



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE ENGENHARIA
CURSO ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS DE ALMADA TORRES

**FABRICAÇÃO DE BUCHA DE BRONZE POR METALURGIA DO PÓ PARA
APLICAÇÃO AUTOMOTIVA**

MOSSORÓ – RN

2020

LUCAS DE ALMADA TORRES

**FABRICAÇÃO DE BUCHA DE BRONZE POR METALURGIA DO PÓ PARA
APLICAÇÃO AUTOMOTIVA**

Projeto de conclusão de curso apresentado a Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, campus Mossoró, como requisito para obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Manoel Quirino da Silva Junior - UFERSA.

MOSSORÓ – RN

2020

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

T693f TORRES, LUCAS DE ALMADA.
FABRICAÇÃO DE BUCHA DE BRONZE POR METALURGIA
DO PÓ PARA APLICAÇÃO AUTOMOTIVA / LUCAS DE ALMADA
TORRES. - 2020.
50 f. : il.

Orientador: MANOEL QUIRINO DA SILVA JÚNIOR.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Engenharia
Mecânica, 2020.

1. Metalurgia do pó. 2. Sinterização. 3. Ligas
de cobre. I. JÚNIOR, MANOEL QUIRINO DA SILVA,
orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

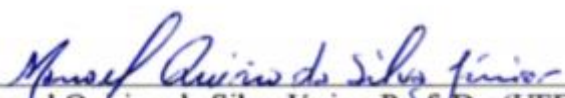
LUCAS DE ALMADA TORRES

**FABRICAÇÃO DE BUCHA DE BRONZE POR METALURGIA DO PÓ PARA
APLICAÇÃO AUTOMOTIVA**

Projeto de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal Rural do Semi-Árido –
UFERSA, Campus Mossoró para obtenção do
título de Engenheiro Mecânico.

Defendida em: 04 / 02 / 2020.

BANCA EXAMINADORA


Manoel Quirino da Silva Júnior, Prof. Dr. (UFERSA)
Presidente


Francisco Evaristo Uchoa Reis, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador


Ramsés Otto Cunha Lima, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

À Deus em primeiro lugar que iluminou o meu caminho durante esta caminhada.

À minha filha Anny Luiza Araújo de Almada que quando o desespero surgia seu sorriso vinha na minha memória e me permitia prosseguir.

Aos meus pais Fernando Torres de Oliveira e Sidilândia Rodrigues de Almada Torres, a quem eu agradeço todos os dias minha existência, por todo o apoio ao longo da minha caminhada, e por terem investido e insistido na realização desse sonho.

Ao meu professor Manoel Quirino da Silva Junior, por seu auxílio, incentivo e principalmente orientações.

Ao Centro de Engenharias e ao SENAI, pela assistência técnica e financeira

À minha irmã, Sara de Almada Torres, pelo apoio e auxílio aos meus pais na minha ausência.

Às amigas que construí em Mossoró, em especial a Tallison Dukakis de Moraes Bertoldo, que me deu apoio ao longo dessa caminhada. Suas ações foram essenciais para que eu conseguisse seguir em frente.

“Amar e mudar as coisas me interessa mais”

(Belchior)

RESUMO

As ligas de cobre possuem excelentes propriedades mecânicas, a resistência à corrosão e ao desgaste, sendo utilizados na fabricação de buchas, válvulas, hélices e outros componentes da indústria aeroespacial e naval. Dentre as diversas ligas de cobre, o bronze é uma delas. O trabalho desenvolverá a caracterização e a fabricação por metalurgia do pó de uma bucha de bronze. A usinagem é uma rota convencional de fabricação de buchas, no entanto esse método de fabricação termina com a exclusão dos resíduos que, sob a forma de cavaco, são refundidos ou até descartados, prejudicando o meio ambiente. A metalurgia do pó é eficaz e propõe baixo desperdício da matéria prima com baixo impacto ambiental, boa tolerância dimensional e bom acabamento superficial, baixa energia de transformação, além de propriedades mecânicas vantajosas. Neste trabalho foi investigada a influência da temperatura de sinterização e da pressão de compactação na geometria e nas propriedades mecânicas do bronze. Foram realizadas caracterizações de composição via análise de espectrometria e também microestruturais com a metalografia via microscopia óptica, além de caracterizações mecânicas por meio de ensaios de microdureza. Por fim, foram determinadas as densidades e porosidades teórica e aparente, para as condições propostas, das amostras no estado verde e no estado sinterizado. Foi observado que a aplicação da metalurgia do pó a 600°C com pressão de compactação de 4 toneladas firma-se como alternativa para a obtenção de um material sinterizado de alta qualidade e propriedades mecânicas equivalentes, como dureza atingindo valores de 150HV.

Palavras-chave: Metalurgia do pó. Sinterização. Ligas de cobre. Bronze.

ABSTRACT

Copper alloys have excellent mechanical properties, resistance to corrosion and wear, being used in the manufacture of bushings, valves, propellers and other components of the aerospace and naval industry. Among the various copper alloys, bronze is one of them. The work will develop the characterization and metallurgical manufacture of the powder of a bronze bushing. Machining is a conventional bushing manufacturing route, however this manufacturing method ends with the exclusion of residues that, in the form of chips, are remelted or even discarded, harming the environment. Powder metallurgy is effective and proposes low waste of raw material with low environmental impact, good dimensional tolerance and good surface finish, low transformation energy, in addition to advantageous mechanical properties. In this work, the influence of sintering temperature and compaction pressure on the geometry and mechanical properties of bronze was investigated. Characterizations of composition were carried out via spectrometry analysis and also microstructures with metallography via optical microscopy. In addition to mechanical characterizations through microhardness and diametrical compression tests. Finally, the theoretical and apparent densities and porosities were determined, for the proposed conditions, of the samples in the green state and in the sintered state. It was observed that the application of powder metallurgy at 600°C with a compaction pressure of 4 tons is established as an alternative for obtaining a sintered material of high quality and equivalent mechanical properties, such as hardness reaching values of 150HV.

Keywords: Powder metallurgy, Sintering, Copper alloys, Brass.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Cobre e suas ligas	15
Figura 2 – Diagrama Cu-Sn.....	16
Figura 3 – Etapas do processo de metalurgia do pó	17
Figura 4 - Esquema da operação de compactação uniaxial de pós metálicos	18
Figura 5 - Estágios de sinterização em fase líquida.....	20
Figura 6 - Estágios de sinterização em fase sólida	21
Figura 7 – Forno utilizado na sinterização	22
Figura 8 – Peças típicas obtidas por metalurgia do pó	23
Figura 9 - Desenho da cruzeta detalhado (G) e em perspectiva (H)	26
Figura 10 - Desenho de construção do billet (A) e suas dimensões (B).....	26
Figura 11 - Perspetiva e vista explodida (A) e dimensões externas do ferramental (B)	27
Figura 12 – Montagem da matriz e do punção após a fabricação	27
Figura 13 – Estrutura sequencial da rota de desenvolvimento do projeto.....	28
Figura 14 - Modelo de matriz utilizado para a compactação	30
Figura 15 – Dimensões nominal de bronze automotiva.....	34
Figura 16 – Dimensões dos componentes que compõem a matriz.....	35
Figura 18 – Componentes da matriz após a fabricação: matriz inferior (A), anel externo (B), pino(C), punção (D) e anel móvel (E).	36
Figura 19 - Matriz compactando o pó de bronze para a formação da bucha.....	37
Figura 20 - Microscopia das amostras sinterizadas: (A) 600°C; (B) 900°C	39
Figura 21 – Densidade a verde em função da pressão de compactação	40
Figura 22 – Densidade após a sinterização em função da pressão de compactação	40
Figura 23 - Microscopia das amostras no campo escuro referente a amostra 3 (A) e a amostra 5 (B).....	42
Figura 24 - Microscopia das amostras no campo escuro referente a amostra 6 (A) e a amostra 10 (B).....	43
Figura 25 - Amostras de 4 toneladas (A) e 8 toneladas (B) sinterizadas.....	43
Figura 26 – Medições de dureza das amostras	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pressões de compactação recomendadas para diferentes materiais	19
Tabela 2 - Indicação de temperatura, tempo e atmosfera recomendados para vários materiais	22
Tabela 3 – Parâmetros de compactação e sinterização	30
Tabela 4 - Parâmetros de compactação e sinterização para otimização das propriedades	32
Tabela 5 - Parâmetros de compactação e sinterização para a bucha de bronze.....	37
Tabela 6 – Composição química do bronze utilizado.....	38
Tabela 7 – Medições de altura das amostras após a compactação	39
Tabela 8 – Porosidade das amostras sinterizadas	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVOS GERAIS	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3.1. COBRE E SUAS LIGAS	15
3.1.1 Ligas de bronze	16
3.2. METALURGIA DO PÓ	17
3.3. ETAPAS DO PROCESSO	18
3.3.1. Compactação do pó	18
3.3.2. Sinterização	19
3.3.3. Técnicas para sinterização	21
3.4. APLICAÇÕES	23
3.5. PROJETO DE MATRIZES PARA METALURGIA DO PÓ	25
3.5.1. Projeto do produto definitivo	25
3.5.2. Estudo da pré-forma	26
3.5.3. Projeto do ferramental	26
3.5.4. Confeção da matriz e do punção	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1. ETAPA 1 – ANÁLISE QUÍMICA	29
4.1.1 Ensaio de composição	29
4.2 ETAPA 2 - DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO	29
4.2.1 Pesagem do material	29
4.2.2 Compactação do material	29
4.2.3 Sinterização	30
4.2.4 Metalografia	30
4.3 ETAPA 3 – OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES	31
4.3.1 Pesagem e compactação do material	31
4.3.2 Medição de densidade a verde	31
4.3.3 Sinterização	32
4.3.4 Medição de densidade por Arquimedes	33
4.3.5 Medição de porosidade	33
4.3.6 Metalografia	33

4.3.7	Ensaio de microdureza	34
4.4	ETAPA 4 – FABRICAÇÃO DA BUCHA	34
4.4.1	Projeto da matriz	34
4.4.2	Fabricação da matriz.....	35
4.4.3	Compactação	36
4.4.4	Sinterização.....	37
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1.	ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE BRONZE	38
5.2.	TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO	38
5.3.	DENSIDADE.....	39
5.4.	POROSIDADE	41
5.5.	DUREZA	44
5.6.	PRODUTO	44
6.	CONCLUSÃO.....	45
7.	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	46
	REFERÊNCIAS	47

1. INTRODUÇÃO

Diversas ligas são utilizadas para a fabricação de buchas, sendo as ligas de cobre uma das utilizadas. Se destacando nesta aplicação, pode-se observar os bronzes comerciais. Os processos de fabricação interferem muito no produto, e nos casos da bucha, o processo de usinagem que é muito utilizado promove a fabricação com um desperdício elevado.

A Metalurgia do Pó é o processo de fabricação em que se utiliza a mistura heterogênea de pó metálico com o intuito de se obter peças com propriedade mecânicas ideais e um bom acabamento superficial que depende do material a ser utilizado. Apesar da metalurgia do pó ser considerada um processo recente, há indícios de que tal técnica foi empregada há cerca de 6000 anos a.c. em peças de ferro ou de metais preciosos como em espadas e lanças, às quais são obtidas pela união de partículas metálicas incandescentes por martelamento. Contudo, somente no século XIX surgem as primeiras notícias a respeito de metalurgia do pó utilizada na fabricação de peças com metais de alto ponto de fusão, cuja na época não se possuía meios suficientes para a fusão desses metais (CHIAVERINI, 2001).

A metalurgia do pó tem como objetivo de transformar sem fusão efetiva, pós metálicos ou não metálicos utilizando pressão para compactação e calor, por meio de um tratamento térmico de sinterização, a qual se realiza a uma temperatura inferior à do ponto de fusão do material base (SANDEROW, 1998).

O processo de fabricação de peças mecânicas por metalurgia do pó é dividido em três etapas fundamentais como a mistura e homogeneização, moldagem ou compactação e o aquecimento ou sinterização. São etapas que apresentam como parâmetro de controle, principalmente, a temperatura, a carga de compressão e tempo de mistura (GOMES, 2007).

O objetivo dessa pesquisa é analisar o processo de fabricação de buchas por metalurgia do pó com o mínimo de desperdício e, além disso, podendo variar a densidade da bucha conforme desejado. O trabalho abordará deste o projeto e fabricação da matriz passando por algumas etapas do processo de metalurgia do pó.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Obtenção e caracterização de uma bucha de bronze para aplicação automotiva por Metalurgia do Pó.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir parâmetros para realizar a compactação e a sinterização;
- Caracterizar por microscopia óptica e por ensaio de composição química utilizando DRX;
- Obtenção das propriedades mecânicas de microdureza;
- Analisar densidade e porosidade do produto utilizando a técnica de Arquimedes.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. COBRE E SUAS LIGAS

A combinação do cobre com outros elementos de liga em diferentes teores permite obter novas ligas com diversas aplicações que podem requerer diferentes índices de resistência mecânica e à corrosão, dureza, usinabilidade, abrasão, entre outros (Li; Zinkle, 2012; Derek; Tyler; Blank, 1990).

A Figura 1 mostra as diversas combinações que o cobre pode formar com diversos elementos químicos para formar diferentes ligas.

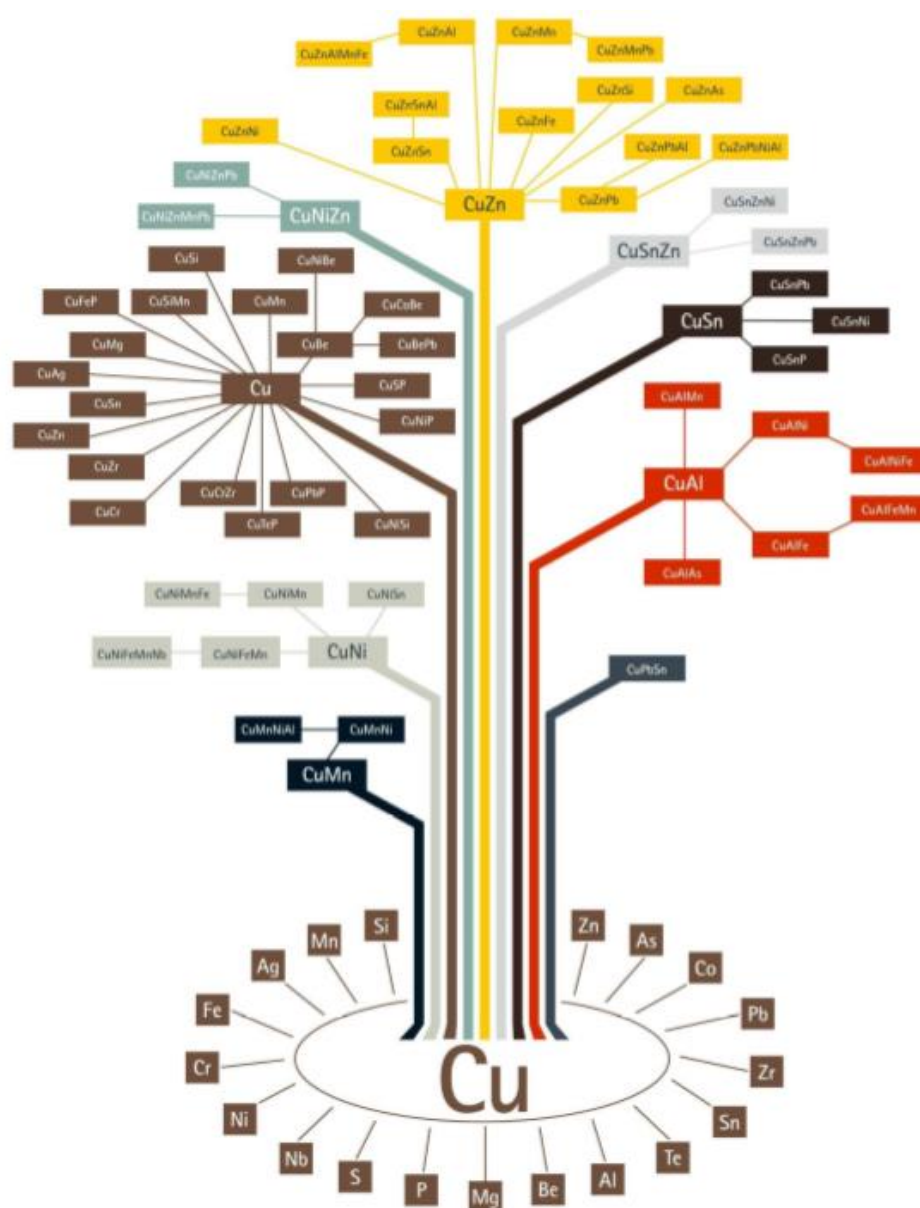


Figura 1 - Cobre e suas ligas

Fonte: CDA (2016).

O cobre é um material com características únicas, sendo um dos metais mais antigos já usados pelo homem com seu primeiro uso datando de mais de dez mil anos atrás. Por aproximadamente cinco milênios o cobre foi único metal conhecido pelo homem e, desse modo, constavam aplicações na confecção de artefatos, decorações e utilitários primitivos, quando na época o cobre nativo já era conformado por meio de martelos. O cobre pode ser encontrado na crosta terrestre principalmente na forma de sulfuretos, óxidos, carbonatos ou sulfatos, porém presente em quantidades muito menores do que outros metais existentes. As minas de cobre mais importantes do mundo estão localizadas no Chile, Estados Unidos, Canadá, Rússia e Zâmbia. (CDA, 2016).

3.1.1 Ligas de bronze

São ligas formadas por cobre e outros elementos de liga incluindo o estanho, alumínio, zinco, fósforo, silício, berílio ou níquel. Estas ligas possuem maior resistência mecânica que o cobre puro e ainda têm um elevado grau de resistência à corrosão. No que diz respeito à produção de ligas de bronze, as temperaturas de fusão são consideravelmente mais altas do que para ligas de alumínio, magnésio, zinco ou chumbo (ASM, 1990).

Os bronzes de estanho são também denominados bronzes comuns sendo utilizado principalmente em fundição de peças de configuração muito complexa (inclusive na moldagem artística), devido ao seu baixíssimo valor de contração (GULHÁEV, 1981).

A partir de uma análise do diagrama de equilíbrio Cu-Sn, Figura 2, é possível verificar as fases oriundas da variação do teor de Sn na liga de bronze

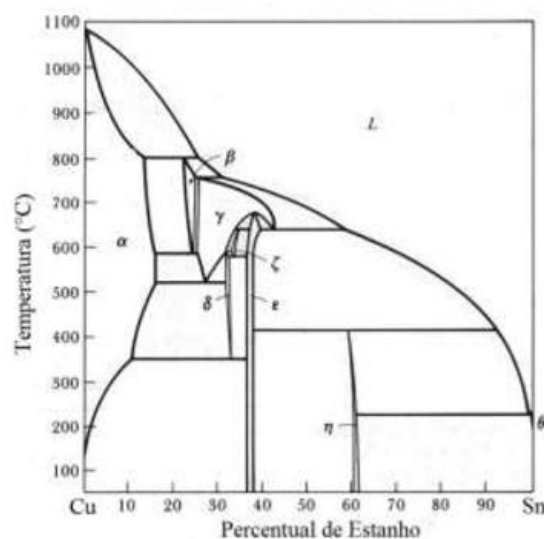


Figura 2 – Diagrama Cu-Sn
Fonte: Callister (2007)

3.2. METALURGIA DO PÓ

A metalurgia do pó consiste em transformar pós metálicos e não metálicos, em peças complexas com alta qualidade e tolerância, e resistentes, sem recorrer à fusão do material, mas apenas empregando pressão e calor. A operação de aquecer as peças já compactadas e condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera denomina-se sinterização (CHIAVERINI, 1986).

Embora a metalurgia do pó seja uma técnica de uso industrial relativamente recente, já que teve a sua consolidação a partir da Segunda Guerra Mundial, no entanto, os metais na forma de pós já eram empregados em peças há vários séculos (BONATO, 2003). Esse novo processo possibilitou estudos para fabricação de materiais refratários com tungstênio e molibdênio, cujos pontos de fusão são extremamente elevados, impossibilitando sua obtenção pelos métodos metalúrgicos convencionais, e posteriormente para materiais duros como o Titânio e Tântalo (CHIAVERINI, 1986).

O processo de metalurgia do pó é dividido em etapas. A técnica envolve a obtenção e moagem do pó, bem como a conformação e sinterização de peças a partir do mesmo. O processo de metalurgia do pó executa algumas etapas até a obtenção do produto final. A Figura 3 ilustra as etapas. Iniciando pela obtenção do pó, em seguida a mistura, depois compactação e por fim a sinterização, às vezes sendo necessário realizar outras etapas complementares. Os pós depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Em seguida, são colocados em fornos para sinterização onde obtêm consistência e resistência mecânica (MORO, 2007).

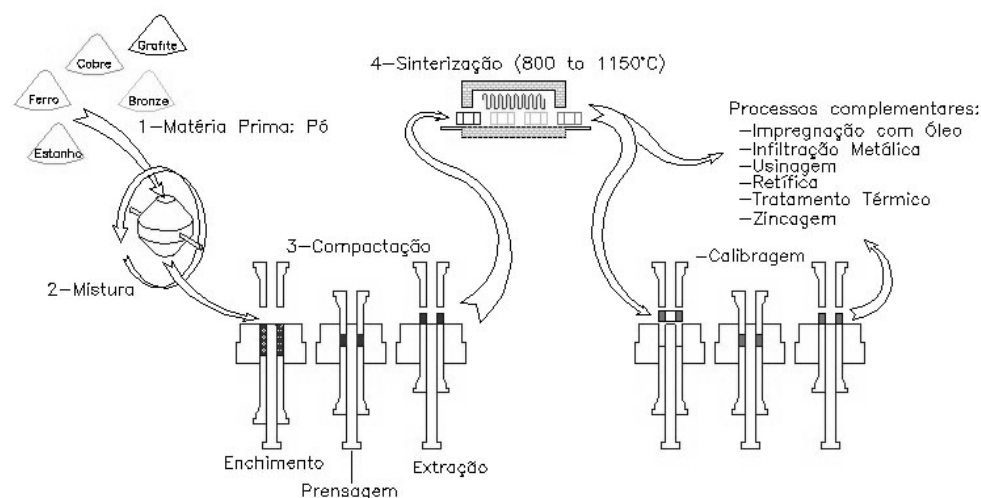


Figura 3 – Etapas do processo de metalurgia do pó

Fonte: Moro (2007).

Conforme Gonçalves (1995), nos últimos anos pode-se observar um rápido crescimento e maior variedade na utilização de peças fabricadas pelo processo de metalurgia do pó em diversos segmentos, a exemplo da indústria automobilística, de informática e aeroespacial, equipamentos eletrodomésticos, máquinas, entre outros.

Isto é atribuído ao fato deste ser um processo mais rápido e econômico em comparação a outros, permitindo a manufatura de peças em grande escala, geralmente sem a necessidade da etapa de usinagem ou acabamento. Além da possibilidade de obter propriedades mecânicas em faixas de valores comparáveis com os processos convencionais (SAGAWA *et al.*, 1984).

3.3. ETAPAS DO PROCESSO

3.3.1. Compactação do pó

Apos a moagem é iniciado o processo de compactação. O pó contido dentro da matriz é prensado. Os dois tipos de prensagem é a uniaxial e a isostática. Na prensagem uniaxial, a compactação do pó é realizada em uma matriz rígida, por aplicação de pressão na direção axial, através de punções rígidos. É utilizada para conformar peças que não apresentam relêvo superficial na direção de prensagem. Na Figura 4 tem-se o esquema de uma prensagem uniaxial. Na prensagem isostática, a compactação do pó se dá no interior de um molde flexível, sobre o qual atua um fluido pressurizado. É empregada na confecção de peças complexas.

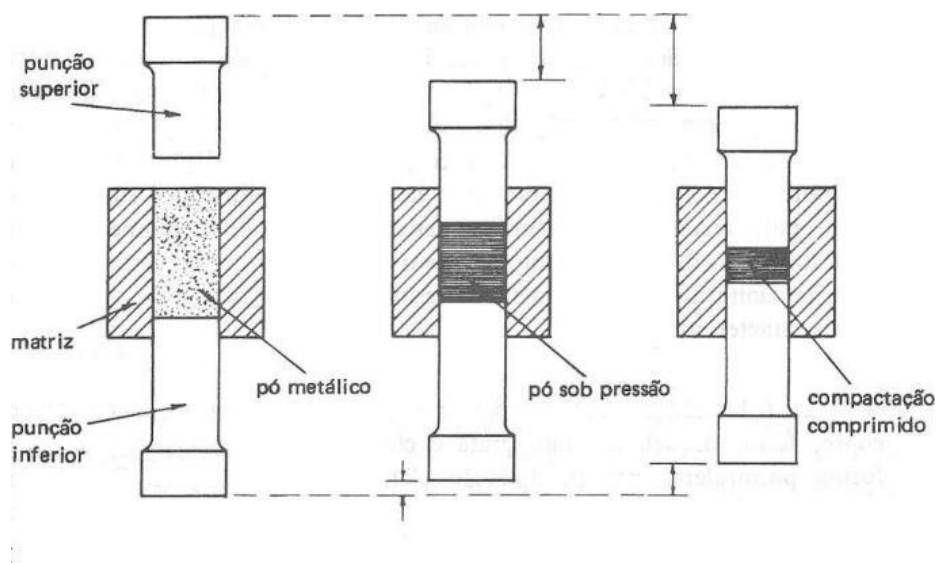


Figura 4 - Esquema da operação de compactação uniaxial de pós metálicos

Fonte: Chiaverini, (1986).

A compactação é realizada em prensas hidráulicas que funcionam com enchimento por peso, processo feito quase manualmente, gerando prejuízo na produção. Em mecânicas que operam com o princípio de enchimento da cavidade da matriz por volume, de maneira automática, obtendo uma produção de várias peças por minuto e ainda existem as prensas híbridas. (MORO; AURAS, 2007; CHIAVERINI, 1986).

Os parâmetros para a compactação do pó devem ser controlados. Parâmetros estes são essenciais para uma boa execução do processo. Nessa etapa a pressão que será aplicada pela prensa deve ser bem definida. A Tabela 1 indica intervalos de pressões de acordo com o tipo do material a ser compactado.

Tabela 1 - Pressões de compactação recomendadas para diferentes materiais

Materiais		Pressão
Peças de Latão		4,0 a 7,0 t/cm ²
Buchas Auto Lubrificantes de Bronze		2,0 a 3,0 t/cm ²
Escovas Coletoras Cu-grafita		3,5 a 4,5 t/cm ²
Metal Duro		1,0 a 5,0 t/cm ²
Buchas Porosas de Ferro		2,0 a 4,0 t/cm ²
Peças de Ferro e Aço	Baixa Densidade	3,0 a 5,0 t/cm ²
	Média Densidade	5,0 a 6,0 t/cm ²
	Alta Densidade	5,0 a 10,0 t/cm ²

Fonte: Chiaverini, (1986).

3.3.2. Sinterização

A sinterização é um processo de consolidação por queima (na presença ou não de oxigênio), na qual as partículas do pó são unidas formando agregados de alta resistência mecânica. Como consequência, tem-se a diminuição da porosidade da peça e o aumento da densificação. A sinterização ocorre a partir de 1/2 a 2/3 da temperatura de fusão, o suficiente para causar difusão atômica ou fluxo viscoso. A força motriz para a sinterização é a redução da área superficial (e da energia superficial) obtida pela substituição de um pó solto, cujas superfícies têm alta energia (sólido-vapor), por um sólido ligado, cujos contornos de grão apresentam energia mais baixa (BRAGA; FERREIRA; CAIRO, 2007).

Há três técnicas conhecidas para realizar a sinterização. A sinterização por fase líquida, quando há fase líquida do processo; A por fase sólida, quando nenhum componente entra na

fase líquida e sinterização ativada, a qual possui compostos que quando aquecidos aceleram o processo de sinterização (CHIAVERINI, 2001).

A sinterização por fase líquida acontece devido à formação de líquido na estrutura. Este líquido pode ser causado pela fusão de um dos componentes do sistema ou pode ser o resultado de uma reação entre, pelo menos, dois dos componentes do sistema. A ocorrência deste líquido tem papel decisivo na determinação dos mecanismos de sinterização e do aspecto final da estrutura sinterizada. A sinterização com fase líquida é um modo bastante atraente de consolidação de materiais dificilmente sinterizáveis por fase sólida e para a obtenção de materiais compósitos (BRITO, 2015)

Em fase líquida, a sinterização pode ter três estágios: o primeiro, conhecido como rearranjo, é caracterizado pelo grande movimento das partículas na fase líquida, em consequência provoca o rearranjo dessas partículas e densificação da estrutura. O próximo estágio é denominado dissolução e precipitação, que ocorre somente se houver uma solubilidade limitada do sólido na fase líquida. Por fim, o terceiro estágio que é chamado como ligação de fase sólida, no qual acontece apenas se não existe uma umidificação completa, podendo ocorrer um rápido crescimento de grão na fase sólida. Na Figura 5 pode-se observar as etapas da sinterização por fase líquida (ABREL; SKURY, 2015).

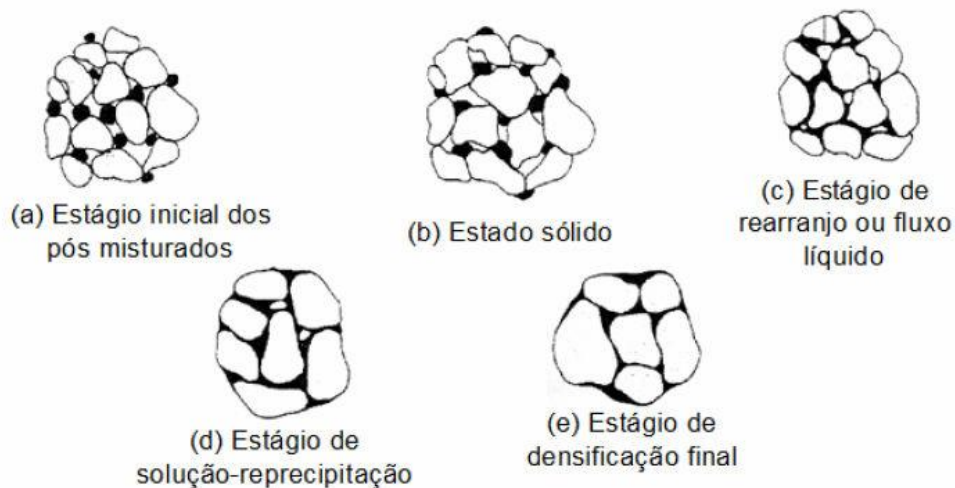


Figura 5 - Estágios de sinterização em fase líquida

Fonte: German (1998)

Na sinterização por fase sólida, material é transportado sem que haja qualquer tipo de líquido na estrutura. O material é transferido para a região de contato entre partículas vizinhas.

Rigidez e densificação são conseguidas pelo aumento da área de contato entre as partículas e o melhor empacotamento de matéria (SILVA; ALVES, 1998).

Este tipo de sinterização pode-se dividir em três etapas: inicialmente, é caracterizado pela formação de contornos de grãos na zona de contato entre as partículas ou na formação e crescimento de pescoços até o momento que exista interferência. A etapa intermediária, onde existe uma grande densificação do compactado, sendo caracterizado por estruturas na forma de cilindros interconectados. A densificação a princípio possui a estrutura de 70 a 92% de porosidade e finaliza com aproximadamente 8% de porosidade remanescente. A terceira e última etapa, consiste no isolamento dos poros na área dos contornos de grão e a eliminação sucessiva da porosidade por difusão de vacâncias dos poros, resultando em uma pequena densificação da estrutura. Os estágios presentes na sinterização sólida estão representados na Figura 6 (ABREL *et al*, 2015).

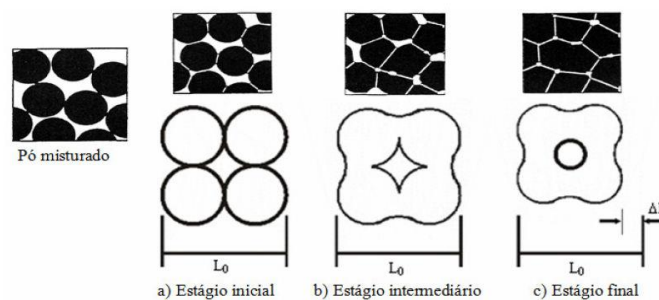


Figura 6 - Estágios de sinterização em fase sólida

Fonte: Lee et al., (1994), com adaptações: ABREL et al. (2015)

3.3.3. Técnicas para sinterização

A técnica de sinterização é o método utilizado para obter a sinterização desejada. A técnica de sinterização se divide em técnicas tradicionais e técnicas inovadoras. Inovadoras no sentido que elas são recentes e, aparentemente, vêm acompanhadas de efeitos não vistos nas técnicas tradicionais. Como técnicas tradicionais, pode-se citar a sinterização em forno resistivo, a sinterização com auxílio de pressão, e a sinterização reativa. Como exemplos de técnicas aqui consideradas inovadoras pode-se citar a sinterização por microondas, a sinterização por laser e a sinterização por plasma.

A sinterização em forno resistivo é a mais usada tanto em escala industrial como em escala de laboratório. Trata-se simplesmente de usar um forno resistivo. Em algumas ocasiões, o elemento aquecedor é a própria amostra. A estrutura sinteriza apenas com o auxílio da temperatura. Geralmente, trabalha-se com baixas taxas de aquecimento e resfriamento, devido "à inércia térmica dos fornos". Pode-se ainda manipular a atmosfera de sinterização. Os fornos resistivos, Figura 7, são os de mais fácil fabricação e permitem o processamento de uma maior quantidade de amostras cada vez (SILVA et al., 1998).

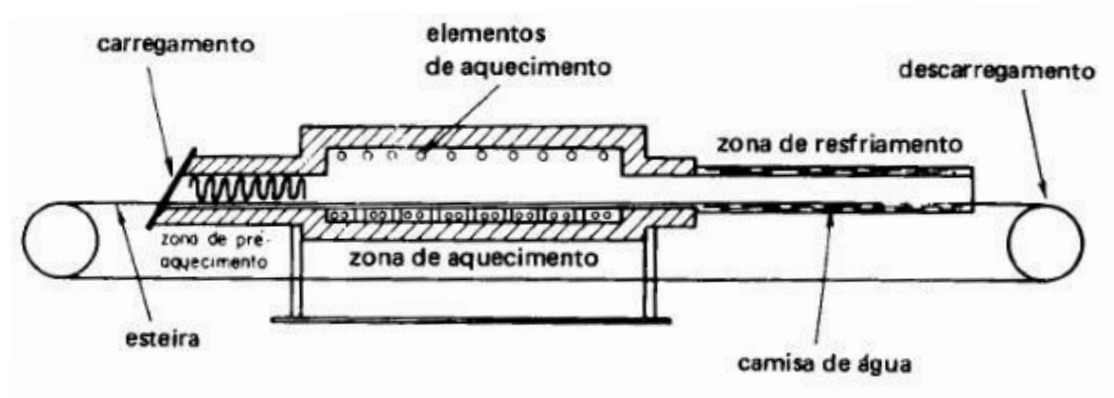


Figura 7 – Forno utilizado na sinterização

Fonte: Chiaverini, (1986)

Durante a operação deve-se levar em consideração o ambiente adequado para evitar que ocorram interferências indesejáveis. Portanto, se faz necessária a utilização da chamada atmosfera protetora que tem como objetivos: remover impurezas presentes, fornece um ou mais elementos químicos para se ligarem ao metal do compactado e o mais importante, evitar a reação de oxidação do material (CHIAVERINI, 2001).

Na Tabela 2 é apresentada vários materiais que podem ser sinterizados e a orientação para os parâmetros de temperatura, tempo de sinterização e controle da atmosfera.

Tabela 2 - Indicação de temperatura, tempo e atmosfera recomendados para vários materiais.

Material	Temperatura °C	Tempo mínimo	Atmosfera
Bronze	760-870	10-20	Hidrogênio, amônia dissociada, gás exotérmico.
Cobre	840-900	12-45	Idem
Latão	840-900	8-45	Idem
Ferro e Fe-gráfica-Cu	1000-1150	30-45	Idem
Níquel	1000-1150	30-45	Idem
Aço Inoxidável	1090-1285	30-60	Hidrogênio, amônia dissociada, vácuo.
Ímãs Alnico	1215-1300	120-150	Hidrogênio
Metal Duro	1425-1480	20-30	Hidrogênio – vácuo

Fonte: Chiaverini, (1986)

Na sinterização com auxílio de pressão dois fatores promotores de sinterização são usados simultaneamente: temperatura e pressão. A temperatura promove o aumento de

transporte de material e a pressão intensifica ainda mais este transporte por deformação plástica e deslizamento de partículas inteiras. Este método é recomendado quando se deseja sinterizar materiais que são dificilmente sinterizados somente por aquecimento, como as cerâmicas covalentes, ou quando se quer garantir o fechamento completo da porosidade de estruturas usualmente sinterizadas apenas por aquecimento (SILVA; ALVES, 1998).

A sinterização por plasma consiste em expor a amostra sob sinterização a um plasma inerte ou reativo. O aquecimento se dá por bombardeio dos íons do plasma sobre a superfície externa da amostra, principalmente, caso a amostra esteja em contato direto com o plasma, ou por radiação, caso a amostra esteja isolada. Em ambos os casos, o aquecimento da amostra acontece de seu exterior para o interior. O aquecimento pode se dar muito rapidamente, possibilitando taxas de aquecimento da ordem de 150 °C/min e, devido à condução de calor na amostra, grandes gradientes de temperatura na amostra são teoricamente possíveis (SILVA; ALVES, 1998).

3.4. APLICAÇÕES

A Figura 8 ilustra peças típicas obtidas através da metalurgia do pó. Praticamente todos os ramos da indústria como o automobilístico, o de informática, o aeroespacial, o de material eletroeletrônico, o de equipamentos e implementos agrícolas, o têxtil e uma infinidade de outros. Atualmente, segundo a Metal Powder Industries Federation - MPIF, nos Estados Unidos são produzidas, anualmente, mais de um milhão de toneladas de peças sinterizadas, ou seja, um crescimento bastante acentuado, considerando-se que, em meados da década de 80, essa produção beirava 350 mil toneladas (DELFORGE; FERREIRA; SILVA, 2007).



Figura 8 – Peças típicas obtidas por metalurgia do pó
Fonte: Groover (2010)

A utilização de ferramentas diamantadas é frequente. São produzidas por metalurgia do pó. As ferramentas diamantadas são compostos constituídos de partículas de diamante contidos dentro de uma matriz metálica e são bastante aplicados para ferramentas de corte.

Os compósitos diamantados sinterizados, são muito efetivos quando do seu uso para processar materiais não metálicos, frágeis e duros, tais como cerâmicos, rochas, concreto, vidro, etc (LIAO, 1992).

Durante o processo, as partículas de diamante são ligadas à matriz metálica, por uma combinação de interações químicas e físicas, e se faz necessário um rígido controle dos parâmetros de processamento para evitar ataque, dissolução e/ou grafitização do diamante, o que pode afetar o desempenho final do corte (DEL VILLAR, 2001).

No trabalho de Oiveira (2007) o autor faz um estudo e aplicação das ligas Fe-(5-10-15-20)%pCu com adição de 1% em peso de carbeto de silício (SiC), como matriz ligante para uso em ferramentas diamantadas. Ainda segundo o autor teores de cobre mais elevados, promovem maiores valores de dureza para as ligas Fe-Cu-SiC além de promover ganhos em aderência o que aumenta a resistência a abrasão.

As Nb-Cu são muito aplicadas na engenharia elétrica. Pode ser empregado na fabricação de contatos elétricos, resistências, bobinas para geração de altos campos magnéticos, eletrodos de solda, absorvedores de micro-ondas e dissipadores de calor. Estes materiais devem apresentar elevadas condutividades elétrica e térmica e resistência ao calor. A produção deste compósito pela tecnologia convencional é limitada, uma vez que estes elementos possuem pontos de fusão bastante diferentes. Uma alternativa é a adoção da metalurgia do pó. Na metalurgia do pó, podem ser elaboradas ligas à base de metais refratários (MELCHORS, 2010).

Sendo assim, justifica-se a adoção da metalurgia do pó neste estudo em virtude de que esta técnica permite o exato controle da composição química que se deseja do produto final, bem como a redução ou eliminação das operações de usinagem, a pureza dos produtos que são obtidos, o bom acabamento superficial e a facilidade presente na automação do processo produtivo. Estas são somente algumas razões que tornam a metalurgia do pó uma fonte produtora de peças para praticamente todos os ramos da indústria, tais como o aeroespacial e o automobilístico (DELFORGE *et al*, 2007).

Rotta (2005) analisou compósitos Nb-Cu, com as composições: Nb-5%Cu, Nb- 10%Cu, Nb-15%Cu e Nb-20%Cu. Aplicando uma compactação em 2 e 3tf (toneladas forças), para então

a sinterização a 600°C por uma hora. A caracterização das amostras foi realizada por ensaio de dureza.

Melchior (2011) fez a escolha por um compósito de Nb-20%Cu. Após a compactação sob diferentes forças, as amostras foram sinterizadas em um forno à vácuo. A sinterização por fase líquida destas amostras preparadas produziu uma estrutura homogênea e com granulação refinada.

Lima (2015) analisou um compósito Nb-15%Cu obtendo uma estrutura homogênea e densificada em 77,4% em relação ao valor da densidade teórica do compósito.

Monteiro (2016) estudou dois compósitos: um compósito Nb-12,5%Cu e Nb-25%Cu. Verificou-se, que a micro dureza vickers têm seus valores aumentados tanto com o aumento do tempo de moagem quanto com o aumento da temperatura de sinterização.

3.5. PROJETO DE MATRIZES PARA METALURGIA DO PÓ

A indústria de forjamento de metais porosos tem demonstrado um grande crescimento a nível nacional e mundial, à medida que ocorre um aprimoramento dos métodos de produção e um melhor aproveitamento das vantagens que a metalurgia do pó oferece. É uma tecnologia moderna e em franca expansão para produzir peças com bom acabamento, tolerâncias dimensionais e geométricas, pois o desenho da pré-forma é feito muito próximo da forma definitiva (PAULA, 2014).

Segundo Paula (2019) a qual detalha todo um projeto de uma matriz para a fabricação de uma cruzeta para metalurgia do pó, uma matriz de compactação que atenda o processo da metalurgia do pó deve seguir os passos a seguir:

3.5.1. Projeto do produto definitivo

Como em todos os projetos de ferramentais, moldes e matrizes, por exemplo, se faz necessário ter o projeto do produto definido. O projeto pode ser utilizado programas de desenho 3D. A Figura 9 mostra um projeto de uma cruzeta com todas as suas dimensões.

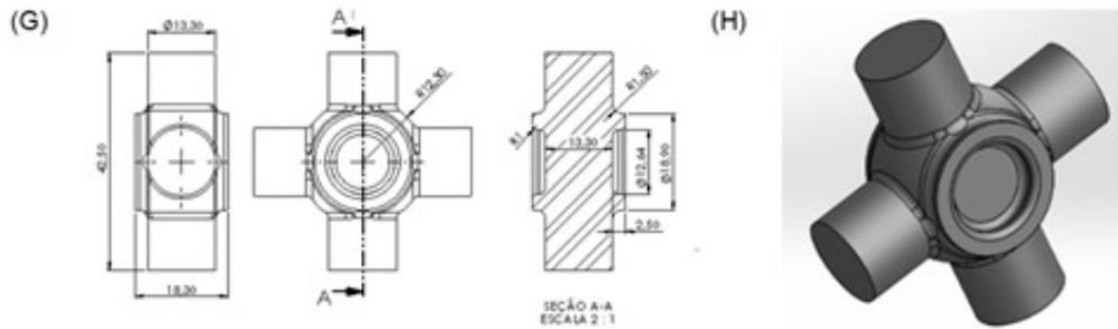


Figura 9 - Desenho da cruzeta detalhado (G) e em perspectiva (H)
Fonte: Paula (2019)

3.5.2. Estudo da pré-forma

O estudo da pré-forma também é chamado de *billet*. A pré-forma deve ser ligeiramente menor do que o produto final para seu alojamento posterior na cavidade da matriz para o forjamento. A Figura 10 mostra o projeto do *billet* para a cruzeta da Figura 9. A medida da espessura do *billet* auxilia no projeto da altura da matriz de compactação, pois ela será maior, obtendo recurso para ser alterado ao ser colocado mais pó metálico, devido aos processos posteriores da sinterização.

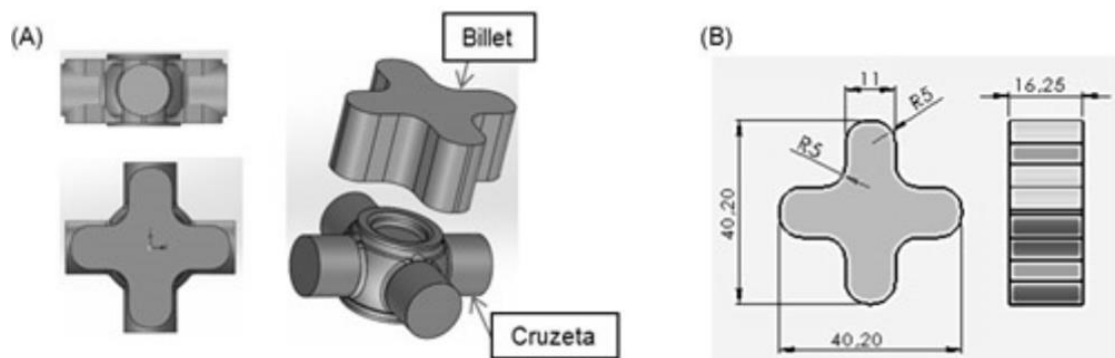


Figura 10 - Desenho de construção do *billet* (A) e suas dimensões (B)
Fonte: Paula (2019)

3.5.3. Projeto do ferramental

No projeto do ferramental são definidas todas as dimensões de cada item, especificações de materiais e tratamento térmico. A Figura 11 mostra as dimensões e especificações de material utilizadas para a fabricação do ferramental.

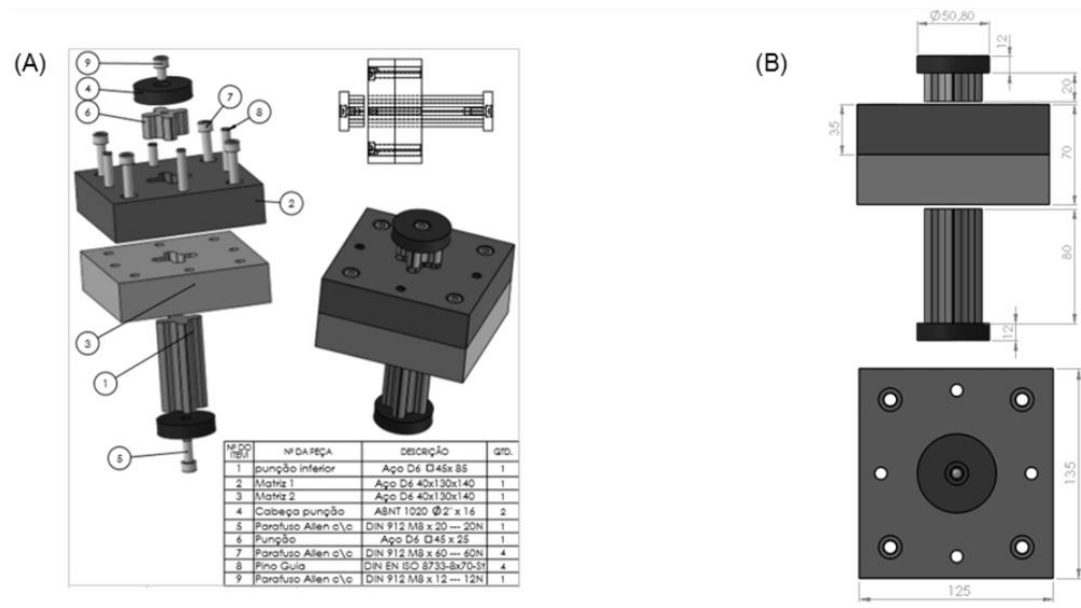


Figura 11 - Perspectiva e vista explodida (A) e dimensões externas do ferramental (B)
Fonte: Paula (2019)

3.5.4. Confeção da matriz e do punção

Após definido o projeto e detalhamento de cada item, se fez a seleção do material e a usinagem das placas. Um material bastante utilizado para punções é o aço D6 seguidos de têmpera e revenimento. Logo, tendo confeccionado a matriz e os punções, são realizadas os testes e ajustes de montagem do ferramental, como apresentado na Figura 12.

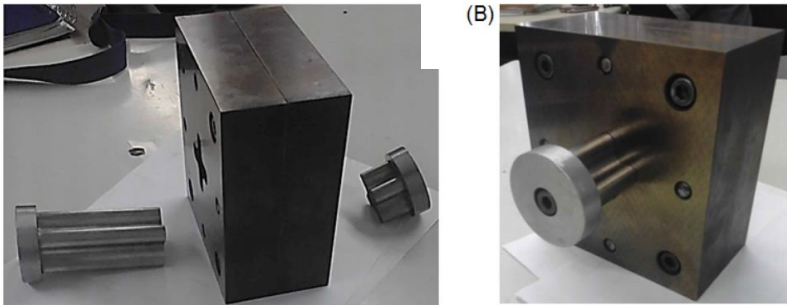


Figura 12 – Montagem da matriz e do punção após a fabricação
Fonte: Paula (2019)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A Figura 13 mostra uma estrutura sequencial que descreve a rota de desenvolvimento deste projeto.

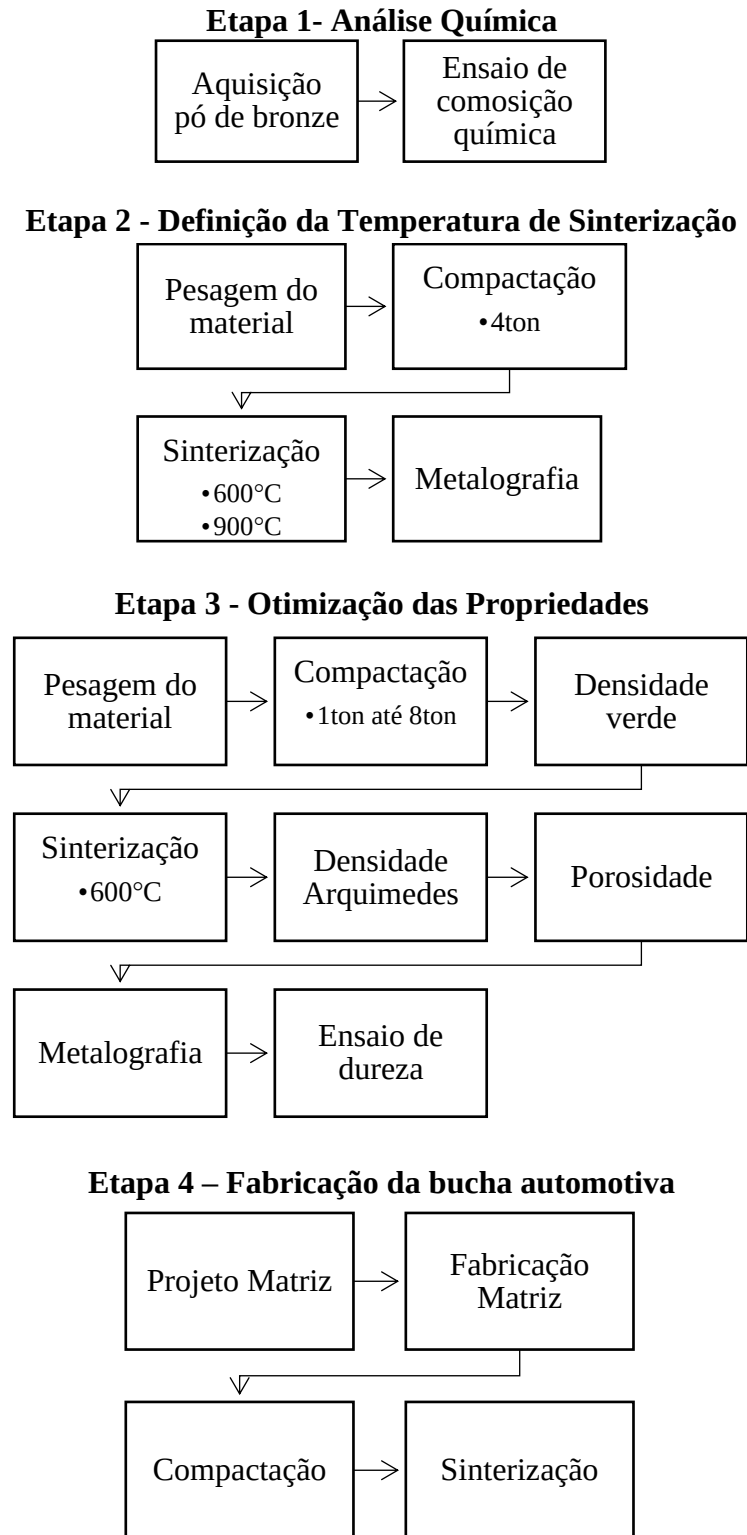


Figura 13 – Estrutura sequencial da rota de desenvolvimento do projeto

Fonte: Autor

4.1. ETAPA 1 – ANÁLISE QUÍMICA

O material utilizado nesta pesquisa é uma liga bronze adquirida pela empresa Pós Metálicos Especiais Ltda, de Campinas/SP. O material já foi fornecido na forma de pó, com isso o trabalho não possui a parte de moagem dos pós. Para a análise do material fornecido pelo fabricante foi realizado um ensaio de composição química.

4.1.1 Ensaio de composição

A composição química quantitativa do bronze no estado recebido foi determinada via fluorescência de raios X (FRX) da marca Thermo Scientific de modelo Niton XL2 disponível nas instalações da J Patrício Mateis, Empresa de Mossoró.

4.2 ETAPA 2 - DEFINIÇÃO DA TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

4.2.1 Pesagem do material

Para a confecção dos corpos de prova foi feito a pesagem do material para os dois corpos de prova. Foram pesadas duas amostras de 3g para fabricar dois corpos de prova para avaliar a influência da sinterização no corpo de prova. Foi utilizado a balança de precisão marca *Bioscale* modelo *FA2204* de quatro casas decimais.

4.2.2 Compactação do material

As duas amostras foram compactadas utilizando uma prensa hidráulica manual de bancada da marca Bovenau utilizando uma matriz de aço 4340 recozido com as dimensões mostradas na Figura 14, de forma que cada uma adquirisse geometria e dimensões desejadas. O pó na cavidade da matriz foi submetido a um carregamento uniaxial de 4 toneladas.

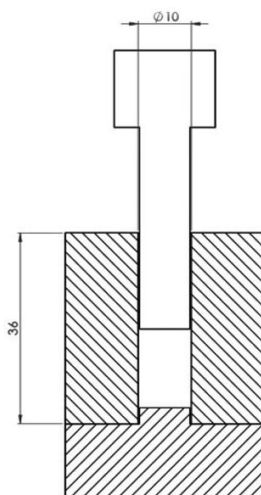


Figura 14 - Modelo de matriz utilizado para a compactação

Fonte: Bezerra (2019)

4.2.3 Sinterização

Após o procedimento de compactação foi realizada a sinterização. O procedimento foi realizado em forno tipo mufla de marca *GP* a uma temperatura de 600°C e 900°C. As temperaturas escolhidas foram selecionadas pelo diagrama de fases Cu-Sn apresentado na Figura 2. A temperatura de 600°C busca a sinterização da amostra por fase sólida, já a temperatura de 900°C busca a sinterização da peça por fase líquida. O tempo de sinterização foi 2h, sendo que as amostras foram retiradas do forno para resfriamento a temperatura ambiente. O objetivo principal é identificar uma temperatura ideal para que não ocorra a fusão completa dos elementos e que tenha um bom coalescimento dos grãos. A sinterização ocorreu em atmosfera não controlada. A Tabela 3 resume os parâmetros de compactação e sinterização utilizados.

Tabela 3 – Parâmetros de compactação e sinterização

Amostra	Carga de Compactação (ton)	Temperatura de Sinterização (°C)	Tempo de Sinterização (h)	Resfriamento
1	4	600	2	ar
2		900		

Fonte: Autor

4.2.4 Metalografia

Para a caracterização microestrutural, o material foi preparado via processo metalográfico. As amostras da Tabela 3 foram embutidas a frio utilizando resina acrílica e

posterior lixamento utilizando lixas com granulometria de 220 a 1200 e polidas com alumina de 1 μ m e atacadas quimicamente por 5 segundos. A solução utilizada para o ataque foi uma solução de 10ml de álcool etílico, 1ml de ácido clorídrico e 0,5g de cloreto de ferro. A solução foi utilizada por Júnior (2010) a qual revelou os contornos de grão. Após essa preparação, foi realizada a microscopia óptica das amostras utilizando o microscópio óptico GX51 da Olympus, onde foram tiradas fotomicrografias das suas microestruturas com aumento de 1000x com a câmera digital acoplada ao microscópio e auxílio do programa Analysis *GETIT*.

4.3 ETAPA 3 – OTIMIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES

Após definido a temperatura de sinterização na etapa anterior, a etapa 3 consiste em definir a pressão de compactação ideal para a fabricação da bucha. Nesta etapa é avaliado a pressão de compactação na densidade do material, na microestrutura do material e na dureza do material.

4.3.1 Pesagem e compactação do material

Foram produzidas oito amostras numeradas de 3 a 10 com massa de 3g cada uma. A balança utilizada foi a mesma da etapa 2. Cada amostra recebeu uma pressão específica de compactação. As oito amostras foram compactadas utilizando a mesma prensa hidráulica manual e a mesma matriz utilizada na etapa 2. Cada amostra foi submetida a um carregamento uniaxial de 1 tonelada a 8 toneladas.

4.3.2 Medição de densidade a verde

Depois dos pós transformados em corpos de prova o seu diâmetro e altura foram determinados para o cálculo da densidade a verde das oito amostras, ρ_v , segundo a Equação 1. As medições foram realizadas com um micrômetro Mitutoyo de 0,01mm de sensibilidade.

$$\rho_v = \frac{m}{V} = \frac{m}{\left(\pi \cdot d^2 / 4\right) h} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (1)$$

Onde:

m: massa da amostra (g);

V: volume do corpo de prova (cm³);

d: diâmetro (mm);

h: altura (mm).

4.3.3 Sinterização

Após a finalização das medições de densidade a verde, as oito amostras foram colocadas no forno para o procedimento de sinterização. O procedimento foi novamente realizado em forno tipo mufla utilizado na etapa 2. A temperatura de sinterização foi de 600°C, selecionada entre as temperaturas de 600°C e 900°C vista na etapa 2. A temperatura de 600°C apresentou um melhor coalescimento dos grãos e melhor controle dimensional. O tempo de sinterização foi de 2h, sendo que as amostras foram retiradas do forno para resfriamento a temperatura ambiente. A Tabela 4 resume os parâmetros de compactação e sinterização utilizados nesta etapa 3.

Tabela 4 - Parâmetros de compactação e sinterização para otimização das propriedades

Amostra	Carga de Compactação (ton)	Temperatura de Sinterização (°C)	Tempo de Sinterização (h)	Resfriamento
3	1	600	2	ar
4	2			
5	3			
6	4			
7	5			
8	6			
9	7			
10	8			

Fonte: Autor

4.3.4 Medição de densidade por Arquimedes

A densidade aparente dos materiais sinterizados em todas as condições foi determinada pelo princípio de Arquimedes, onde os corpos de prova foram imersos em água na qual foram medidas as massas seca, úmida e imersa dos corpos de prova. Por meio desses valores, foi possível calcular a densidade aparente para materiais porosos, definida pela Equação 2.

$$\rho_{aparente} = \frac{m_s}{m_u - m_i} \rho_{\text{água}} \quad [\text{g/cm}^3] \quad (2)$$

Onde:

m_s : massa seca da amostra (g);

m_u : massa úmida da amostra em (g);

m_i : massa amostra imersa em água (g);

$\rho_{\text{água}}$: densidade da água na temperatura ambiente em (g/cm³).

4.3.5 Medição de porosidade

Com relação à porosidade do material sinterizado em todas as condições, foi calculado a fração volumétrica de porosidade do material sinterizado, ε_{ap} , pela Equação 3.

$$\varepsilon_{ap} = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_t} \cdot 100 \quad [\%] \quad (3)$$

Onde:

ρ_a : densidade aparente da amostra sinterizada (g/cm³);

ρ_t : densidade teórica do material na condição de recebimento (g/cm³).

Nesta definição de densidade se enquadram as situações reais, nas quais a amostra é composta por poros, trincas, defeitos cristalinos, fases amorfas, entre outros defeitos internos. O método usado para determinar esta densidade deve considerar todos os tipos de porosidade presentes na amostra (OLIVEIRA, 2010).

4.3.6 Metalografia

A mesma metodologia utilizada no para a metalografia das amostras um e dois foi utilizada aqui. Para a caracterização microestrutural, o material foi preparado via processo

metalográfico. As amostras da Tabela 4 foram embutidas, lixadas e atacadas quimicamente. Após essa preparação, foi realizada a microscopia óptica utilizando aumentos de 500x e 1000x.

4.3.7 Ensaio de microdureza

Para o ensaio de microdureza foi utilizado o microdurômetro HMV-2 da marca Shimadzu. Os resultados foram obtidos na escala Vickers (Hardness Vickers – HV) e a carga utilizada nos ensaios foi de 490,3 mN durante 10s. Para cada amostra foram realizadas 10 medições, todas seguindo a norma ASTM E384 (2015).

4.4 ETAPA 4 – FABRICAÇÃO DA BUCHA

A bucha produzida é de aplicação em veículos baja e pertence ao sistema de direção do veículo. A função da bucha no sistema é reduzir o atrito e servir de apoio e guia para o deslizamento da cremalheira. A Figura 15 mostra as dimensões da bucha de dimensões 20x30x15mm a ser fabricada.

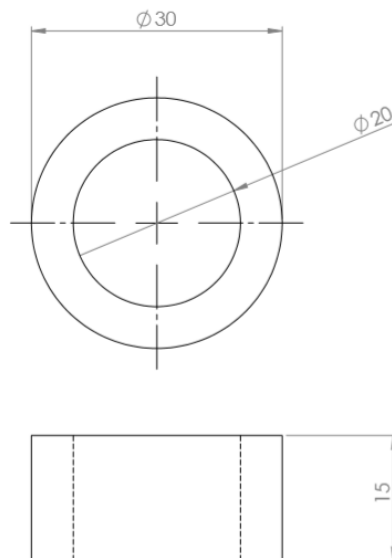


Figura 15 – Dimensões bucha de bronze automotiva

Fonte: Autor

4.4.1 Projeto da matriz

A peça a ser fabricada possui diâmetro interno e externo. Devido a essa geometria a peça quando for fabricada produzirá pressão na área interna e externa da matriz. Essa condição fornecerá um alto atrito dificultando a ejeção da peça na matriz. Assim há a necessidade de

desenvolver uma forma estrutural da matriz para que seja possível a peça sair de dentro da cavidade da matriz.

Utilizando o programa de desenho CAD Solidwoks foi projetada a matriz em questão respeitando as medições desejadas e o desenvolvimento de um método para retirada da bucha na matriz. O conjunto matriz-punção consisti em cinco peças indicadas na Figura 16 mostrando o conjunto montado com todas as cotas necessárias para a fabricação.

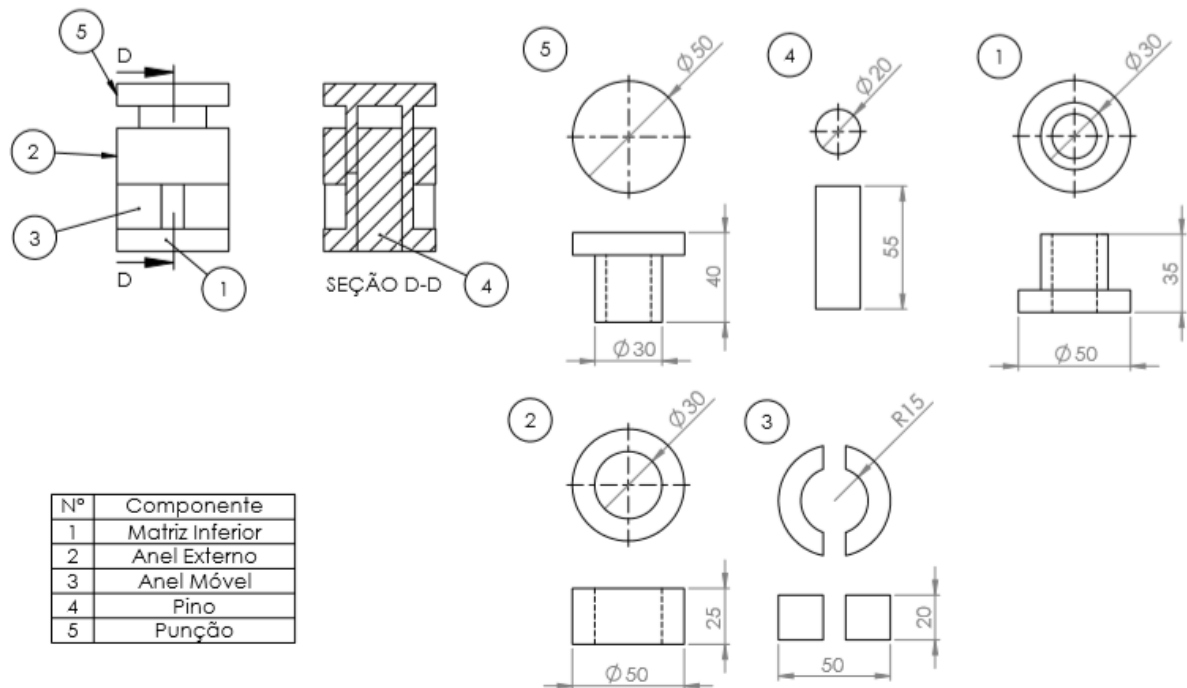


Figura 16 – Dimensões dos componentes que compõem a matriz

Fonte: Autor

A Figura 17 auxilia o entendimento do esquema de montagem das cinco peças da matriz. A figura ilustra uma vista explodida frontal da montagem dos componentes.

4.4.2 Fabricação da matriz

A matriz foi fabricada no Serviço Nacional da Indústria, SENAI, na cidade de Mossoró. As peças foram fabricadas utilizando o aço ABNT 4340, obedecendo o ajuste de montagem H (furo) e h (eixo). Esse tipo de ajuste é indicado para a fabricação de matrizes. Após a fabricação, as peças foram tratadas termicamente fazendo um revenimento em todas elas. A temperatura de revenimento foi de 400°C durante 2 horas. Para o resfriamento a peça foi resfriada em banho de óleo agitado. Em seguida, as peças foram lixadas utilizando lixa de granulometria 400 para

a retirada do óxido superficial formado no tratamento térmico da matriz. A Figura 18 mostra as peças da matriz após o procedimento de usinagem.

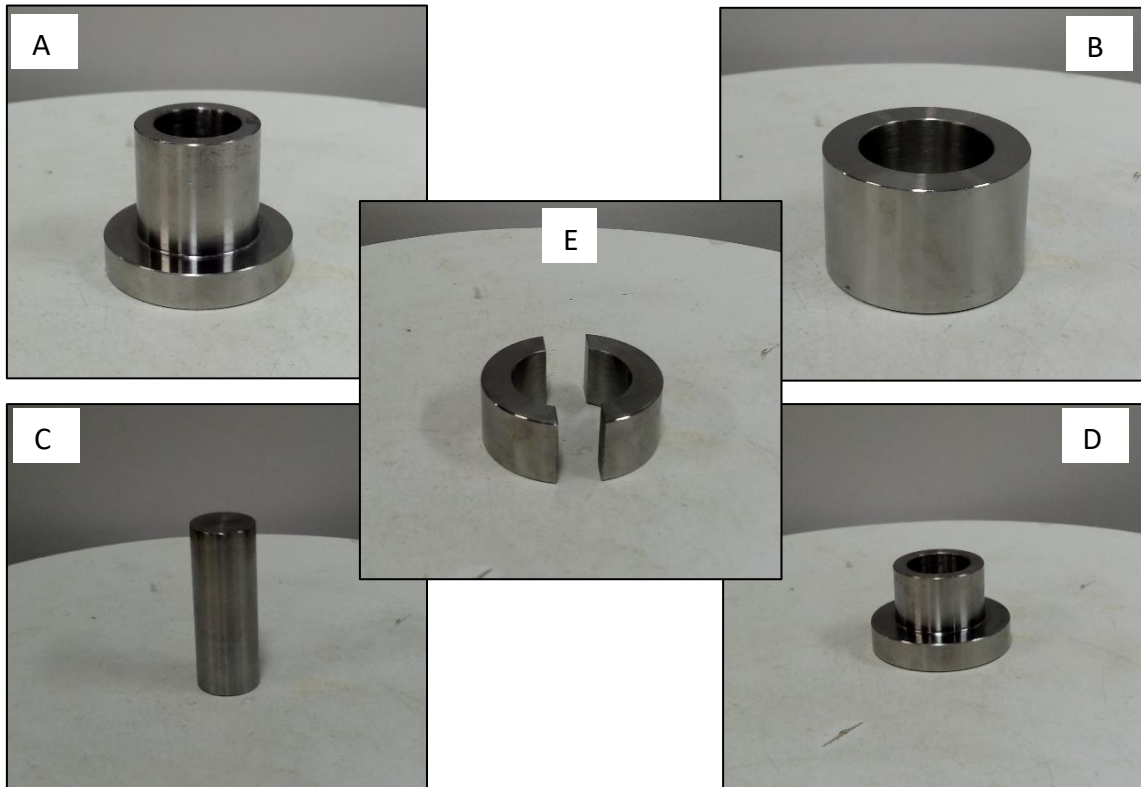


Figura 17 – Componentes da matriz após a fabricação: matriz inferior (A), anel externo (B), pino(C), punção (D) e anel móvel (E).

Fonte: Autor

4.4.3 Compactação

Para a obtenção da bucha, o pó de bronze foi adicionado na cavidade da matriz fabricada. A compactação utilizou novamente a prensa hidráulica manual de bancada já descrita nas etapas anteriores de compactação. O pó na cavidade da matriz foi submetido a um carregamento uniaxial de 4 toneladas. Essa carga foi encontrada com otimização do processo na etapa 3 a qual busca além de boas propriedades mecânicas um bom controle geométrico da peça. A Figura 19 mostra a matriz compactando o pó para posterior sinterização.

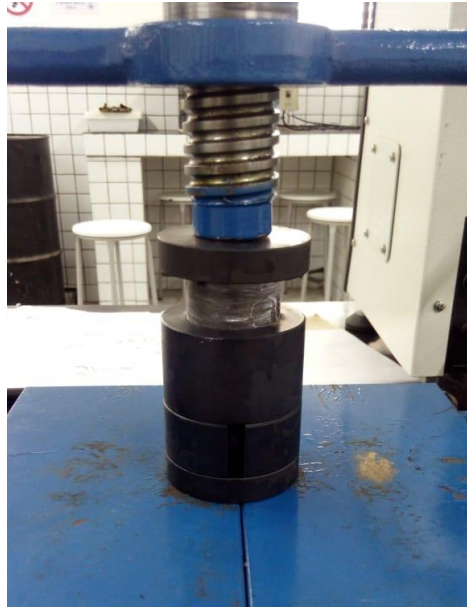


Figura 18 - Matriz compactando o pó de bronze para a formação da bucha

Fonte: Autor

Para ejeção da bucha na cavidade da matriz deve-se retirar as peças da Figura 18-D e 18-E, em seguida retira-se a peça da Figura 18-C com o auxílio da prensa. Depois gira-se a matriz 180° para aplicar a carga da prensa na matriz no sentido inverso para a retirada da peça da Figura 18-B e consequente a retirada total da bucha.

4.4.4 Sinterização

Os parâmetros de sinterização foram os mesmos apresentados na etapa 3. Como já foi descrito anteriormente, a temperatura de 600°C se mostra uma temperatura ideal de sinterização para ligas de cobre estanho. A Tabela 5 mostra os parâmetros selecionados para a compactação e sinterização da peça final automotiva.

Tabela 5 - Parâmetros de compactação e sinterização para a bucha de bronze

Pressão de Compactação (ton)	Temperatura de Sinterização (°C)	Tempo de Sinterização (h)	Resfriamento
4	600	2	ar

Fonte: Autor

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA LIGA DE BRONZE

A análise da composição química da liga em estudo pode ser verificada na Tabela 6.

Tabela 6 – Composição química do bronze utilizado

Elemento	Cu	Sn	Ni
Concentração (%)	69,21	27,79	2,49

Fonte: Autor

Com os dados do ensaio de composição o bronze fornecido pelo fabricante é um bronze SAE 41 da família amarelo, conforme National Bronze (2017). Esse tipo de bronze é característico por ser rico em estanho. Embora a quantidade de cada elemento não seja igual, esse bronze é o que mais se assemelha.

Segundo Gomes (1987) à medida que cresce o teor de estanho aumenta a resistência mecânica da liga, por outro lado, a ductilidade começa a cair a partir de 5 %. A microestrutura do bronze acima de 15% de estanho apresenta a precipitação de uma fase intermetálica, denominada delta, a qual é rica em estanho e possui dureza elevada. A associação desta fase delta com uma matriz alfa dúctil resulta em um material com excelentes propriedades antifricção, o qual é muito usado para a fabricação de mancais.

5.2. TEMPERATURA DE SINTERIZAÇÃO

Através da microscopia óptica foram obtidas fotomicrografias, Figura 20, das amostras sinterizadas nas temperaturas de 600°C e 900°C. As imagens obtidas possuem um aumento de 1000x. A amostra de bronze SAE 41 sinterizada a 900°C, Figura 20-B, não é adequada a metalurgia do pó, pois a essa temperatura o material foi fundido inviabilizando a técnica de sinterização. Além disso a peça apresentou deformações em sua geometria devido a elevada temperatura. Pela microscopia é possível observar os grãos no estado bruto de fusão. Nos contornos é possível visualizar elementos acumulados durante a fase sólido-líquido. Para a amostra sinterizada a 600°C, Figura 20-A, observou-se um bom coalescimento dos grãos.

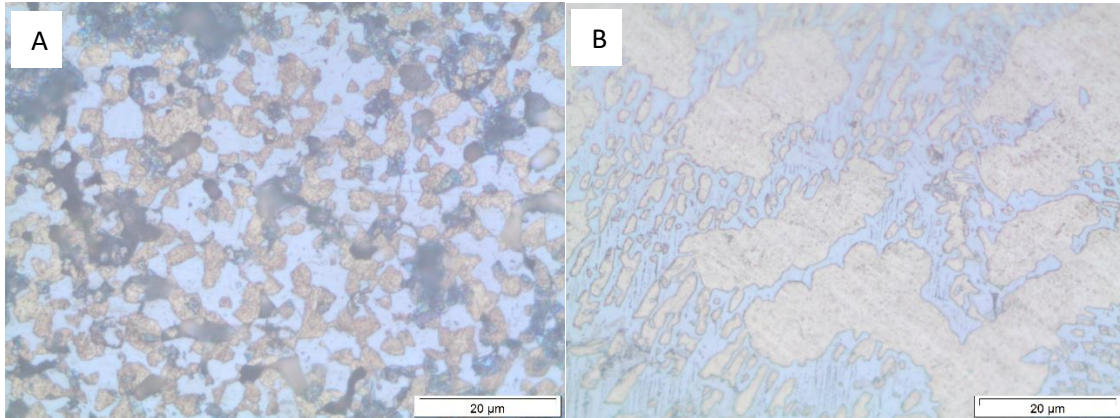


Figura 19 - Microscopia das amostras sinterizadas: (A) 600°C; (B) 900°C
 Fonte: Autor

5.3. DENSIDADE

As amostras foram compactadas e as medidas de altura (h) e diâmetro (d) são indicadas na Tabela 7. A altura das amostras diminuem com o aumento da pressão. O diâmetro interno da matriz é fixo, mas os valores do diâmetro das amostras sofrem uma pequena alteração devido a energia de compactação armazenada nas amostras.

Tabela 7 – Medições de altura das amostras após a compactação

Carga (ton)	Altura (h)
1	6,96
2	6,39
3	6,06
4	5,65
5	5,53
6	5,31
7	5,04
8	4,86

Fonte: Autor

O valor da densidade a verde das amostras é apresentado na Figura 21, a qual mostra a influência da densidade em função da carga aplicada. Quanto maior a carga menor a densidade do material. Quanto menor a densidade obtida menos poros a peça apresentará.

A carga máxima foi de 8 toneladas, mas a cada vez que se aumenta a carga a influência na densidade será menor. Conforme Arenhardt (2017), um esforço desnecessário será empregado no equipamento, já que não há mudança específica no resultado da compressibilidade.

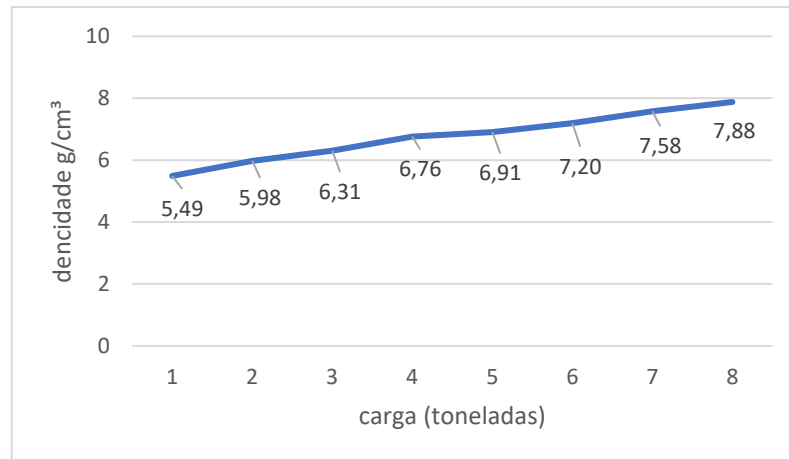


Figura 20 – Densidade a verde em função da pressão de compactação

Fonte: Autor

A densidade das amostras sinterizadas, Figura 22, foi calculada empiricamente por meio de uma balança analítica via princípio de Arquimedes. Observa-se que para as cargas de 1 a 3 toneladas a densidade não variou de forma significativa. Cargas maiores ou iguais a 4 toneladas não alteram significativamente a densidade.

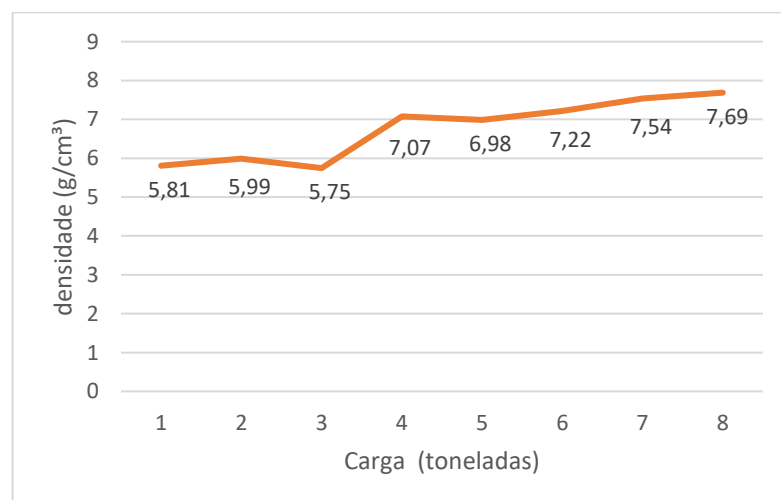


Figura 21 – Densidade após a sinterização em função da pressão de compactação

Fonte: Autor

5.4. POROSIDADE

A Tabela 8 mostra a variação da porosidade com a variação da carga. Com o aumento da carga de compactação a porosidade das peças diminuem. O aumento da força de aplicação na compactação diminui os espaços vazios presentes na peça. Conforme Dias (2018), o processo de sinterização dos pós revelou, de modo geral, uma tendência crescente para os valores de densidade e decrescente para os valores de porosidade, quando há um aumento da pressão de compactação.

Tabela 8 – Porosidade das amostras sinterizadas

Amostra	Carga (ton)	Porosidade (%)
3	1	31,31
4	2	29,12
5	3	32,04
6	4	16,34
7	5	17,42
8	6	14,62
9	7	10,80
10	8	9,06

Fonte: Autor

As amostras com baixa carga de compactação possuem muitos poros. A Figura 23-A e a Figura 23-C, compactadas a 1 tonelada e 3 toneladas, respectivamente, mostra a microscopia no campo claro. As mesmas amostras são também visualizadas em campo escuro conforme Figura 23-B e Figura 23-D. Pode-se ver a porosidade distribuída sobre toda a peça identificadas pelo círculo em destaque. Além disso, os poros formados são grandes em comparação a poros vistos em pressões de compactação maiores.

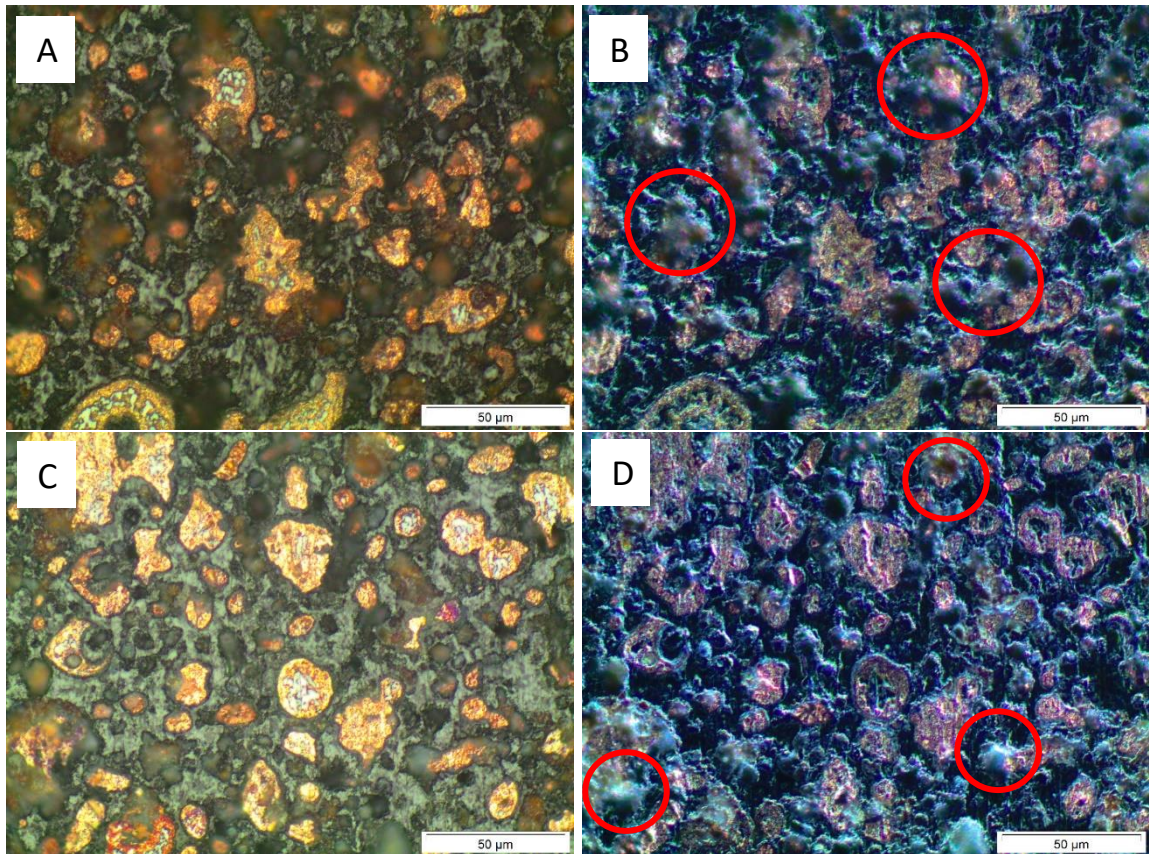


Figura 22 - Microscopia das amostras: 1ton no campo claro (A) e no campo escuro (B) e 3ton no campo claro (C) e no campo escuro (D)

Fonte: Autor

A Figura 24-A mostra a microestrutura com aumento de 1000x compactada a 4 toneladas. Pode-se ver também pela microscopia da mesma amostra em campo escuro, Figura 24-B, que a peça compactada a 4 toneladas possui baixa porosidade. Alguns poros são destacados pelo círculo na figura. Para a amostra compactada a 8 toneladas, amostra 10, não foi encontrado poros. A Figuras 24-C e a Figura 24-D mostram o corpo de prova 10 no campo claro e no campo escuro, respectivamente.

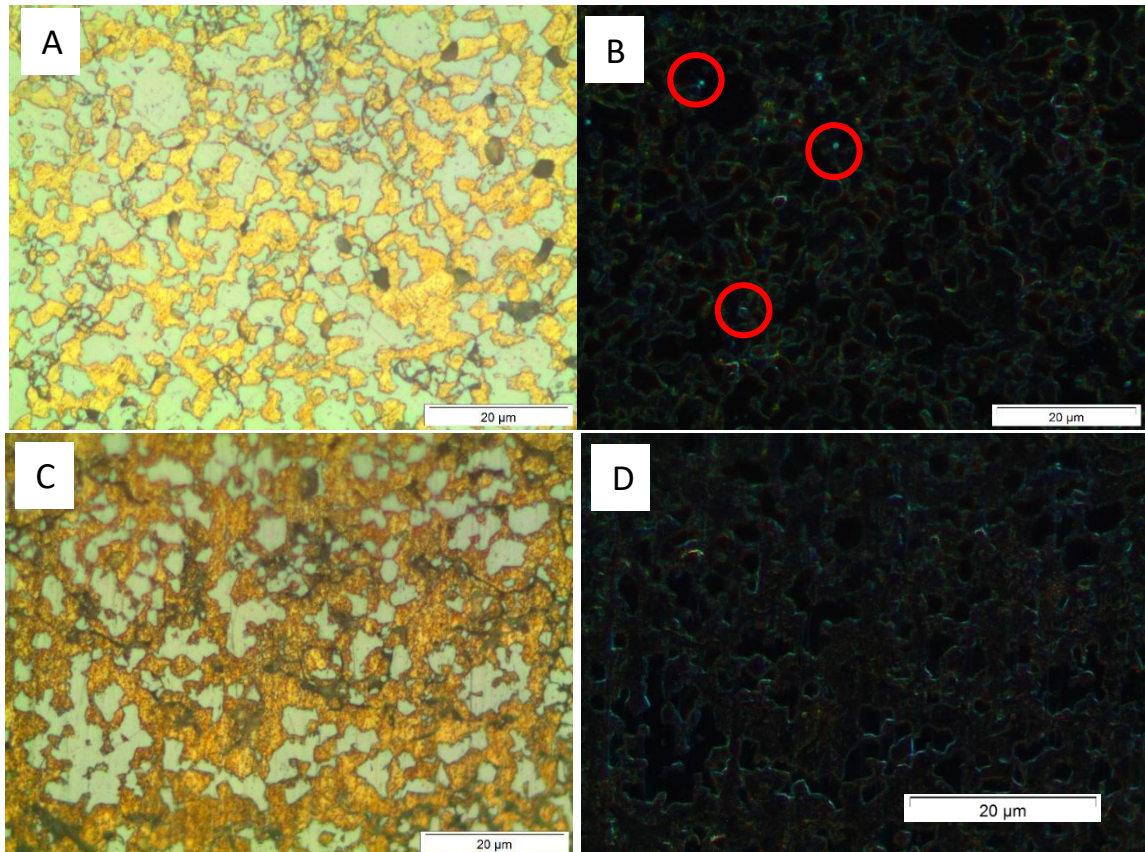


Figura 23 - Microscopia das amostras no campo escuro referente a amostra 6 (A) e a amostra 10 (B)

Fonte: Autor

Estudos mostram que com a diminuição da porosidade, ocorre aumento das propriedades mecânicas de um material (C. SCHADE *et al*, 2012). Assim pressões de compactação maiores são indicadas.

Em contrapartida foi observado que as peças com maiores cargas de compactação foram as que sofreram maiores deformações conforme pode ser visto na Figura 25, que mostra a deformação da geometria da amostra após sinterização compactada a 8 toneladas. Também é possível ver que as amostras de até 4 toneladas de compactação não sofreram mudanças dimensionais em sua estrutura. Devido o forno utilizado não ser de atmosfera controlada foi formado uma camada de óxido em sua superfície.

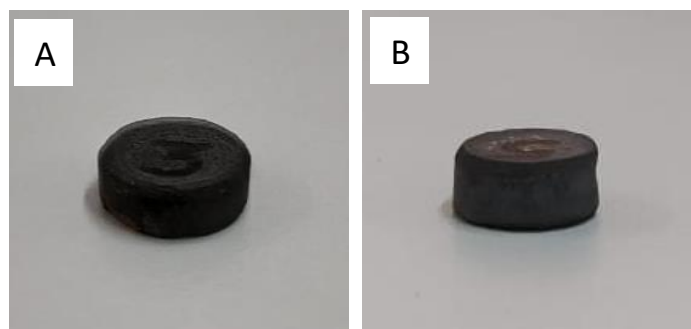


Figura 24 - Amostras de 4 toneladas (A) e 8 toneladas (B) sinterizadas

Fonte: Autor

5.5. DUREZA

Os resultados dos ensaios de dureza, medidos na escala HV. Foi investigado a dureza de todas as amostras. As amostras de 1 a 3 toneladas não foram possíveis de se realizar o ensaio devido a quantidade de poros na amostra, assim as indentações que ocorreram dentro de um poro ou na sua interface não mostram o valor real de dureza. A dureza das demais cargas é apresentada na Figura 26.

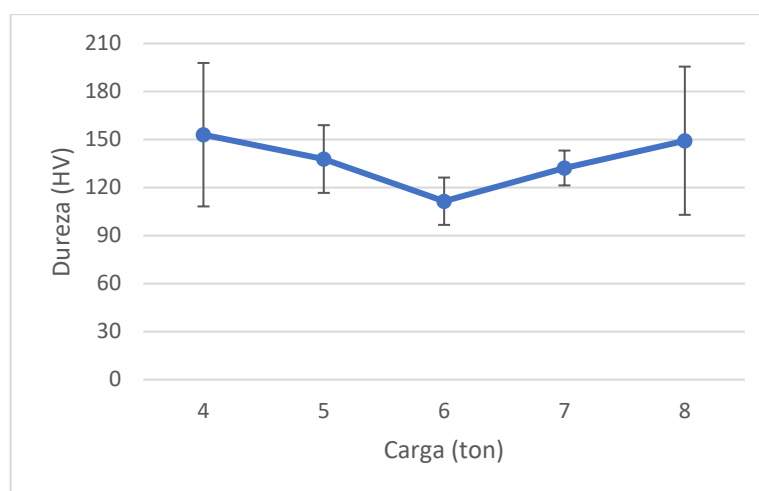


Figura 25 – Medições de dureza das amostras

Fonte: Autor

A dureza sofreu pouca alteração devido a variação ser apenas em função da carga. A dureza so seria significativamente alterada se a temperatura de sinterização fosse alterada, onde se teria a transformações de fase. Os valores de dureza estão condizentes com os valores de 142 a 172 HV encontrado por Li (2012).

5.6. PRODUTO

Não foi possível a obtenção da peça final devido a peça quebrar ao ser ejetada de dentro da cavidade da matriz. Mattos (2015) conseguiu obter uma roda dentada por metalurgia do pó utilizando uma prensa hidráulica com capacidade para 200 ton. A prensa utilizada no processo de compactação possui apenas 10 toneladas de capacidade máxima, sendo assim a baixa pressão de compactação uma possível causa para o problema.

6. CONCLUSÃO

A partir dos estudos realizados, conclui-se que:

- Por meio dos processos relacionados à metalurgia do pó, foi possível obter corpos de prova a partir do bronze;
- Na compactação e sinterização foi identificado uma pressão de compactação de 4 toneladas e temperatura de sinterização de 600°C mais eficiente;
- Em comparação entre a densidade aparente das amostras sinterizadas e a densidade a verde as amostras alteraram em um intervalo de 0,01 a 0,56 g/cm³;
- A porosidade, em geral, em todas as amostras sinterizadas apresentaram valores entre 9% e 32%;
- A microscopia mostrou os poros presentes na microestrutura, o coalescimento dos grãos e algumas fases, mas não foi possível a identificação de cada fase presente, devido à falta de disponibilidade de uma técnica de identificação de fases;
- O ensaio mecânico de micro dureza mostrou que o material sinterizado apresenta resistência mecânica compatível com o bronze comercial em torno de 136HV.
- Altas pressões de compactação não podem ser aplicadas devido a deformação do material e a consequente perda da geometria;
- As configurações desenvolvidas para fabricação da matriz e compactação do pó não são possíveis de obter a bucha de bronze.

A metalurgia do pó com a utilização do bronze se tornou viável, mostrando compatibilidade com a propriedade mecânica analisada. Sendo possível a substituição da metalurgia do pó por outros processos convencionais de fabricação.

7. SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados apresentados, é sugerido para possíveis trabalhos futuros:

- Realização de tratamentos térmicos posteriores à sinterização, como têmpera e revenimento;
- Adotar novos parâmetros ou modificar os que aqui foram analisados a fim de avaliar uma nova eficiência da sinterização;
- Fazer um DRX a fim de identificar as fases presentes na liga;
- Realizar um estudo de viabilidade econômica da produção de um produto;
- Fazer a sinterização em forno de atmosfera controlada a fim de um maior controle das dimensões finais da peça;
- Mudar configurações da matriz projetada a fim de que seja possível ejetar o pó compactado de dentro da matriz sem trincas ou quebras;
- Aumentar a quantidade de ensaios realizados, como ensaio de compressão, para uma melhor caracterização das propriedades mecânicas.

REFERÊNCIAS

ABREU, G. S.; SHURY, A. L. D. **Um recorte sobre a tecnologia de sinterização por plasma pulsado (SPS)**. Exatas & Eng., v. 11, n. 5, p. 49-59, 2015.

ARENHARDT, S. L. **Estudo do comportamento do alumínio (al) com adição de 1% cobre (cu) obtido pela metalurgia do pó convencional**. Uberlândia: Ciência & Engenharia, n. 24, 2017.

ASM METALS HANDBOOKS. **Properties and Selection: nonferrous alloys and special-purpose materials** – v.2, 1990.

ASTM E 384. **Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005.

BEZERRA, D. A. **Obtenção e caracterização do aço fe-0,25%c com adição de ti pelo processo de metalurgia do pó**. 2019

BRAGA, Neila de Almeida; FERREIRA, Neidenêi Gomes; CAIRO, Carlos Alberto Alves. **Obtenção De Titânio Metálico Com Porosidade Controlada Por Metalurgia Do Pó**. Química Nova, São José dos Campos, p.450-457, jan. 2007.

BRITO, F. Iran Gomes de. **Um Estudo Teórico Sobre A Sinterização Na Metalurgia Do Pó**. Sistema de Información Científica Redalyc, Holos, v. 3, n. 2, p.204-211, fev. 2015.

CALLISTER, W. D. **Ciências e engenharia de materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2007

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 4ª edição, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABMM), São Paulo, 2001.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica – Processos de Fabricação e Tratamento**. 2ª edição, Associação Brasileira de Metais (ABM), São Paulo, 136 p, 1986.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do pó**. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.

CDA. Copper Development Association. **Copper and its alloys**. Disponível em <http://copperalliance.org.uk/copper-and-its-alloys/alloys>. Acesso em: 02 de abril de 2016.

OLIVEIRA, L. J.; FILGUEIRA, M. **Aplicação de ligas Fe-Cu-SiC como matriz ligante em ferramentas diamantadas**. Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo, v. 26, n. 1, p. 15-20, 2007.

DEL VILLAR, M, **Powder Metallurgy**. 44, 82-90, 2001.

DELFORGE, D. Y. M.; et al. **Sinterização de uma mistura de cavaco de aço inoxidável com pó do mesmo material**. Uma nova tecnologia para a reciclagem de metais? Rem: Rev. Esc. Minas, vol. 60, n.1, Ouro Preto, Jan./Mar. 2007.

DIAS, A. N. O. **Produção e caracterização da liga bronze de alumínio obtida via metalurgia do pó utilizando moagem de alta energia**. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais para Engenharia) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

GOMES DE BRITO, F.; MEDEIROS, Katarine F.; MAGNER LOURENÇO, Jorge. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. Holos, v. 3, 2007.

GOMES, M. R. **Propriedades e usos de metais não-ferrosos**. São Paulo: ABM, 1987.

GONÇALVES, A, C. **Projeto De Uma Máquina e Estudo De Moldes De Injeção De Pós Metálicos**. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Mecânica, Ilha Solteira, 1995.

GROOVER, Mikell P. **Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, processes and Systems**. [S.l.: s.n.], 2010. 1002 p.

GULHÁEV, A. P. **Metais e suas Ligas**. Vol. 2. Editora Mir. 1981.

JÚNIOR., Manoel Quirino da Silva. **Estudo da liga cu-11,8al-xbe-0,3ti (x = 0,5; 0,6; 0,7) processadas termomecanicamente**. 2010. 98 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

LEE, W. E.; REINFORTH, W. M. **Ceramic microstructure property control by processing**. London: Chapman & Hall, p. 03-64, 1994.

LI S., IMAI H., ATSUMI H., **The effects of Ti and Sn alloying elements on precipitation strengthened Cu40Zn brass using powder metallurgy and hot extrusion**, Materials Science and Engineering: A, Volume 535, 2012.

LIAO, Y.S.; LUO, S.Y. **Wear characteristics of sintered diamond composite during circular sawing**. Department of Mechanical Engineering, National Taiwan University, Taipei (Taiwan), 157, 325-337, 1992.

LIMA, H. de. **Estudo de um sinterizado de Nb-15%pCu obtidos por moagem de alta energia e sinterização por fase líquida**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal- RN, 2015.

MATTOS, P. D. **Análise da Inclinação dos Dentes de Uma Roda Dentada Manufaturada pelo Processo da Metalurgia do Pó Convencional**. 35º SENAFOR. Porto Alegre. 2015.

MELCHIORS, G. **Caracterização de compósitos Nb-20%cu obtidos por moagem de alta energia e sinterizados por fase líquida**. Dissertação (Mestrado) – UFRN, Natal, 2011.

MONTEIRO, Anderson Dias. **Obtenção do compósito Nb-Cu via metalurgia do pó**. 2016. 71 f., il. Dissertação (Mestrado em Integridade de Materiais da Engenharia) —Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

MORO, N.; AURAS, A. P. **Metalurgia do Pó e o futuro da indústria**. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial, 28p., 2007.

NACIONAL BRONZE. **Brass and bronze standard casting alloys chart of specifications.** Disponível em: <www.national bronze >. Acesso em: 22 maio 2017.

OLIVEIRA, H. C. P. **Influência de adições de nióbio no sistema ferro-cobre para atuar como matriz ligante em ferramentas diamantadas.** 2010. 232f. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Faculdade de Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Rio de Janeiro, 2010.

PAULA, Márcio José Torres de. **Matriz de compactação em aço d6 para obtenção de pré-forma sinterforjada em aço ABNT 1045.** Ferramental, Santa Catarina, 11 mar. 2019.

PAULA. M. J. T. **Forjamento de sinterizados – LdTM – UFRGS – Metalúrgia do pó.** 2014

SAGAWA, M.; FUJIMURA, S.; TOGAWA, N.; YAMAMOTO, H.; MATSUURA, Y.; **New material for permanent magnets on a base of Nd and Fe.** Applied Physics Letters, 55(6):2083-2087. 1984.

SANDEROW, H. Management & Engineering Technologies. **Powder Metallurgy Methods and Design.** ASM Metals Handbook v7-Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, p. 23-24, 1998.

SILVA, A.G.P., ALVES JUNIOR, C. **A sinterização rápida: sua aplicação, análise e relação com as técnicas inovadoras de sinterização,** 1998.