempo de moagem estendido parece ser a maneira mais eficiente de obter partículas em tamanhos adequados para uma um alto grau de densificação do material sinterizado, entretanto em moagem de partícula metálicas deve-se considerar dois fatores que contradizem esse raciocínio. O primeiro se trata da aglomeração de partículas devido soldas frias que ocorrem durante o impacto entre partículas, e o achatamento das partículas que ocorrem devido à ductilidade das ligas metálicas. Esses fatores contribuem para diminuição da superfície de contato entre partículas (ASM HANDBOOK VOL. 7, 1998, p. 143).

2.6 Ligas de bronze ao chumbo

Ligas de bronze ao chumbo possuem resistência a corrosão e resistência mecânica moderada quando comparadas às outras ligas de cobre. Devido ao chumbo em sua estrutura, essas ligas possuem boa usinabilidade e boa resistência ao desgaste, pois, tais ligas possuem elementos de ligas, como o Sn, Fe, Zn, entre outros (ASM ESPECIALTY HANDBOOK, 2001, p.92). O chumbo apresenta baixa solubilidade na matriz de cobre, como é ilustrado no diagrama de fases da Figura 5, sendo que esse elemento se precipita na estrutura cúbica simples (CS) e possui baixo ponto de fusão, em torno de 330°C.

Figura 5 - Diagrama de fase esquemático da liga Cu-Pb.



Fonte: Adaptado de ASM ESPECIALTY HANDBOOK (2001, p.35)

Em vista disso, em ligas com teores de chumbo, como é o caso da liga estudada no presente trabalho, é esperado que haja a formação de fase líquida durante a sinterização. Contudo, isso pode ser favorável, pois a fase líquida formada poderá preencher os vazios entre partículas de outras fases sólidas, favorecendo a difusão e a densificação. Esse comportamento pode ser verificado no trabalho reportado por Pacheco et al. (2007), onde os autores submeteram a sinterização um sistema de pós de Cu-Fe com formação de fase líquida de cobre e concluíram que a formação da fase líquida contribuiu com a redução de porosidade do material sinterizado.

2.7 Sinterização com formação de fase líquida

Em sinterizações de ligas metálicas que possuem componentes de baixo ponto de fusão, pode ocorrer formação de fase líquida durante o aquecimento,

sendo que o fluido formado pode estar em regime transiente ou permanente, dependendo da relação de solubilidade entre os componentes. A fase líquida em contato com a fase sólida leva a sinterização em fase líquida SLPS (*Supersolidus Liquid Phase Sintering*); entretanto, no caso do sistema Cu-Sn-Pb, ocorrerá apenas a formação de líquidos no estado permanente e, neste caso, é denominado sinterização em fase líquida PLPS (*Permanent Liquid Phase Sintering*) (SABAHI NAMINI et al., 2016).

Apesar da sinterização com formação de fase líquida ser favorável se tratando de alguns sistemas de ligas metálicas, em outros casos pode ser prejudicial devido a ação da gravidade na fase líquida formada durante a sinterização, como mostra Sabahi Namini et al. (2016) em seu estudo.

3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

3.1 Materiais

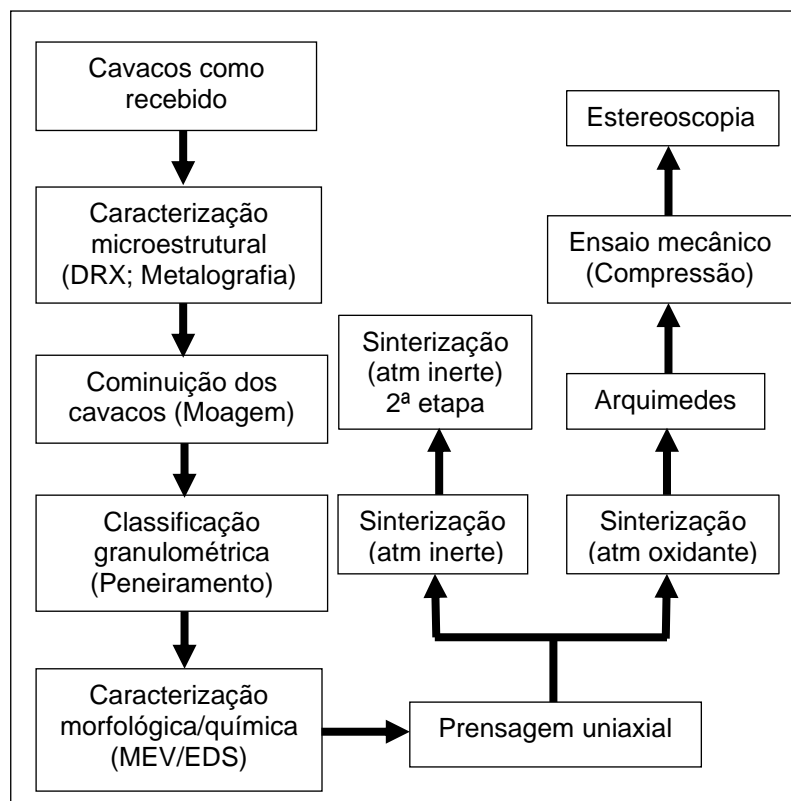
O material utilizado neste trabalho foi doado pela empresa *Tecno-usi* Ferramentaria e Usinagem LTDA de Santa Bárbara d'Oeste/SP e se trata de cavacos resultantes do processo de torneamento de um tarugo de uma liga bronze ao chumbo.

3.2 Métodos

Neste capítulo será apresentado os procedimentos que foram aplicados para realizar a cominuição, compactação e sinterização dos cavacos de bronze, e também serão apresentadas as técnicas de análise e ensaios mecânicos utilizados para caracterizar o material antes da cominuição e após a sinterização.

As etapas do procedimento experimental utilizado são apresentadas na forma de fluxograma na Figura 6.

Figura 6 - Fluxograma das etapas do procedimento experimental.



Fonte: Autoria própria.

3.2.1 Análise metalográfica do cavaco de bronze ao chumbo

A metalografia do cavaco como recebido foi feita nos laboratórios B003 e B004 do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA). Foi embutido a quente alguns cavacos em baquelite, para que em seguida fosse feito o lixamento de sua superfície com lixas d'água de granulometria 400, 600, 800 e 1200 e polimento, utilizando uma suspensão de alumina de granulometria 1,0 μm em uma politriz. Para realizar o ataque químico da liga fez a imersão da amostra em uma solução ácida de cloreto férrico qual foi preparada utilizando 30 mL de ácido clorídrico 1 M, 10 g de cloreto férrico e 200 mL de água. A amostra foi analisada em um microscópio de luz refletida utilizando aumento de 800X e as imagens obtidas por meio do software do equipamento.

3.2.2 Cominuição dos cavacos

Um moinho de jarros da marca SOLAB, modelo SL 34, de escala laboratorial qual se encontra no laboratório B002 do DAEMA foi utilizado para cominuir os cavacos. A velocidade de rotação de 150 rpm foi estipulada com base em operações anteriores realizadas no equipamento e as proporções mássicas entre esferas e cavacos utilizadas foram de aproximadamente 3:1 e 5:1. Cetona foi usada como fluido aditivo de moagem objetivando diminuir a aglomeração das partículas. Obteve-se 4 amostras, cada uma submetida a um tempo de moagem diferente: 24, 48, e 72 h, sendo que duas amostras foram submetidas a moagem de 24 h, porém com diferentes proporções mássicas entre esferas e cavacos. A imagem da Figura 7 mostra o material logo após a moagem.

Figura 7 - Cavacos de bronze logo após cominuição.



Fonte: Autoria própria

3.2.3 Classificação granulométrica

A classificação granulométrica das partículas foi feita no laboratório B002 do DAEMA por meio de peneiramento, utilizando uma série de peneiras Tyler e um agitador magnético do Departamento de Engenharia Mecânica da UTFPR-LD. As amostras foram submetidas à agitação por 1 min e, em seguida, as massas retidas em cada peneira foram medidas.

3.2.4 Análise de difração de raios X

As análises do cavaco como recebido e do pó obtido na moagem foram realizadas no difratômetro de raios X da marca Bruker, modelo D2 Phaser, qual se encontra no laboratório multiusuário da UTFPR - LD. A análise foi realizada com os seguintes parâmetros: faixa do ângulo 2θ de 20° a 80° ; $\lambda = 1,54184$ (Cu); passo de $0,01^\circ$; tensão e corrente de 30kV e 10mA, respectivamente. Os dados foram tratados no software QUALX de uso livre baseando-se nas cartas de dados JCPDS.

3.2.5 Análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV/EDS)

Uma amostra do pó da faixa de 53 μm a 250 μm foi destinada ao Laboratório de Caracterização Estrutural (LCE) – DEMa/UFSCAR para realização da análise de MEV/EDS. A análise foi realizada em um equipamento da marca FEI modelo Inspect S 50, onde o pó foi espalhado sob uma fita de carbono dupla-face e colada no porta-amostra do equipamento. Foi utilizado detector de elétrons secundários, aplicando aumentos de 45X e 200X, numa voltagem de 25 kV.

3.2.6 Compactação uniaxial

Realizou-se a prensagem de 12 amostras, sendo que cada amostra consistia de uma mistura de pós composta de 1 g de pó com tamanho entre 53 e 75 μm , 2 g de tamanho entre 75 e 106 μm , 2 g de tamanho entre 106 e 150 μm e 1 g do pó de tamanho entre 150 e 250 μm , em uma matriz cilíndrica de 16 mm de diâmetro por meio de uma prensa uniaxial hidráulica contida no laboratório B002 do DAEMA. As pressões aplicadas foram de aproximadamente 400 MPa. Após a prensagem aferiu-se as dimensões das pastilhas obtidas e mediu-se as respectivas massas. Na Figura 8 é apresentada uma imagem de uma amostra logo após a prensagem uniaxial.

Figura 8 - Amostra prensada pronta para sinterização.

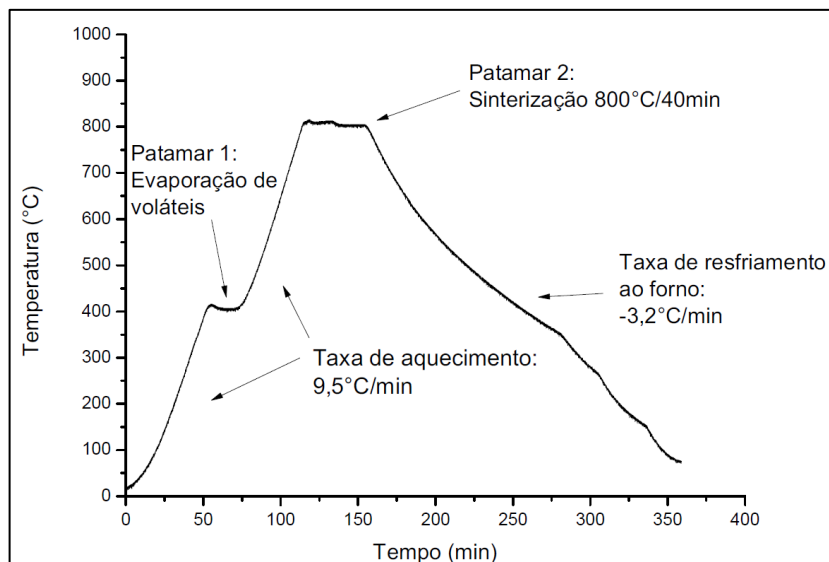


Fonte: Autoria própria

3.2.7 Sinterização

Seis amostras foram sinterizadas em um forno tubular de resistência elétrica com atmosfera de argônio da marca INTI do Laboratório de Filmes Finos e Materiais – UEL, onde foram aplicados os seguintes parâmetros: aquecimento contínuo em taxa de $9,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até um patamar de 400°C por 20 min para remoção de voláteis, seguindo para um patamar de 800°C por 40 min para sinterização e resfriamento ao forno. Esses parâmetros são baseados nos parâmetros que Dias (2018) utilizou em seu trabalho, e nos parâmetros de sinterização de ligas de cobre apresentados por Chiaverini (2001). As etapas desse processo são apresentadas no gráfico da Figura 9 construído com os dados de temperaturas obtidos por um termopar posicionado próximo as amostras.

Figura 9 - Etapas do processo de sinterização.

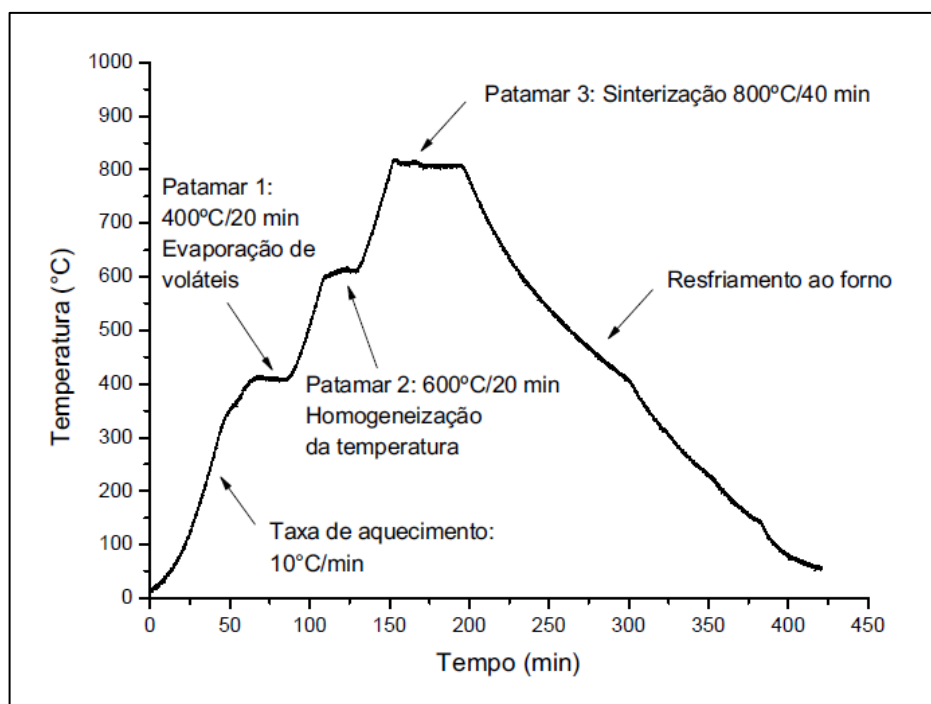


Fonte: Autoria própria.

Após o resfriamento ao forno, verificou-se que as amostras tinham baixa resistência ao manuseio, característica de corpo a verde, portanto decidiu-se submetê-las a outro tratamento de sinterização, porém agora baseando-se no

trabalho de Stefan et al. (2015), que estudou o reaproveitamento de uma liga de bronze ao chumbo, aplicando um patamar intermediário em 600 °C por 20 min, qual teria o objetivo de homogeneizar a temperatura dentro do forno. É mostrada na Figura 10 as etapas desse segundo tratamento realizado no mesmo equipamento.

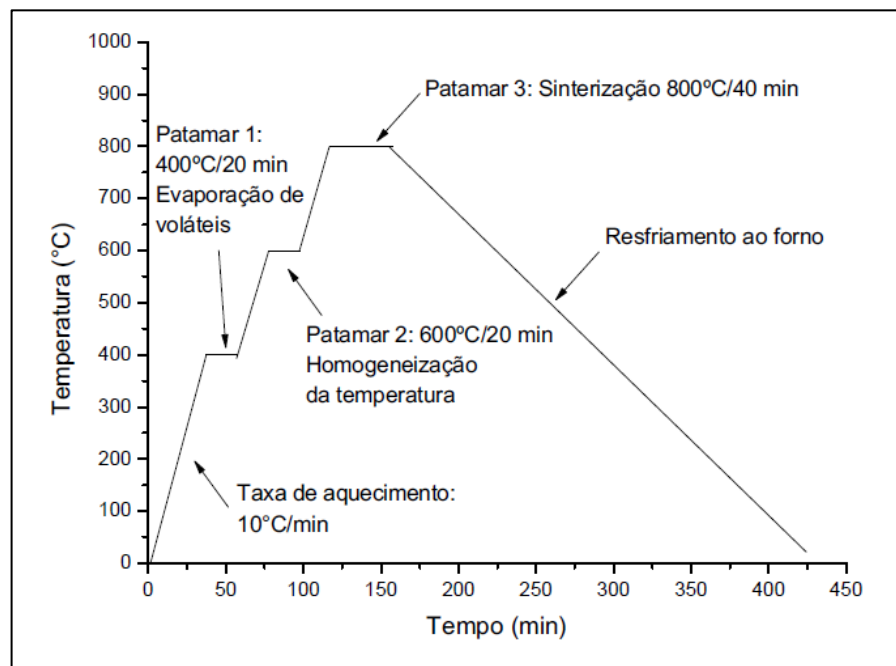
Figura 10 - Segunda sinterização em atmosfera inerte.



Fonte: Autoria própria.

Uma terceira etapa de sinterização foi realizada com as outras 6 amostras que ainda não haviam sido submetida a esse processo; entretanto, esse último processo de sinterização foi realizado em um forno do tipo mufla da marca JUNG localizado no laboratório B005 do DAEMA; nesse tratamento não houve controle atmosférico, portanto esperava-se que haveria oxidação do material durante o tratamento. As etapas da última sinterização são mostradas na Figura 11. Os parâmetros utilizados são iguais aos aplicados na sinterização anterior, entretanto nesse equipamento o termopar estava posicionado longe das amostras e próximo as resistências.

Figura 11 - Sinterização em atmosfera oxidante em forno mufla.



Fonte: Autoria própria.

3.2.7 Ensaio de Arquimedes e determinação de densidade a verde

Logo após a prensagem determinou-se a densidade a verde ρ_V por meio da equação (1):

$$\rho_V = m/V = m/[(\pi \cdot d^2/4) \cdot h] \quad (1)$$

onde:

m: massa da amostra [g];

V: volume da amostra [cm³]

d: diâmetro da amostra [cm]

h: altura da amostra [cm]

Realizou-se o ensaio de Arquimedes utilizando uma balança analítica com um suporte de arame e um béquer d'água destilada, baseando-se na norma NBR 6220: 2011, realizado no laboratório B002 do DAEMA, para determinar a

densidade aparente e a fração volumétrica aparente de poros das amostras sinterizadas em atmosfera oxidante. Obtendo os dados da massa seca, úmida e imersa das amostras, utilizou-se a equação (2) para determinar a densidade aparente.

$$\rho_A = [m_s / (m_u - m_i)] \cdot \rho_{\text{água}} \quad (2)$$

onde:

m_s : massa seca da amostra [g];

m_u : massa úmida da amostra [g];

m_i : massa da amostra imersa em água [g];

$\rho_{\text{água}}$: densidade aproximada da água na temperatura ambiente [g/cm³].

Para obter os valores de fração volumétrica aparente de poros, utilizou-se a equação (3).

$$\varepsilon_A = 1 - (\rho_A / \rho_T) \cdot 100 \% \quad (3)$$

onde:

ρ_A : densidade aparente da amostra sinterizada [g/cm³];

ρ_T : densidade teórica do material como recebido [g/cm³].

3.2.8 Ensaio de compressão uniaxial.

O ensaio de compressão uniaxial foi realizado na máquina universal que se encontra no laboratório B006 do DAEMA. O ensaio foi realizado em 4 amostras sinterizadas em atmosfera oxidante, baseando-se na norma ASTM E9-09 (2018), utilizando uma velocidade de aplicação de carga de 0,01 mm/m. Os dados foram obtidos pelo software do equipamento.

3.2.9 Estereoscopia

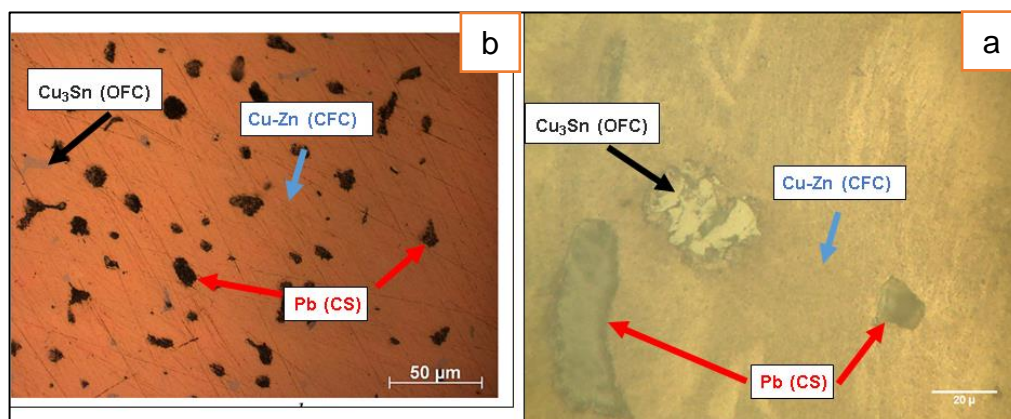
Uma das amostras sinterizadas em atmosfera oxidante foi analisada em estereoscópio, localizado no laboratório B003 do DAEMA. Para esta análise, a amostra não foi submetida a nenhum tipo de preparação antes da análise. As macrografias da amostra foram obtidas com uma câmera digital acoplada ao equipamento.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise microestrutural do cavaco de bronze ao chumbo

Na Figura 12-a é apresentado uma micrografia do cavaco de bronze ao chumbo, onde é possível observar uma fase branca, que segundo um estudo realizado por Chou e Chen (2006) pode ser a fase intermetálica Cu_3Sn de estrutura OFC (ortorrômbia de face centrada) formada em ligas de cobre com baixa concentração de Sn de acordo com o diagrama de fases Cu-Sn. A fase escura destacada na imagem se trata do chumbo, que por sua vez tem solubilidade insignificante na matriz de cobre e precipita-se isoladamente com estrutura cristalina CS (MARTYUSHEV et al., 2013). A matriz de cor amarelada que envolve as fases citadas se trata da solução sólida de Cu-Zn de estrutura CFC, qual tende a ser formada em ligas de cobre com teores de Zn abaixo de 39% de acordo com o diagrama de fases Cu-Zn (MARTINS, 2009). Na Figura 12-b é apresentado uma micrografia de uma liga de cobre ao chumbo de norma UNS C93700 estudada por Martyushev et al. onde os autores identificaram as fase citadas.

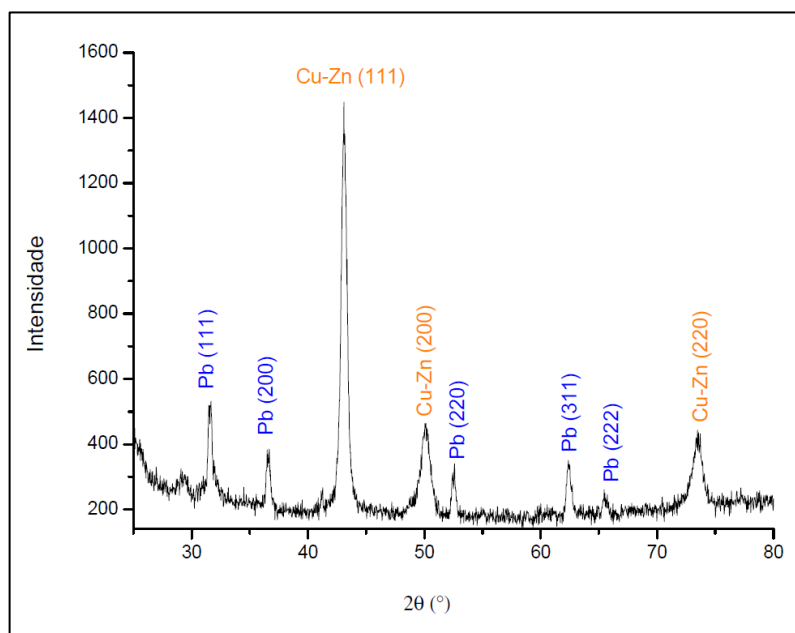
Figura 12 - Micrografia do cavaco da liga de bronze ao chumbo. Ataque com solução ácida de cloreto férrico (a). Micrografia de uma liga de cobre ao chumbo C93700.



Fonte: Adaptado de Martyushev et al., 2013/Autoria própria.

As fases identificadas na análise metalográfica da liga estudada também foram identificadas na análise de DRX do cavaco como recebido, como é mostrado no difratograma da Figura 13.

Figura 13 - Difratograma do cavaco de bronze como recebido.



Fonte: Autoria própria.

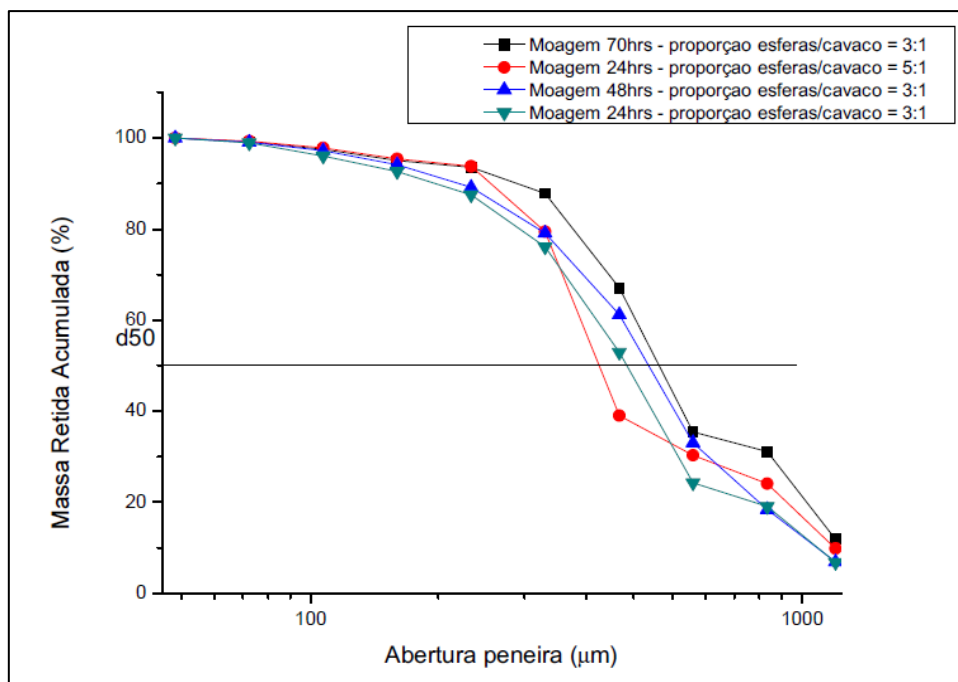
4.2 Classificação granulométrica e caracterização do pó

4.1.1 Tamanho médio de partícula e rendimento de moagem

Ao relacionar a fração acumulada de massa retida em cada peneira com os respectivos tamanhos da abertura das malhas, construiu-se o gráfico da Figura 14, sendo que o parâmetro d50 corresponde ao tamanho médio das partículas em cada corrida de moagem. O aumento do tempo de moagem não favoreceu a redução do d50, entretanto a proporção entre cavaco e esferas moedoras pareceu ser um parâmetro mais determinante no processo de redução do tamanho médio das partículas. O aumento do d50 ao longo do tempo ocorre

devido a um processo de aglomeração das partículas que ocorre por meio de forças de soldagem a frio que atuam ao longo do processo (SURYANARAYANA, 2001).

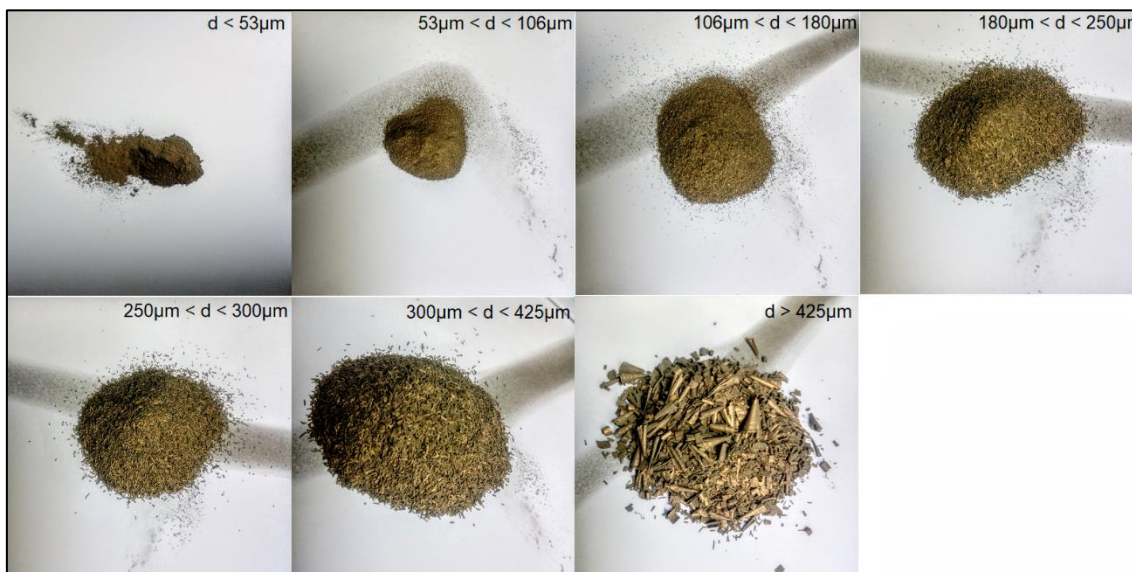
Figura 14 - Gráfico de peneiramento onde destaca-se o tamanho médio das partículas (d50).



Fonte: Autoria própria.

O menor tamanho médio de partícula, 386 μm , foi obtido na corrida de 24 h com proporção mássica esferas/cavaco de 5:1. Considerando que os tamanhos médios de partículas empregados na metalurgia do pó podem variar de acordo com a literatura e de acordo com a fração de poros desejada no material final, para esse estudo foi determinado que partículas de tamanho máximo de 250 μm seriam consideradas aproveitáveis. Para calcular o rendimento da etapa de moagem, dividiu-se a quantidade de pó de tamanho abaixo de 250 μm pela massa de cavaco inicial em cada etapa de moagem. A moagem de maior tempo (70 h) foi a que obteve o maior rendimento, de 24%. A Figura 15 contém imagens do pó obtido em suas respectivas faixas de tamanho.

Figura 15 - Faixa de tamanho do pó obtido com a moagem dos cavacos de bronze.



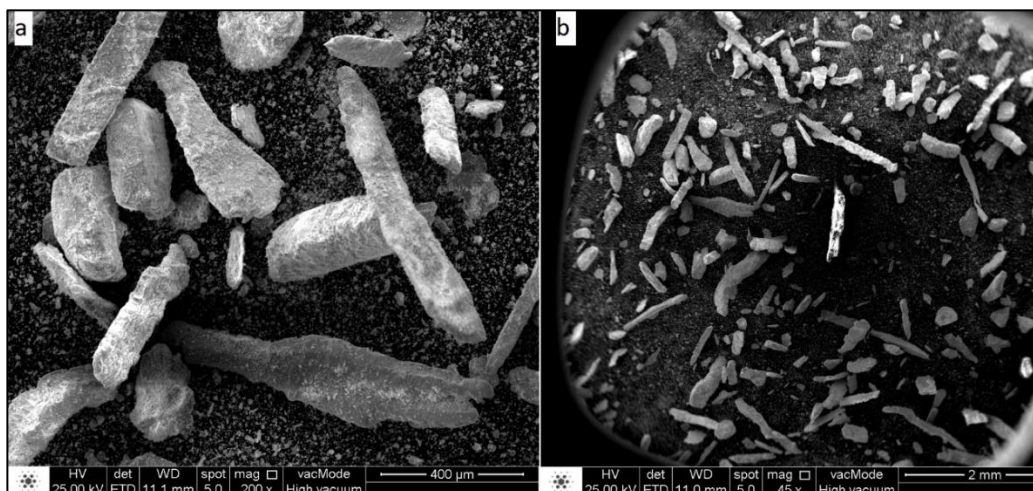
Fonte: Autoria própria.

No estudo apresentado por Dias (2018), foi verificado um aumento no rendimento da moagem de cavacos de bronze ao alumínio com a utilização de VC como aditivo de moagem, porém no presente trabalho utilizou-se apenas cetona como aditivo refrigerante de moagem visando reduzir os defeitos de soldagem a frio.

4.1.2 Análise morfológica e microestrutural do pó

A morfologia do pó obtido, como é apresentado na Figura 16, tem aspectos achatado, com arestas, e apresenta características de pó metálicos obtidos por cominuição mecânica como explicado anteriormente. Em seu estudo Fogagnolo et al. (2003) submeteram uma liga de alumínio a moagem mecânica e obtiveram partículas com morfologia achatada. Esses aspectos na morfologia das partículas se devem a ductilidade desse tipo de partícula metálica.

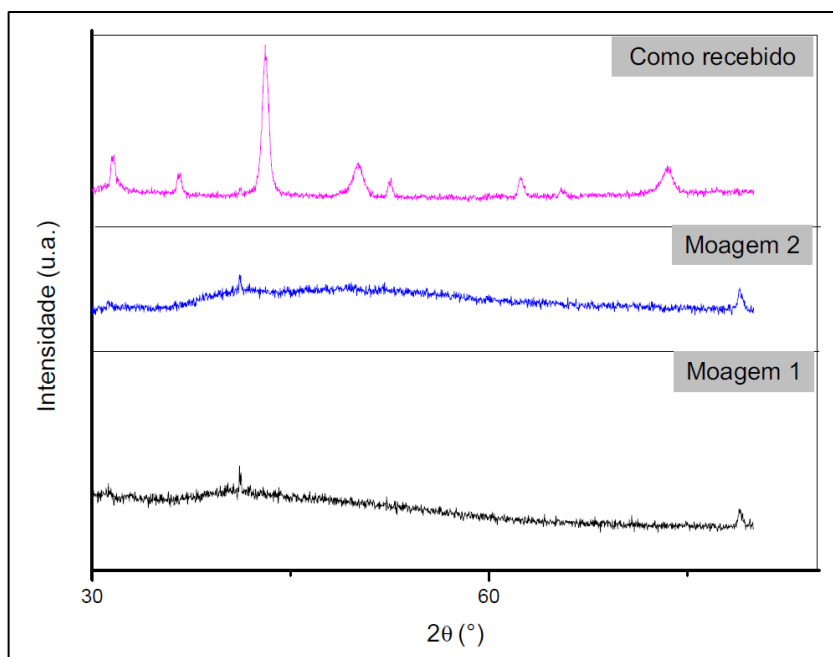
Figura 16 - Micrografia (MEV) do pó obtido com aumento 200X (a) e 45X (b).



Fonte: Autoria própria.

Amostras do pó de bronze também foram submetidas a análise de DRX com a finalidade de obter informações microestruturais do material após a moagem. Na Figura 17 é apresentado o difratograma do pó do cavaco e, para efeito de comparação, do cavaco como recebido (apresentado inicialmente na Figura 13). Os picos identificados na análise do cavaco CR não foram identificados na análise do material após ter sido cominuído, devido ao processo de amorfização do material que ocorre por meio da deformação mecânica nos planos cristalinos decorrente da alta energia absorvida no processo de moagem (DIAS, 2018).

Figura 17 - Comparação entre difratogramas do cavaco antes e após moagem.



Fonte: Autoria própria.

4.1.3 Análise química da liga de bronze ao chumbo

Aplicando a técnica de EDS durante a análise de MEV obteve-se a composição química da liga de forma semiquantitativa, o resultado encontra-se na Tabela 1, e de acordo com os elementos identificados e suas proporções, a liga de cobre utilizada tem composição próxima a norma UNS C98840, que se trata de ligas de cobre com alto teor de chumbo .

Tabela 1 - Composição da liga estudada e da liga UNS C98840 (% em massa).

Liga	Al	Si	P	Sn	Ca	Mn	Fe	Ni	Cu	Zn	Pb
UNS C98840	-	-	-	1,0 - 5,0	-	-	0,35 - máx	-	restante	-	44 - 58
Cavaco C.R.	1,2	1,08	0,17	2,91	0,34	0,50	0,71	0,76	39,99	4,51	48,01

Fonte: Autoria própria.

4.3 Sinterização

Neste trabalho empregou-se dois tipos de sinterização em dois conjuntos de amostras. Em um dos conjuntos empregou-se duas etapas de sinterização com controle atmosférico (argônio), enquanto o outro conjunto foi sinterizado apenas uma vez em forno sem controle atmosférico (ao ar),

O forno de atmosfera controlada possui câmara tubular de volume menor do que o forno de atmosfera oxidante do tipo mufla, e o termopar do primeiro foi posicionado bem próximo das amostras, o que traz maior precisão dos dados de temperatura obtidos, em contrapartida, no forno mufla o termopar foi posicionado distante das amostras e próximo às resistências, levando a suposição de que os valores reais de temperatura nas amostras estiveram abaixo dos valores obtidos no visor.

4.3.1 Amostras sinterizadas em atmosfera inerte

As amostras sinterizadas em atmosfera inerte de argônio apresentaram baixa resistência ao manuseio, o que pode ser justificado pela baixa taxa de difusão durante a sinterização, causada pela contaminação dos cavacos durante o processo de moagem e segregação da fase de chumbo. A contaminação do material no processo de moagem se deve principalmente a atmosfera da câmara de moagem, ao material que compõem as esferas moedoras e paredes da câmara, e ao aditivo de moagem utilizado. Durante a moagem ocorre formação de novas superfícies como resultado da fragmentação das partículas, as partículas fragmentadas possuem menor tamanho, maior área superficial e maior energia de superfície que combinadas com o oxigênio da atmosfera de moagem favorecem a formação de camadas superficiais de óxidos. Suryanarayana (2001) relata em seu estudo que há registrado na literatura contaminações de oxigênio de até 44,8 at% em ligas de titânio submetidas a moagens de alta energia, devido contaminação atmosférica. Além das camadas de óxidos formadas, o oxigênio difundiu na amostra resultando em oxigênio

intersticial, contribuindo para o crescimento dos grãos da liga, o que conseqüentemente causa uma diminuição dos contornos de grãos, diminuindo a taxa de difusão durante a sinterização, portanto, é conveniente o uso de atmosferas de gases inertes, como de argônio, hélio e vácuo (WEXLER; CALJA; MOSBAH, 2000 apud DIAS, 2018).

A fase líquida formada durante a sinterização foi o segundo fator de maior importância no resultado obtido. Segundo Sabahi et al (2016), em sistemas de Cu-Sn-Pb, temperaturas de sinterização acima de 810 °C causam a redução da densidade e a expansão volumétrica do material devido a mudanças microestruturais. Acima de 810 °C, o volume de poros é reduzido e o tamanho de grão aumenta, e devido à baixa solubilidade do chumbo, ocorre segregação da fase líquida de chumbo. O chumbo apresenta alta energia interfacial sólido-líquido, o que inibe a penetração entre as partículas de bronze, causando a segregação de fase. Na Figura 18 é possível observar gotículas cinzas precipitadas na superfície das amostras após a sinterização e, assim, é visível que ocorreu a segregação de fase de chumbo e que, por efeitos de capilaridade durante a fase líquida, deslocou-se para a superfície (SABAHI NAMINI et al., 2016). Em síntese, o efeito prejudicial da fase líquida na liga estudada neste trabalho foi potencializado pela alta concentração de chumbo na liga estudada.

Figura 18 – Fase de chumbo precipitada na forma de gotículas na superfície das amostras.



Fonte: Autoria própria.

4.3.2 Amostras sinterizadas em atmosfera oxidante

A aparência das amostras após a sinterização em atmosfera oxidante são apresentadas na Figura 19. Comparando o aspecto visual com as amostras sinterizadas em atmosfera de argônio, as amostras sinterizadas em atmosfera oxidante não apresentam a precipitação das gotículas de fase líquida na superfície, e apresentaram superfície com um forte tom de cinza opaco, que pode ser devido a oxidação generalizada.

Figura 19 - Amostras sinterizadas em atmosfera oxidante.



Fonte: Autoria própria.

As amostras dessa segunda etapa obtiveram um aspecto coeso, entretanto frágil. Na imagem da Figura 20, qual foi obtida por meio de um estereoscópio, é possível notar a segregação de uma fase mais opaca à esquerda, parte inferior da amostra, provavelmente de chumbo, e uma fase com aspecto brilhante à direita remetendo a uma fase que contenha cobre. A segregação da fase mais opaca na parte inferior da amostra pode ser resultado da ação da gravidade na fase líquida de chumbo, efeito abordado no estudo de

Sabahi Namini et al. (2016). A segregação da fase líquida de chumbo pode ter resultado na baixa resistência mecânica do sinterizado, já que se trata de uma fase de baixa resistência, assim como a formação de aglomerados de óxidos, formados devido à atmosfera oxidante dessa etapa de sinterização.

Figura 20 - Estereoscopia da amostra sinterizada em atmosfera oxidante.



Fonte: Autoria própria.

No forno tubular de atmosfera controlada registrou-se temperaturas de até 820 °C, o que pode ser prejudicial para densificação de ligas de Cu-Zn-Pb como discutido anteriormente. No forno mufla de atmosfera oxidante registrou-se temperatura máxima de 800 °C, e levando em conta o posicionamento do termopar na câmara, pode-se inferir que as amostras nesse caso foram submetidas a temperaturas inferiores a 800 °C, justificando a maior densificação das amostras submetidas em atmosfera oxidante. Porém, nota-se que, apesar da maior densificação e resistência, as amostras submetidas a atmosfera oxidante sofreram maior oxidação, devido ao seu aspecto opaco e cinza,

enquanto as outras (sinterizadas em atmosfera controlada) têm coloração próxima da liga original.

As amostras terem sido submetidas a sinterização em fornos diferentes é uma das causas da diferença entre as propriedades finais do material sinterizado. O processo de sinterização sem utilizar atmosfera inerte não é indicado, como discutido previamente; entretanto, as amostras obtidas por esse método neste trabalho apresentaram resistência ao manuseio maior do que as que foram submetidas a sinterização em atmosfera controlada, possibilitando a aplicação de ensaio de compressão e ensaio de Arquimedes. Os resultados dos ensaios encontram-se discutidos nas próximas sessões.

4.4 Determinação da densidade aparente e fração volumétrica de poros

O grau de densificação da amostra foi avaliado por meio dos parâmetros obtidos no ensaio de Arquimedes, qual se encontram na Tabela 2, com suas respectivas médias e desvios.

Tabela 2 - Valores médios das densidades calculadas.

	ρ_A [g/cm ³]	ρ_V [g/cm ³]	ϵ_A [%]	ρ_T [g/cm ³]
média	3,80 ± 0,20	2,71 ± 0,06	61,1 ± 2,03	9,77

Fonte: Autoria própria.

Os valores de densidade aparente (ρ_A), ou seja, densidade do material sinterizado sem considerar os poros internos, foram obtidos por meio do ensaio de Arquimedes utilizando a equação (2), enquanto que os valores de densidade a verde (ρ_V) foram obtidos por meio da equação (1). Os valores de fração volumétrica de poros aparente (ϵ_A) foram obtidos por meio da equação (3). O valor da densidade teórica (ρ_T) consiste na densidade da liga como recebida,

obtida pelo método arquimediano, e tem um valor alto comparado as outras ligas de cobre devido ao alto teor de chumbo na composição.

A densidade aumentou em média 40% após a sinterização em relação ao corpo a verde, valor acima daqueles encontrados na literatura como no trabalho de Dias (2018), o qual registrou um aumento médio da densidade de 14%, e da fração volumétrica de poros 20%, porém em amostras de bronze ao alumínio. A densificação não resultou da retração volumétrica das amostras durante a sinterização, pois ocorreu uma expansão volumétrica como pode ser observado nos valores dimensionais do corpo a verde e do sinterizado que constam na Tabela 3, entretanto houve ganho de massa e isso explica o aumento da densidade do sinterizado em relação a densidade do corpo a verde.

Tabela 3 - Valores dimensionais das amostras antes e depois da sinterização ao ar.

	diâmetro a verde [mm]	altura a verde [mm]	diâmetro sinterizado [mm]	altura sinterizado [mm]
média	16,3 ± 0,03	7,1 ± 0,2	19,8 ± 0,2	9,2 ± 0,1

Fonte: Autoria própria.

No trabalho de Sabahi Namini et al. (2015) foi constatado que a máxima densificação de uma liga de bronze com 10% de chumbo ocorre quando se emprega a sinterização a 790 °C, em sinterizações com temperaturas acima desse patamar ocorre a queda da densidade e expansão dimensional dessa liga, devido a mudanças microestruturais. Aqui o aumento de massa se deve a oxidação do material.

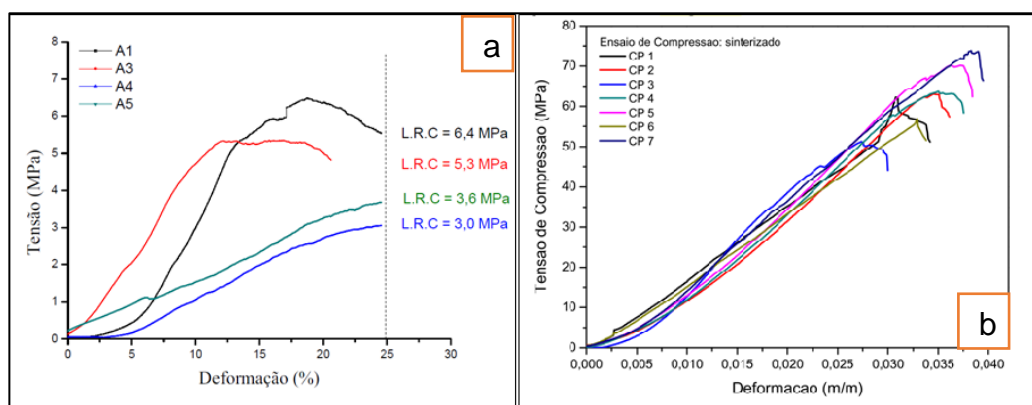
4.5 Ensaio de compressão axial

As amostras sinterizadas em atmosfera inerte não foram ensaiadas devido à baixa resistência ao manuseio, entretanto as amostras sinterizadas em atmosfera oxidante foram ensaiadas, apesar de apresentarem um aspecto

elevado de oxidação. As curvas tensão-deformação referentes a essas amostras são apresentadas na Figura 21-a. Os valores de L.R.C. (limite de resistência a compressão) são inferiores daqueles encontrados na literatura para outras ligas de bronze, o que é justificado devido ao grande volume de poros, pela oxidação generalizada durante a moagem/sinterização e, também, devido à segregação de fase de chumbo, já que se trata de uma fase de baixa resistência mecânica.

Para comparação, na Figura 21-b é apresentado curvas tensão-deformação de um ensaio de compressão em ligas de bronze ao alumínio sinterizadas por Dias (2018), onde obteve-se valores de L.R.C. variando de 50 MPa a 75 MPa aproximadamente.

Figura 21 - Curva tensão-deformação do ensaio de compressão das amostras sinterizadas em atmosfera oxidante (a) curva tensão deformação de liga de bronze ao alumínio.



Fonte: Autoria própria/Adaptado de Dias (2018).

5 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos e do estudo realizado, conclui-se que o reaproveitamento via reação do estado sólido dos cavacos da liga de bronze ao chumbo em questão, não é eficiente quando empregado os parâmetros utilizados nesse estudo por meio do método proposto.

A moagem dos cavacos, no entanto, mostrou-se eficiente ao obter pós de tamanhos micrométricos, porém a moagem sem o uso de atmosfera inerte pode ter prejudicado a sinterização.

Foi possível pré-consolidar o pó de cavaco de bronze ao chumbo por meio da prensagem, entretanto não foi possível obter um material com boas propriedades mecânicas após a sinterização, devido as condições em que foi realizada.

6 TRABALHOS FUTUROS

A sugestões para trabalhos futuros sobre este tema são:

- Estudo dos efeitos da moagem em atmosfera oxidante de ligas de cobre, submetendo amostras a moagem com e sem controle atmosférico;
- Estudo dos efeitos da variação do tamanho médio de partícula na sinterização com formação de fase líquida;
- Estudo dos efeitos da fase líquida em ligas de cobre ao chumbo em temperaturas de sinterização abaixo de 800 °C;
- Estudo dos efeitos da adição de pós obtido pela moagem de cavacos em pós de origem comercial;
- Analisar a distribuição de elementos após a sinterização por mapeamento químico;
- Estudo do reaproveitamento de cavacos de bronze ao chumbo por meio da prensagem a quente, eliminando o processo de sinterização ao forno.

7 CRONOGRAMA

A seguir na Figura 22 é mostrado o cronograma dos procedimentos experimentais utilizado neste trabalho, com o objetivo de auxiliar sua reprodução no futuro.

Figura 22 - Cronograma dos procedimentos experimentais utilizado.

Atividade	Realizado	Dezembro (2018)	Janeiro (2019)	Fevereiro	Março	Abril	Maio	Junho	Local
Obtenção dos cavacos									A
Moagem									B
DRX cavaco/pó									B
Peneiramento									B
MEV/EDS									C
Prensagem uniaxial									B
Sinterização									D
Ensaio Compressão									B
Ensaio Dureza									B
Metalografia									B
Discussão dos resultados									-
Defesa TCC 2									-
Local									
Tecnousi - Usinagem e ferramentaria (Santa Bárbara d'Oeste - SP)				A					
Laboratórios do DAEMA-UTFPR (Londrina)				B					
Laboratório de caracterização estrutural da UFSCar (São Carlos - SP)				C					
Laboratório de filmes finos e materiais - UEL (Londrina)				D					

Fonte: Autoria própria.

REFERÊNCIAS

AFSHARI, E.; GHAMBARI, M. Characterization of pre-alloyed tin bronze powder prepared by recycling machining chips using jet milling. **Materials and Design**, v. 103, p. 201–208, 2016.

ANTÔNIO, M.; PALLINI, T. Cost reduction in the Automotive Industry through Sintering A Redução de Custo na Indústria Automotiva através do Sinterizado. **Society of Automotive Engineers**, p. 1–6, 2006.

ASM HANDBOOK. **Powder Metal Technologies and Applications**. ASM International, v. 7, 1998.

ASM SPECIALTY HANDBOOK. **Copper and Copper Alloys**. Joseph R. Davis, ASM International, 2001, 652 p.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó**. 4ª ed. São Paulo - SP: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.

DIAS, A. N. O. **PRODUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA LIGA BRONZE DE ALUMÍNIO OBTIDA VIA METALURGIA DO PÓ UTILIZANDO MOAGEM DE ALTA ENERGIA**. [s.l.]. Tese submetida ao Programa de Pós Graduação em Materiais para Engenharia. UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, 2018.

FOGAGNOLO, J. . et al. Effect of mechanical alloying on the morphology, microstructure and properties of aluminium matrix composite powders. **Materials Science and Engineering: A**, v. 342, n. 1–2, p. 131–143, 2003a.

FOGAGNOLO, J. B. et al. Recycling of aluminium alloy and aluminium matrix composite chips by pressing and hot extrusion. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 143–144, n. 1, p. 792–795, 2003b.

GRONOSTAJSKI, J.; MATUSZAK, A. Recycling of metals by plastic deformation: an example of recycling of aluminium and its alloys chips. **Journal of Materials**

Processing Technology, v. 92–93, p. 35–41, 1999.

MACHADO, Á. R. et al. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. 3ª ed. São Paulo - SP: Blucher, 2015.

PACHECO, P. D. et al. OBTENÇÃO DE LIGAS Fe-Cu VIA METALURGIA DO PÓ: MICROESTRUTURA, DUREZA E LIMITE DE ESCOAMENTO. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo**, 2007.

PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia: microestrutura e propriedade**. Hemus SA ed. [s.l: s.n.].

SABAHI NAMINI, A. et al. Liquid Phase Sintering of Leaded Tin Bronze Alloyed Powder. **Transactions of the Indian Institute of Metals**, v. 69, n. 7, p. 1377–1388, 2016.

STEFAN, R. et al. Studies on the Possibility of Recycling Waste Bronze. **Advanced Materials Research**. v. 1128, p. 303–311, 2015.

SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. **Progress in Materials Science**, v. 46, n. 1–2, p. 1–184, 2001.