

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INFLUÊNCIA DA SINTERIZAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE COBRE NAS PROPRIEDADES  
DE ENGRENAGENS PRODUZIDAS POR METALURGIA DO PÓ

por

Paulo Victor Schwab

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2019.

## DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO

### CIP - Catalogação na Publicação

Schwab, Paulo Victor  
Influência da Sinterização e da Infiltração de  
Cobre nas Propriedades de Engrenagens Produzidas por  
Metalurgia do Pó / Paulo Victor Schwab. -- 2019.  
21 f.  
Orientadora: Cintia C. Petry Mazzaferro.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Metalurgia do Pó. 2. Engrenagem Planetária. 3.  
Infiltração de Cobre. I. Mazzaferro, Cintia C. Petry,  
orient. II. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os  
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Paulo Victor Schwab

INFLUÊNCIA DA SINTERIZAÇÃO E INFILTRAÇÃO DE COBRE NAS PROPRIEDADES  
DE ENGRENAGENS PRODUZIDAS POR METALURGIA DO PÓ

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Processos de Fabricação.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Comissão de Avaliação:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup> Cintia Cristiane Petry Mazzaferro

Prof. Dr. Jose Antonio Esmerio Mazzaferro

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, dezembro de 2019

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a instituição UFRGS pelo apoio concedido durante esta etapa, também a minha família pela paciência e apoio incondicional, a minha orientadora por apontar a direção correta e fazendo as melhores correções, e também a empresa MK Sinter pelo apoio na produção das peças onde o trabalho se desenvolveu.

Schwab, Paulo V. **Influência da Sinterização e Infiltração de Cobre nas Propriedades de Engrenagens Produzidas por Metalurgia do Pó.** 2019, XXV. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## RESUMO

Neste presente trabalho são produzidas engrenagens planetárias de um conjunto que compõem uma caixa de transmissão de um motor de partida elétrico. Visando substituir a usinagem como método de fabricação atual, foi empregado o processo de fabricação por metalurgia do pó. Como engrenagens de um motor de partida necessitam de boas propriedades mecânicas e alta resistência ao desgaste por transformar a velocidade do eixo do motor em um grande torque, foram utilizadas duas ligas metálicas com essas características, a Astaloy 85 Mo e a Distaloy AB, ambas produzidas pela empresa Höganäs. As engrenagens foram prensadas, sinterizadas e sinterizadas com infiltração em diferentes teores de cobre com o objetivo de reduzir as porosidades e aumentar a tensão de ruptura. Então foram realizados ensaios de ruptura de compressão nas peças usinadas, sinterizadas e com infiltração. Também foi feita a medição de suas densidades, o ensaio de microdureza e a análise de microestruturas nas peças apenas compactadas (peças verde), sinterizadas e também com infiltração. Houve um aumento de dureza das engrenagens da condição verde para a sinterizada, mas quando foram infiltradas, foi observado um aumento de dureza nas engrenagens da liga Astaloy 85 Mo e diminuição naquelas produzidas com a liga Distaloy AB, quando comparadas com as sinterizadas. As peças somente sinterizadas não atingiram os valores de ruptura de compressão das usinadas, e as peças infiltradas superaram esses valores. A análise de microestruturas mostrou que as porosidades possuem efeito significativo nas propriedades mecânicas das peças. A técnica de infiltração de cobre foi eficaz para aumentar as propriedades mecânicas das engrenagens e a peça produzida com a liga Astaloy 85 Mo mais 7,5% de cobre infiltrado demonstrou ser a melhor escolha para substituir a peça usinada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Engrenagem planetária, metalurgia do pó, infiltração de cobre.

Schwab, Paulo V. **Influence of Sinterization and Copper Infiltration on the Properties of Gear**. 2019. XXV. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

## **ABSTRACT**

In the present work are produced planetary gears of an assembly that make up a transmission box of an electric starter motor. In order to replace machining as the current manufacturing method, the powder metallurgy manufacturing process was employed. As gears in a starter motor require good mechanical properties and high wear resistance by turning the motor shaft speed into high torque, two metal alloys with these characteristics were used, Astaloy 85 Mo and Distaloy AB, both produced by the company Höganäs. The gears were pressed, sintered and sintered with infiltration in different copper contents in order to reduce porosities and increase the breaking stress. Then compression rupture tests were performed on the machined, sintered and infiltrated parts. It was also made the measurement of their densities, the microhardness test and the microstructures analysis in the compacted parts (green parts), sintered and also with infiltration. There was an increase in hardness of gears from green to sintered condition, but when infiltrated, it was observed an increase in hardness in Astaloy 85 Mo alloy gears and decrease in those produced with Distaloy AB alloy compared to sintered ones. Sintered-only parts did not reach the machined compression break values, and infiltrated parts exceeded these values. The microstructures analysis showed that the porosities have significant effect on the mechanical properties of the parts. The copper infiltration technique was effective in increasing the mechanical properties of the gears and the part made from Astaloy 85 Mo alloy plus 7.5% infiltrated copper proved to be the best choice to replace the machined part.

**KEYWORDS:** Planetary gear, powder metallurgy, copper infiltration.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1.MOTIVAÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2.REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3.OBJETIVO PRINCIPAL</b> .....	<b>3</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1.ENGRENAGEM PLANETÁRIA DE UM MOTOR DE PARTIDA</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2.ETAPAS DA FABRICAÇÃO POR METALURGIA DO PÓ</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2.1. OBTENÇÃO DOS PÓS</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.2. MISTURA</b> .....	<b>4</b>
<b>2.2.3. COMPACTAÇÃO DOS PÓS METÁLICOS</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.4. SINTERIZAÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>2.2.5. SINTERIZAÇÃO EM FASE LÍQUIDA - INFILTRAÇÃO</b> .....	<b>5</b>
<b>3. CASO DE ESTUDO</b> .....	<b>6</b>
<b>3.1.DESCRICÃO DA ENGRENAGEM</b> .....	<b>6</b>
<b>3.2.ESCOLHA DAS LIGAS METÁLICAS E ADIÇÃO DE COMPONENTES</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2.1. DISTALOY AB</b> .....	<b>7</b>
<b>3.2.2. ASTALOY 85 MO</b> .....	<b>7</b>
<b>3.3.COMPACTAÇÃO DAS ENGRENAGENS</b> .....	<b>7</b>
<b>3.4.SINTERIZAÇÃO</b> .....	<b>7</b>
<b>3.5.PROCEDIMENTO DE SINTERIZAÇÃO EM FASE LÍQUIDA – INFILTRAÇÃO DE COBRE</b> .....	<b>8</b>
<b>3.6.INSPEÇÃO VISUAL</b> .....	<b>8</b>
<b>3.7.OPERAÇÕES COMPLEMENTARES</b> .....	<b>8</b>
<b>3.8.ENSAIO DE RUPTURA DE COMPRESSÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>3.9.ANÁLISE DE DENSIDADE, DUREZA, MICROESTRUTURAS E POROSIDADE</b> .....	<b>9</b>
<b>4. RESULTADOS</b> .....	<b>9</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>13</b>

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. MOTIVAÇÃO

De acordo com Moro (2007), pesquisas históricas indicam que a metalurgia do pó já era utilizada por meados de 6000 anos a.C., onde o homem produzia armas e ferramentas rudimentares com aglomerados de ferro. Porém, só no século XIX iniciou-se seu desenvolvimento. Buscava-se produzir peças de platina maleável, cujo ponto de fusão é acima dos 1770 °C, temperatura que não se atingia naturalmente na época, sendo assim não podendo ser produzidas por fundição normal. Após a Segunda Guerra Mundial que a metalurgia do pó teve seu grande desenvolvimento, pois a enorme demanda do setor automobilístico precisava ser atendida.

A metalurgia do pó tem como princípio básico a conformação de pós metálicos por meio da compactação, onde geralmente o pó metálico é prensado dentro de uma matriz atingindo seu formato desejado, e posterior tratamento térmico de sinterização onde o produto é aquecido a temperatura abaixo do ponto de fusão do material base que o compõe, dentro de uma atmosfera de gases controlada, atingido assim propriedades mecânicas e físicas desejáveis.

Segundo Chiaverini (1992), as vantagens são a possibilidade de produção e conformação de metais dificilmente produzidos por processos metalúrgicos convencionais, a possibilidade de obter características estruturais especiais, como porosidade controlada, a obtenção de materiais caracterizados por associar metais com não-metais, a possibilidade de associar metais diferentes obtendo materiais com características próprias dos metais que o compõem, a eliminação de excessos de material e rebarbas, assim podendo ter um controle rigoroso do produto final, e também a possibilidade de produzir metais com um nível de pureza muito elevado.

A possibilidade de produção em larga escala, de produtos com tolerâncias consideradas pequenas para os produtos, sendo eles de formas complexas e definitivas, muitas vezes não necessitando de operações complementares e acabamentos para o formato final do produto, o aproveitamento podendo chegar a 95% de matéria prima (algo muito alto comparado a usinagem que as perdas de matéria prima podem passar dos 50%), o custo energético e o tempo de produção considerado rápido para produzir grandes quantidades de produto considerando após ter o ferramental necessário concluído, além de ser um processo não poluente e ecologicamente correto devido a não geração de resíduos, fazem com que o custo seja baixo e sendo essa uma das principais vantagens da metalurgia do pó diante dos outros processos de fabricação, como por exemplo usinagem, fundição, estampagem e forjamento.

No trabalho de Da Silva (2018), é relatado que com o crescimento do setor automobilístico houve a necessidade de que cada vez mais a procura por peças mais baratas e rápidas de produzir para entregar em curtos prazos. Hoje em dia, aproximadamente 75% da produção de peças por metalurgia do pó são para abastecer o setor automobilístico. Nos veículos dos Estados Unidos, cerca de 19,5 kg do peso total dos carros são produzidos por metalurgia do pó, no Japão e Europa, aproximadamente 9,0 kg e no Brasil somente 5,0 kg. Como exemplo são utilizadas peças para componentes mecânicos do motor engrenagens do eixo de comando, buchas, anéis, válvulas, engrenagens da caixa de câmbio, planetárias de motores componentes de motores de partida, cubos, contatos elétricos, capas de mancal do virabrequim, sistemas de freio, discos de embreagem, velas de ignição, bielas, assentos de válvulas etc. Dessa maneira é possível ver a quantidade de aplicações e como a metalurgia do pó tem tendência e espaço para crescer internamente em comparação com os outros países.

Em Machado, et al (2015), estudos e modelagens para produção de engrenagens helicoidais sinterizadas, que compõem a primeira marcha de uma caixa de transmissão de carro popular moderno, e que necessitam de boas propriedades mecânicas em função da alta sollicitação de

torque, indicam que os resultados obtidos são satisfatórios apresentando boa qualidade, com propriedades mecânicas comparáveis com as de engrenagens fresadas, com alta produtividade e menor preço, tornando-se muito atrativo o método de produção nos dias atuais.

## 1.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Processos tradicionais para fabricação de engrenagens envolvem usinagem, forjamento, cementação de superfície, tratamentos térmicos e também possíveis operações de retífica nos dentes. Geralmente distorções no material ocorrem em função de tratamentos térmicos, sendo assim muitas vezes necessário operações de usinagem pós-tratamento. Com isso a indústria é levada a desenvolver materiais com propriedades que melhorem essa condição durante o processo de fabricação, assim também diminuindo a necessidade de retíficas posteriores. E para Lervolino (2019), o uso de materiais que apresentem alta usinabilidade também contribui com as demandas geralmente exigidas por fabricantes.

Como grande desafio hoje, a metalurgia do pó tem o de desenvolver soluções adequadas para atender o mercado de engrenagens com altas solicitações. O aumento de densidade do material e o desenvolvimento de ligas alternativas com propriedades superiores das atuais permitiria obter peças com desempenho semelhante ou melhor se comparado aos processos de usinagem.

Para Dos Santos (2017), em engrenagens sinterizadas, dependendo dos esforços em que estão destinadas a fazer em suas aplicações, diferentes materiais e densidades são utilizadas para sua fabricação. A metalurgia do pó tem se mostrado uma ótima técnica e um processo flexível para produzir engrenagens, sendo possível a produção com tolerâncias pequenas e tensões de ruptura tão alta quanto métodos de produção de engrenagens mais tradicionais, tendo a produção em grande escala e o custo como sua principal aliada. Com o desenvolvimento da metalurgia do pó aumentou-se a quantidade de produtos que em que ela é utilizada e novas técnicas são aplicadas para melhoramento de propriedades, tais como a infiltração de cobre que é um processo ainda pouco explorado, podendo nesses casos as peças serem comparadas com metais forjados.

Para a produção de engrenagens sinterizadas de alto desempenho, ligas metálicas com boas propriedades mecânicas devem ser utilizadas. É na escolha das ligas que começa o processo de produção de metalurgia do pó.

No trabalho de Lindskog (2013), é citado que a Distaloy AB é conhecida por sua robustez e amplamente utilizada quando se deseja altas propriedades mecânicas e resistência ao desgaste, e é um pó de ferro de alta liga parcialmente pré-ligado, contendo em sua composição cobre, níquel e molibdênio. Nas descrições Höganäs (1998), é abordado que com adição de grafite em sua mistura, obtém-se altas resistências mecânicas após a sinterização. Ele consiste em um pó de ferro com alto teor de pureza no qual os elementos da liga que o compõem são ligados por difusão. Assim a compressibilidade desse pó é muito alta, assim como sua resistência em estado verde e o baixo teor de oxigênio faz com que seja um componente com dimensional estável.

Da mesma forma em Höganäs (1998) é relatado sobre a liga Astaloy Mo85, que é um pó de aço atomizado em água e pré-ligado com 0,75% de molibdênio. Este pó de aço pré-ligado apresenta alta compressibilidade e microestruturas homogêneas após a sinterização. Juntamente com sua temperabilidade ideal, é uma excelente escolha quando deseja-se produzir componentes que exigem endurecimento de superfície. Possui alta dureza e boa tenacidade do núcleo. Combinado com a proporção de molibdênio faz com que tenha bom alongamento e resistência a tração.

Para Chiaverini (1992), uma das dificuldades enfrentadas pela metalurgia do pó é que existem partículas metálicas com porosidades. Essas porosidades quando presentes, afetam a característica dos pós, não somente na sua densidade como também suas propriedades

mecânicas. Com altas pressões de compactação no momento da prensagem dos pós, consegue-se chegar a uma peça com densidade suficiente, denominada de peça verde, sendo uma de suas principais características a alta porosidade. As porosidades da peça podem ser diminuídas no momento da sinterização, pois é onde ocorre a ligação entre as partículas que compõem a liga, e apesar de bons resultados, não é possível pelo método convencional diminuí-las quase em sua totalidade. Para melhorar as propriedades mecânicas nas peças sinterizadas, vários métodos para diminuir a porosidade são utilizados, dentre eles a sinterização em fase líquida, onde a presença da fase líquida favorece a ligação das partículas entre si e com isso diminui a porosidade do material.

No trabalho de Dincer (2014), a adição de 2% de cobre na sinterização da liga Astaloy 85 Mo (Fe -0,85Mo) tem o intuito de formar fase líquida visto que a temperatura de sinterização do ferro é de aproximadamente 1120°C enquanto a temperatura de fusão do cobre é em torno de 1085°C. Nesse processo se aumenta a temperabilidade do material e resulta em maior quantidade de martensita na microestrutura e também um aumento de densidade e diminuição da porosidade.

Porém para Pease et al (2002), aumentar o teor de cobre acima de 2% na mistura antes da fase de sinterização não se mostra muito eficaz e até podendo atrapalhar os efeitos benéficos por excesso de adição de cobre na mistura. Para o melhoramento das propriedades pela adição de cobre, a técnica de infiltração de cobre, que consiste em penetrar o cobre para dentro do sólido durante a fase de sinterização é uma técnica que apresenta melhores resultados.

Dessa maneira, no trabalho de Bonaldi e Schaeffer, para o melhoramento de propriedades mecânicas do aço inoxidável austenítico obtido por metalurgia do pó convencional foi feito o estudo e aplicação da técnica de infiltração de cobre com presença de fase líquida na sinterização, onde o líquido de cobre entra em contato com o material compactado verde entrando em seus poros por meio de forças de capilaridade preenchendo o interior do material. A utilização de cobre para infiltração promoveu redução da porosidade e aumento na densidade da peça, com isso ocorre melhora das propriedades mecânicas com o aumento de teor em percentual de cobre.

### **1.3. OBJETIVO PRINCIPAL**

Este trabalho teve como objetivo produzir, através de metalurgia do pó, engrenagens planetárias de um conjunto de transmissão de motor de partida. O objetivo foi utilizar duas ligas metálicas de pó de ferro de baixa liga, a Distaloy AB e a Astaloy 85 Mo, e comparar a quantidade de porosidade, dureza, a tensão de ruptura e as microestruturas das engrenagens em três diferentes condições: no estado verde, sinterizado, e com infiltração de cobre.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

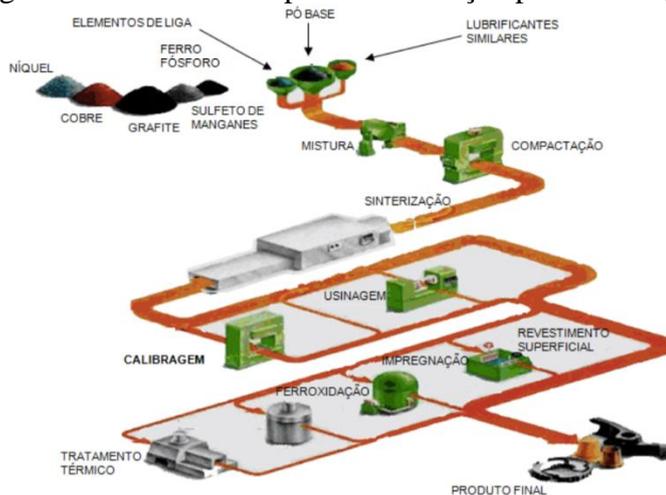
### **2.1. ENGRENAGEM PLANETÁRIA DE UM MOTOR DE PARTIDA**

No mercado atual existem muitos modelos de engrenagens planetárias. Uma de suas principais aplicações está no setor automobilístico em motores de partida elétricos. A planetária é um elemento mecânico composto por mais de uma engrenagem, a engrenagem solar, sendo ela a central do conjunto, as engrenagens planetárias, que giram em torno da engrenagem solar, e a anelar, a maior delas que fixa o eixo ao suporte. A principal função da engrenagem planetária é atuar como caixa de redução no motor de partida. Ela recebe a grande velocidade vinda do eixo do motor de partida e converte essa velocidade em um grande torque.

## 2.2. ETAPAS DA FABRICAÇÃO POR METALURGIA DO PÓ

Segundo Singh (2006), o processo de fabricação por metalurgia do pó envolve a fabricação dos pós, a etapa da mistura, compactação ou prensagem, e sinterização. Muitas operações complementares podem ser aplicadas ao processo, tais infiltração, usinagem, calibragem, tratamentos superficiais, como tamboreamento em abrasivos e banho de óleo, tratamentos térmicos, como têmpera e revenido, ferroxidação e etc. A sequência das principais etapas da fabricação por metalurgia do pó está ilustradas na Figura 1.

Figura 1 – Fluxo das etapas de fabricação por metalurgia do pó.



(Fonte: Krelling, 2013)

### 2.2.1. OBTENÇÃO DOS PÓS

A constituição dos pós é um dos fatores básicos para se obter uniformidade na liga metálica. Os pós mais utilizados são à base ferro e à base de cobre. Na maioria dos pós, o tamanho de cada partícula varia entre 10 a 40 microns. As propriedades químicas e físicas dos pós metálicos dependem do tamanho e principalmente da forma da partícula. Existem vários métodos para obtenção dos pós, estando entre eles os mais comuns o processo de atomização, redução química, e processo eletrolítico. Na atomização o metal é fundido e forçado através de um pequeno orifício com uma corrente a alta pressão gás ou um líquido entra em colisão com ele, atomizando as partículas. No processo de redução química os compostos de metais são reduzidos sendo colocados em fornos com atmosfera controlada e a temperatura abaixo do ponto de fusão do metal, então produto disto é moído até sua forma desejada. O pó de ferro geralmente é feito desta maneira. O processo eletrolítico geralmente é utilizado na fabricação de cobre e ferro extremamente puros. Nesse processo placas são colocadas como ânodo dentro de um tanque de eletrólito e placas de alumínio são colocadas no eletrólito para atuar como cátodo. Depois de um tempo o material se deposita nas placas e são retiradas do tanque para terem o material removido delas, seco e podendo ser produzidas com o tamanho de grão desejado.

### 2.2.2. MISTURA

Após a obtenção dos pós desejados, ocorre a etapa da mistura. Ela tem como objetivo homogeneizar os diferentes materiais que compõem a liga. Para Santos, (2017) também tem a importante tarefa de misturar os lubrificantes que são utilizados para diminuir o atrito entre os componentes da liga e as paredes da ferramenta de prensagem e com isso melhorar a compactação e a extração da peça compactada. Geralmente para pós de ferro são utilizados na

mistura Estearato de zinco e cera Kenolube. Para a realização da mistura, geralmente são utilizados misturadores do tipo duplo cone, ou misturadores em “V”.

Geralmente são utilizadas na indústria da metalurgia do pó quatro tipos de pré-misturas, sendo o principal o pó de ferro misturado com componentes de liga como cobre, níquel, carbono fósforo, entre outros. O segundo tipo de pré-mistura abrange os ferros pré-ligados com molibdênio ou molibdênio e níquel com carbono. O terceiro, é o ferro parcialmente ligado com molibdênio, níquel cobre e misturado com carbono. O quarto tipo de pré-mistura consiste nos sistemas híbridos que utilizam diferentes combinações dos outros métodos. O aspecto comum a todas pré-misturas é que elas utilizam lubrificantes como componente de liga para auxiliar na etapa de compactação.

### **2.2.3. COMPACTAÇÃO DOS PÓS METÁLICOS**

A compactação do pó, também chamada de prensagem, é a etapa onde o pó da liga metálica é transformado na peça com propriedades dimensionais que serão muito próximas às da peça final. Geralmente realizada em temperatura ambiente, a prensagem é feita dentro da matriz por punções operados por uma prensa mecânica ou hidráulica. A matriz da peça possui a cavidade no formato da peça desejada e é onde o pó metálico é derramado. O pó geralmente escoo para dentro da matriz por força da gravidade passando por um funil. Os punções superior e inferior aplicam a pressão no pó para virar a peça e também dão formato à superfície superior e inferior respectivamente.

Os materiais da matriz e punções devem ser de alta qualidade para suportar produções em larga escala, assim como a alta pressão aplicada no pó a ser compactado. As pressões são aplicadas tanto de cima quanto de baixo simultaneamente pelos punções e devem ser altas suficientemente para criar as ligações de solda a frio no pó metálico e assim ser possível que a peça tenha uma resistência verde suficiente para ser extraída da matriz e manuseada sem quebrar ou esfarelar. Nessa etapa, aumentando a pressão, a densidade da massa de pó é aumentada e a porosidade diminui, mesmo assim as peças não possuem resistência e densidade suficientes para serem utilizadas. Para adquirir essas propriedades, elas devem ser sinterizadas.

### **2.2.4. SINTERIZAÇÃO**

Em Díncer (2014), é falado que, após moldadas, as peças compactadas verdes não apresentam resistência necessária para sua utilização. Para isso existe a necessidade de tratamento térmico de queima chamado sinterização onde, após a sua realização, a peça possui os requisitos mecânicos para aplicação final.

A sinterização é um tratamento que ajuda os pós a fazerem suas ligações químicas entre si em altas temperaturas onde ocorre a difusão/coesão entre átomos formando uma estrutura coerente e sólida. Assim, a sinterização forma ligações interpartículas entre os pós, reduzindo a área superficial das partículas durante o processo.

Geralmente a temperatura utilizada para a sinterização é da ordem de  $2/3$  a  $3/4$  da temperatura de fusão do material base que compõe a liga metálica. Assim, a sinterização é um processo que ocorre geralmente em estado sólido no qual acontece ligação química entre os grãos, com a função de eliminar ou diminuir a porosidade existente no material prensado verde. Se algum componente da liga tiver sua temperatura de fusão abaixo da temperatura de fusão do metal base, ocorrerá então a sinterização em fase líquida. A sinterização em fase líquida se mostra eficaz em mecanismos de difusão por haver mistura líquido-sólido durante a sinterização. A fase líquida presente faz com que sejam criadas forças capilares dentro dos poros e assim influenciando a taxa de transporte de massa, o que resulta em melhores propriedades nas ligações se comparado com a sinterização de estado sólido. No estágio final

do processo de sinterização, ocorre a diminuição dos poros causada pelo crescimento dos grãos e por consequência ocorre o aumento da densidade.

### 2.2.5. SINTERIZAÇÃO EM FASE LÍQUIDA - INFILTRAÇÃO

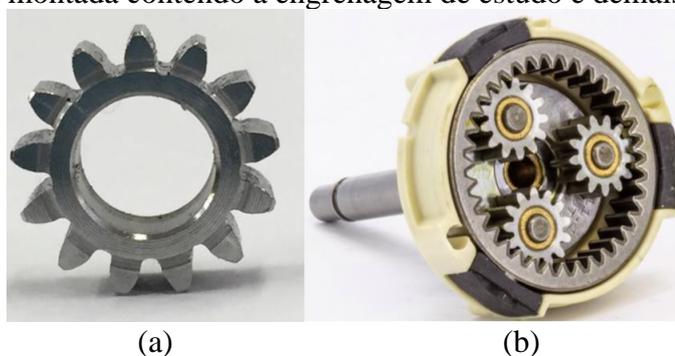
A presença de fase líquida na sinterização é algo utilizado na metalurgia do pó principalmente para reduzir as porosidades e aumentar a densidade do material. É quando um dos componentes da liga funde durante o aquecimento, e o componente sólido da liga apresenta uma solubilidade no líquido, promovendo mais facilmente o rearranjo pelo movimento das partículas. Na maioria dos casos, a técnica pode levar à obtenção de estruturas que dão ao material melhores propriedades mecânicas em relação ao material sinterizado somente em fase sólida. Dentre os tipos de sinterização em fase líquida, está a infiltração de material metálico, que consiste basicamente em colocar o material a ser infiltrado em contato com a superfície do material compactado poroso. A partir do momento em que o material infiltrante entrar em fusão, forças capilares o forçarão para dentro do material compactado poroso, preenchendo seus poros.

## 3. CASO DE ESTUDO

### 3.1. DESCRIÇÃO DA ENGRENAGEM

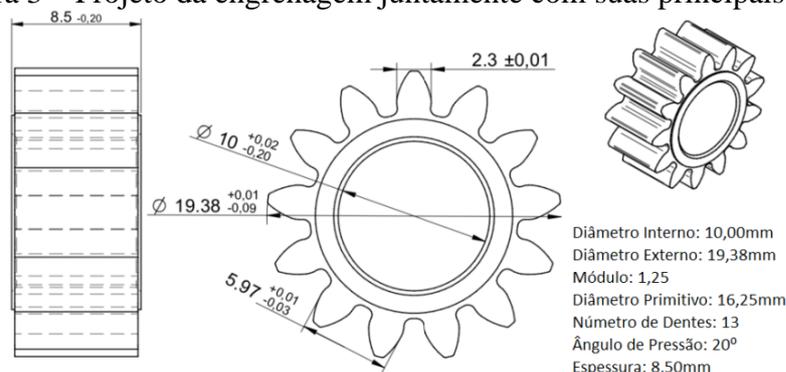
A engrenagem produzida no presente estudo é uma engrenagem planetária que faz parte de um conjunto transmissão que compõe motores de partida utilizados no mercado de peças paralelas para veículos da GM como Astra, Vectra, S10, Blazer, Kadett, Ipanema entre outros. Ela tem como método de fabricação atual a usinagem. A planetária, juntamente com a engrenagem feita por usinagem são mostradas na Figura 2(a) e Figura 2(b).

Figura 2 – (a) Engrenagem obtida no estudo, que é atualmente produzida por usinagem; (b) Planetária montada contendo a engrenagem de estudo e demais componentes.



Na figura 3 está representado o desenho da engrenagem com suas principais dimensões de projeto.

Figura 3 – Projeto da engrenagem juntamente com suas principais dimensões.



### **3.2. ESCOLHA DAS LIGAS METÁLICAS E ADIÇÃO DE COMPONENTES**

Duas ligas desenvolvidas e produzidas pela empresa Höganäs foram escolhidas para a produção das engrenagens, sendo elas a Distaloy AB e Astaloy 85 Mo, devido às suas características como boas propriedades mecânicas e alta resistência ao desgaste.

#### **3.2.1. DISTALOY AB**

A liga Distaloy AB possui em sua composição ferro como elemento base, cobre, níquel e molibdênio como elementos de liga, sendo suas proporções 1,5%, 1,75% e 0,5% em peso, respectivamente. Para melhorar as propriedades de resistência mecânica das engrenagens, foram adicionados carbono em forma de grafite com teor de 0,6% em peso. Na mesma proporção do grafite foi adicionado o lubrificante kenolube, que serve para diminuir o atrito das partículas da liga entre si no momento da prensagem e também diminuir o atrito entre partículas da liga com as paredes da cavidade tanto no momento da prensagem quando da extrusão do compactado verde. A mistura para deixar a Distaloy AB, grafite e kenolube uma mistura uniforme foi feita durante 15 minutos em um misturador de duplo cone.

#### **3.2.2. ASTALOY 85 MO**

A liga Astaloy 85 Mo possui em sua composição ferro como elemento de base e molibdênio como elemento de liga, sendo o mesmo na proporção de 0,85% em peso. Para melhorar as propriedades mecânicas de alongamento e de sinterização foram adicionados carbono em forma de grafite e cobre no teor de 0,2% e 1,0% em peso, respectivamente, aos pós da liga. O lubrificante kenolube foi adicionado no teor de 0,6% em peso pelos mesmos motivos da adição na liga Distaloy AB, assim como a mistura se deu da mesma maneira e mesmos parâmetros.

### **3.3. COMPACTAÇÃO DAS ENGRENAGENS**

Para a prensagem foi utilizado uma prensa de compactação uniaxial, hidráulica com matriz flutuante. Foram ajustados e calibrados os parâmetros de prensagem como enchimento de pó na cavidade da matriz e a pressão de compactação de acordo com a espessura da peça e a densidade verde desejada. A medição da espessura foi feita com auxílio de um paquímetro digital, com precisão de 0,01 mm. A densidade verde varia de acordo com a força de compactação da prensa. Aumentando a força de compactação, aumenta-se a pressão dos punções sobre a peça e assim a densidade. A pressão de compactação na peça foi aproximadamente 600 MPa, resultando aproximadamente 7,10 g/cm<sup>3</sup> de densidade verde nas peças e 8,0 g de massa.

### **3.4. SINTERIZAÇÃO**

Foram sinterizadas as peças de Distaloy AB e Astaloy 85 Mo em um forno de sinterização tipo esteira contínua com atmosfera de gases controladas. As peças compactadas verdes foram carregadas diretamente na esteira de sinterização. O forno utiliza nitrogênio na atmosfera controlada e para a queima de gás utiliza hidrogênio. Entre as fases do forno de pré-aquecimento (onde os lubrificantes adicionados a mistura são queimados), sinterização (aquecimento principal do forno) e resfriamento, a peça fica aproximadamente 4 horas. A temperatura de sinterização utilizada para todas as amostras foi de 1120 °C. Nessa etapa foram somente sinterizadas as peças com suas ligas correspondentes sem adição de técnicas para melhoramentos de propriedades.

### 3.5. PROCEDIMENTO DE SINTERIZAÇÃO EM FASE LÍQUIDA – INFILTRAÇÃO DE COBRE

Foram utilizadas para o processo de sinterização em fase líquida por infiltração de cobre quatro chapas de cobre eletrolítico, sendo suas massas de 0,6 g, 1,2 g, 1,6 g e 2,0 g e para serem aplicadas diferentes proporções, representando 7,5%, 15% e 20% e 25%, respectivamente, de massa em relação aos 8 g da peça compactada verde da engrenagem. Com as peças compactadas verdes posicionadas para passar no forno de sinterização, as chapas de cobre foram sobrepostas a elas.

Os tipos de amostras produzidas, tanto sinterizadas quanto as que foram realizadas com o processo de infiltração de cobre estão representadas na Tabela 1 com a porcentagem em massa de cobre utilizado para infiltração.

Tabela 1- A liga metálica e a porcentagem em massa de infiltração de cobre.

Liga Metálica	Porcentagem em massa de cobre adicionado para infiltração (%)				
	0	7,5	15	20	25
Astaloy 85 Mo	0	7,5	15	20	25
Distaloy AB	0	7,5	15	20	25

### 3.6. INSPEÇÃO VISUAL

Após serem sinterizadas, foi feita a inspeção visual nas peças com o intuito de verificar se houve a correta infiltração de cobre e se houve saturação por excesso de cobre sobreposto as peças. Também para identificar rebarbas nos dentes provenientes da prensagem e diferenças na coloração na superfície da peça. Neste procedimento foram desconsideradas as peças que sofreram saturação de cobre na infiltração, pois alteraram suas características dimensionais e também ficaram com excesso de cobre com aparência derretida na superfície das peças. As peças que sofreram saturação e foram desconsideradas são as seguintes:

- Astaloy 85Mo, nas proporções de 15%, 20% e 25%;
- Distaloy AB, na proporção de 25%;

Nessa etapa do procedimento experimental, foi observado que foi possível infiltrar até 7,5% de cobre na liga Astaloy 85 Mo e até 20% na liga Distaloy AB sem haver a saturação de cobre e/ou problemas dimensionais.

### 3.7. OPERAÇÕES COMPLEMENTARES

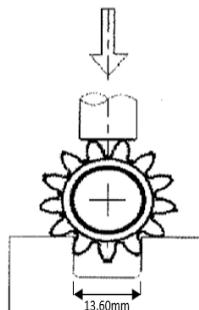
Identificadas rebarbas e diferenças na coloração, foram aplicados os tratamentos de superfície de tamboreamento em um tambor rotativo com revestimento interno no formato oitavado, com a presença de pedras abrasivas conhecidas como *chips*, juntamente com detergentes e água durante o período de 30 minutos. Também foi realizado o banho de óleo para formar uma camada protetora.

### 3.8. ENSAIO DE RUPTURA DE COMPRESSÃO

Para poder comparar a resistência mecânica das amostras entre si, e também comparar a resistência mecânica das amostras sinterizadas com amostra da engrenagem usinada, foi estabelecido um ensaio de ruptura de compressão. Os ensaios foram realizados em um dinamômetro pneumático com capacidade de aplicação de carga de 20000 kg. Para realizar os ensaios foi feito um dispositivo para apoiar a engrenagem, com o intuito de que todas engrenagens fossem comprimidas na mesma posição pelo dinamômetro. A Figura 4 representa a posição e como o ensaio de ruptura de compressão foi feito, mostrando que a aplicação de

carga é na vertical entre a peça e o apoio. O apoio possui a distância de 13,60 mm as laterais do vão onde os dentes da engrenagem ficam apoiados.

Figura 4 – Desenho esquemático da engrenagem sobre o apoio e o sentido de aplicação de carga pelo dinamômetro.



Os testes foram feitos para todos os tipos de amostras de engrenagens que não reprovaram na inspeção visual, ou seja, as que não sofreram saturação na infiltração de cobre foram testadas, e também em engrenagens usinadas. Nos ensaios de compressão são aplicadas cargas aumentando-as continuamente até o ponto de ruptura da peça. Para avaliar os resultados, somente foram considerados os melhores casos (maiores valores de tensão de ruptura) para cada liga. Foram testadas pelo menos dez engrenagens para cada condição estudada.

### 3.9. ANÁLISE DE DENSIDADE, DUREZA, MICROESTRUTURAS E POROSIDADE.

Para fins de comparação, foram medidas as densidades, durezas e porosidades das peças. A análise das microestruturas foi feita para comparar o nível de porosidade entre os tipos de ligas e os métodos sinterização, assim como as microestruturas resultantes. Tanto para a liga Astaloy 85 Mo quanto Distaloy AB foram feitas as análises dos seguintes tipos de amostras:

- 01 amostra compactada verde;
- 01 amostra sinterizada normalmente (sem infiltração de cobre);
- 01 amostra com a maior porcentagem de cobre infiltrado sem saturação, sendo elas Astaloy 85 Mo + 7,5% Cu e Distaloy AB + 20% Cu.

Com auxílio do programa ImageJ, programa de computador destinado a processamento de imagens, foi possível calcular a porcentagem de porosidade das peças.

Utilizando uma balança de precisão para aferir a massa das engrenagens tanto no ar quanto na água, foi possível calcular pelo método de Arquimedes as densidades das engrenagens.

A dureza Vickers das peças foi medida com auxílio de um microdurômetro Insize, aplicando uma carga de 200 g durante o tempo de 10 s. Foram feitas pelo menos quatro medições de dureza em cada amostra estudada.

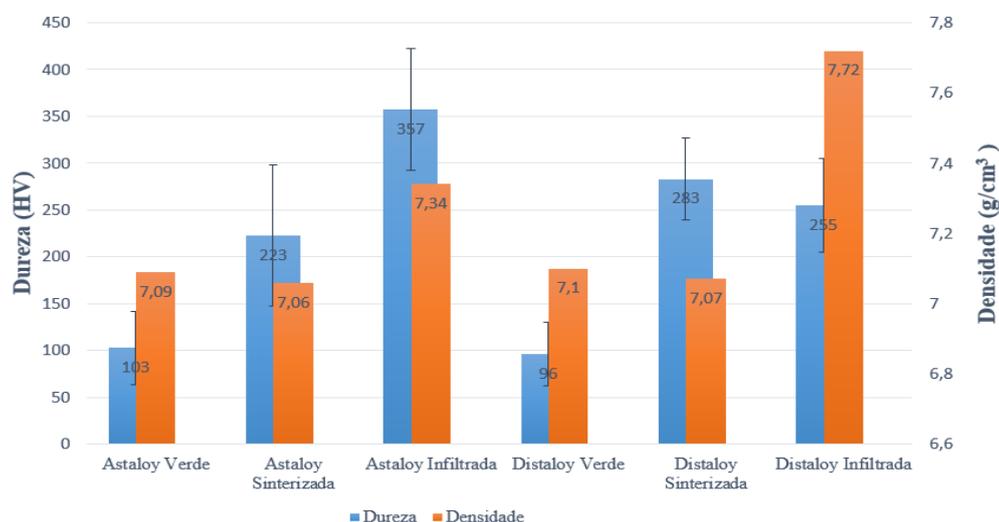
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 está representado o gráfico em conjunto dos resultados obtidos no ensaio de dureza (HV) e na medição de densidade ( $\text{g/cm}^3$ ) pelo método de Arquimedes. No gráfico também consta a análise de incertezas atribuída à medição de dureza, com 95,45% de confiabilidade.

Como pode-se notar, os valores de densidade são decrescentes da peça verde para sinterizada e isso acontece pela queima que ocorre na etapa inicial de sinterização do

lubrificante (kenolube) que foi adicionado na mistura para a diminuição dos atritos no momento da compactação.

Figura 5 – Resultados de dureza Vickers (HV) e Densidade ( $\text{g/cm}^3$ ).



Quando é feita a infiltração de cobre, as forças capilares que entram em ação carregando o cobre para dentro dos poros, fazem também com que os gases presos dentro dos poros sejam retirados para fora da peça, assim em vários lugares onde havia espaços agora há material. Dessa maneira é aumentada a densidade. Não só pelo fato do cobre entrar nos poros, também tem-se o fato de que o cobre é um material mais denso em relação ao material base (ferro), e por isso obteve-se a maior densidade a engrenagem de Distaloy AB infiltrada.

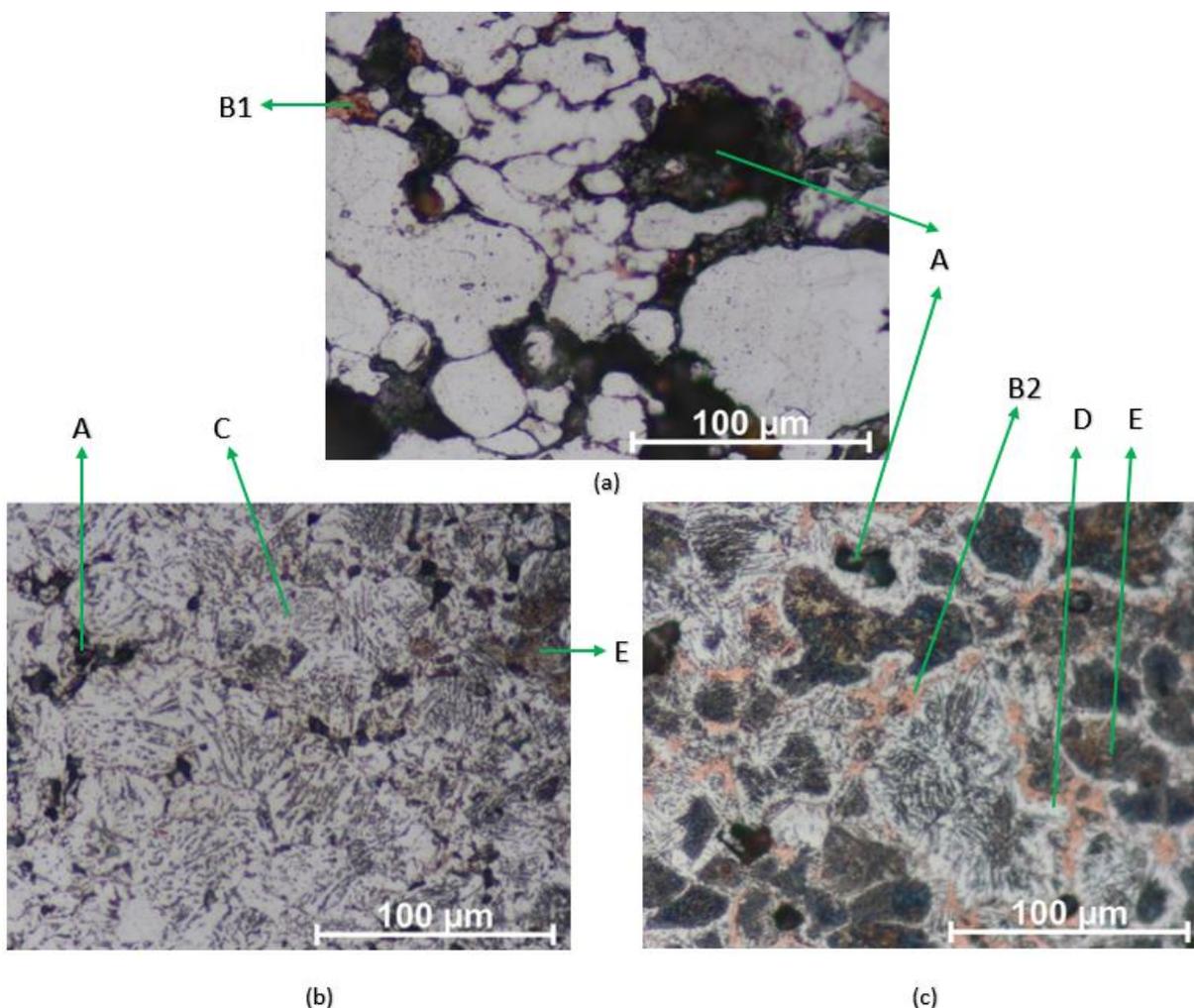
Quanto aos resultados de dureza, diferentes aspectos foram observados quando comparamos a Astaloy e a Distaloy. Os valores baixos referentes às peças verde são característicos de materiais porosos e ainda sem propriedades mecânicas. O aumento de dureza para as peças sinterizadas ocorre basicamente devido à ligação entre as partículas na sinterização, que faz com diminua o tamanho dos poros e os canais os interligam. Na Astaloy infiltrada, é observado um aumento considerável de dureza se comparada à peça somente sinterizada. A quantidade de cobre infiltrado foi suficiente para umedecer e dissolver o ferro presente nos poros e melhorar ainda mais a ligação entre as partículas. O mesmo ocorre na peça produzida com a liga Distaloy, porém no caso de sua infiltração, mesmo com o aumento de densidade e diminuição de porosidades, a quantidade de cobre presente faz com que a baixa dureza ele tenha efeito decisivo sobre a dureza total da peça, ou seja, tenha diminuído o valor médio de dureza em relação à liga sinterizada, sem infiltração.

A Figura 6(a), Figura 6(b) e Figura 6(c) mostram as imagens de micrografias para a comparação das porosidades e do efeito do cobre sobre elas, assim como a visualização das microestruturas formadas. São imagens das peças produzidas em Astaloy 85 Mo em estado verde, sinterizada e sinterizada com 7,5% de cobre infiltrado.

Na peça compactada verde foi encontrado 35% de porosidade, podendo-se notar as partículas de cobre presentes da mistura da liga. Na peça sinterizada foi encontrado 16% de porosidade, onde não é possível notar a presença de cobre pois o mesmo após ter fundido se espalhou por entre os poros. Já na peça com infiltração de cobre foi encontrado 10% de porosidade, podendo-se notar a presença de cobre espalhado onde haviam os canais porosos.

Na Figura 7(a), Figura 7(b) e Figura 7(c) podem ser vistas as imagens de micrografias das peças produzidas em Distaloy AB em estado verde, sinterizada e sinterizada com 20% de cobre infiltrado.

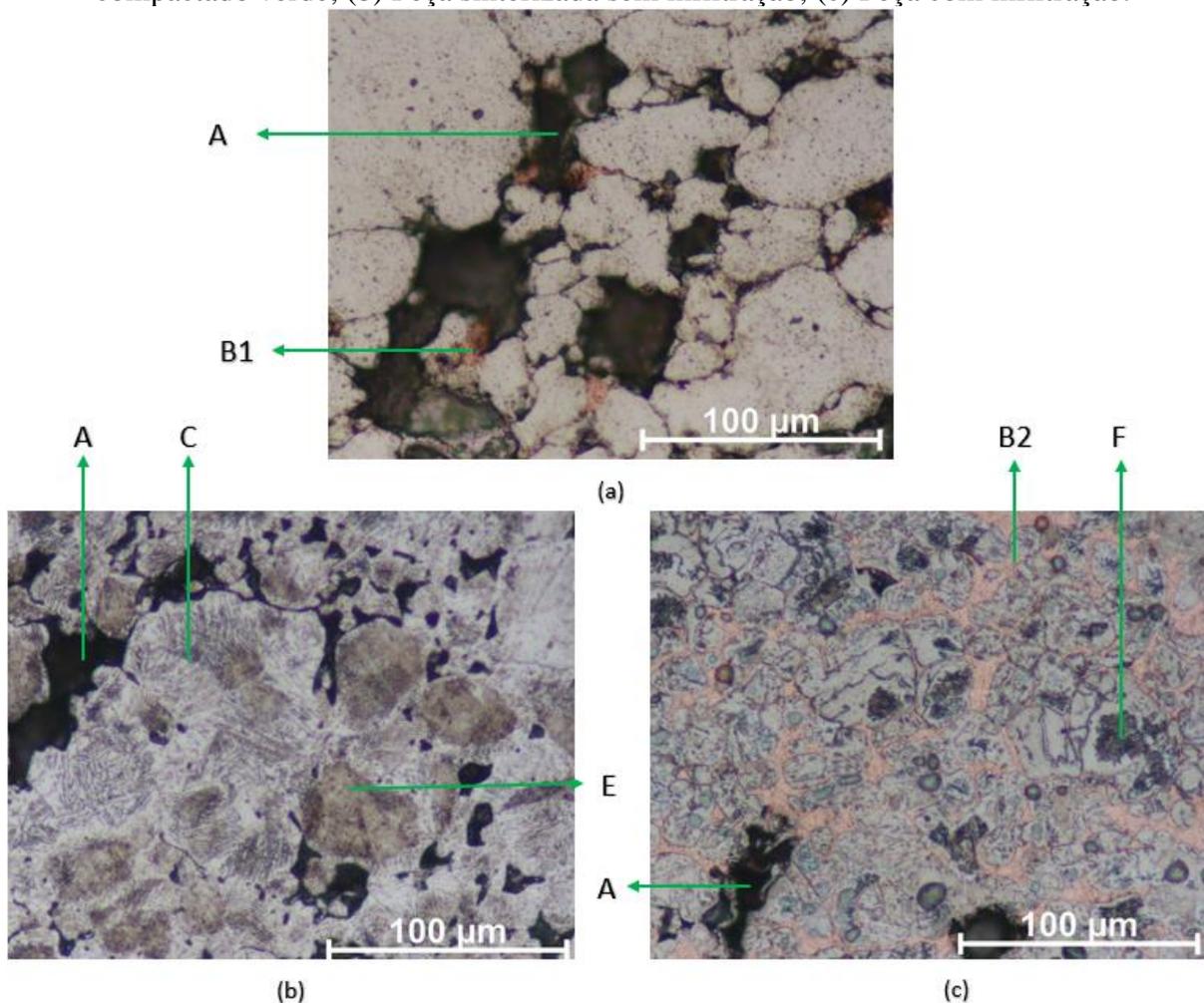
Figura 6 – Micrografias de engrenagens produzidas com Astaloy 85 Mo: (a) peça em estado compactado verde; (b) Peça sinterizada sem infiltração; (c) Peça com infiltração.



A=poros; B1=partículas de cobre presentes nos pós da liga (amostra sem sinterização); B2=cobre (infiltrado na sinterização); C=bainita; D=ferrita; E=perlita/bainita.

Na peça compactada verde utilizando a Distaloy AB foi encontrado 32% de porosidade. Na peça sinterizada dessa liga, na Figura 7(b), foi observado 21% de porosidade, podendo-se notar também a diferença do tamanho dos poros, que são maiores com o uso da Distaloy AB, em relação à Figura 6(b), onde foi empregada a liga Astaloy 85 Mo. A peça Distaloy AB com 20% de cobre infiltrado apresentou 9% de porosidade, podendo ser observado a maior quantidade de cobre da Figura 7(c) em relação a Figura 6(c), e dessa maneira contribuindo para os valores de densidade maior para essa liga. No entanto, mesmo com maior densidade na condição infiltrada, o valor médio de dureza para a Distaloy AB ficou cerca de 100 HV abaixo do valor médio da Astaloy AB, o que é uma consequência da maior quantidade de cobre infiltrada na liga Distaloy comparada à na Astaloy (20% e 7,5%, respectivamente), já que o cobre é um metal que apresenta baixa dureza, além das modificações que o cobre provoca nas microestruturas, como pode ser visto comparando-se as Figuras 6(c) e 7(c).

Figura 7 – Micrografias de engrenagens produzidas com Distaloy AB: (a) Peça em estado compactado verde; (b) Peça sinterizada sem infiltração; (c) Peça com infiltração.



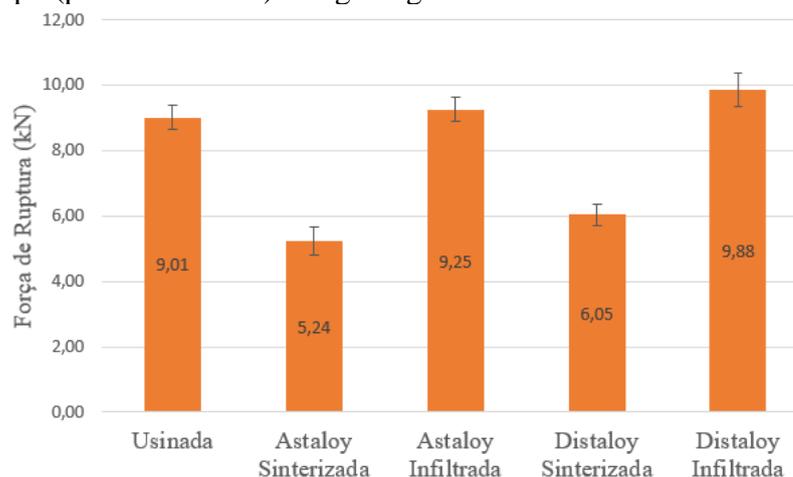
A=poros; B1=partículas de cobre presentes nos pós da liga (amostra sem sinterização); B2=cobre (infiltrado na sinterização); C=bainita; D=ferrita; E=martensita; F=perlita/bainita.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico onde constam os resultados dos ensaios de ruptura de compressão realizados utilizando as engrenagens produzidas nas diferentes condições de estudo e, para comparação, em engrenagens usinadas, que é o atual método de fabricação. Nela estão representadas a força de ruptura média em kN, com 95,45 de confiabilidade, da peça usinada, das peças sinterizadas e das peças com infiltração de cobre.

Notavelmente, os valores de força de ruptura das engrenagens somente sinterizadas não chegaram no patamar da engrenagem usinada, porém quando produzidas por infiltração de cobre, superaram esses valores. O maior valor de ruptura foi apresentado pela peça Distaloy AB + 20% Cu, seguido Astaloy 85 Mo + 7,5% Cu.

Comparando os resultados da Figura 6 e da Figura 7 com os resultados dos ensaios de ruptura de compressão, na Figura 8, pode-se perceber que a porosidade tem influência significativa nas propriedades mecânicas das engrenagens produzidas por metalurgia do pó. Além disso, é possível notar que a liga Distaloy AB tem maior capacidade de infiltração do cobre. As peças que foram somente sinterizadas (0% de infiltração de cobre), tanto Astaloy 85 Mo quanto Distaloy AB não atingiram resultados semelhantes aos da peça usinada, o que provavelmente está relacionado à porosidade presente nelas.

Figura 8 – Resultados dos ensaios de ruptura de compressão para as engrenagens produzidas por metalurgia do pó (presente estudo) e engrenagens usinadas.



A peça de liga Astaloy 85 Mo com 7,5% de cobre infiltrado apresentou um aumento de 76,6% na carga de ruptura de compressão se comparado com a peça somente sinterizada da mesma liga, enquanto a peça da liga Distaloy AB com 20% de cobre infiltrado apresentou 63,5% de aumento. Dessa maneira, a melhor escolha para substituição da engrenagem usinada para produzida por metalurgia do pó seria a Astaloy 85 Mo, pois com ela obteve-se resultados comparáveis aos da engrenagem usinada, com menor adição de cobre em relação à Distaloy AB + 20% Cu, fator altamente relevante no custo total da peça e, além disso, a matéria-prima (pós) da Astaloy 85 Mo também possui um custo mais baixo do que a pré-liga de Distaloy AB.

## 5. CONCLUSÃO

Ao final do presente trabalho, nas condições aqui empregadas, foi possível concluir que a produção por metalurgia do pó de engrenagens com altas solicitações mecânicas é possível. As engrenagens produzidas por sinterização em fase líquida com a técnica de infiltração de cobre apresentaram resultados satisfatórios, tendo aumento de até 76,6% no ensaio de ruptura de compressão quando comparada à peça da mesma liga em sua sinterização normal.

Tanto a liga Distaloy AB quanto a liga Astaloy 85 Mo foram satisfatórias quanto à sua utilização para produção das engrenagens, porém a absorção de cobre (sua quantidade) é um fator determinante quando se trata em custos de produção, assim sendo a liga Astaloy 85 Mo foi considerada a melhor escolha para a substituição do processo de fabricação da engrenagem, pois o custo dessa pré-liga também é menor do que o da Distaloy AB.

A técnica de infiltração de cobre mostrou-se eficiente para diminuição de porosidades, o que é um fator determinante para a obtenção de melhores resultados de propriedades mecânicas e que quando diminuídas, aumentam a ruptura de compressão e também a densidade da peça.

Indica-se como possíveis continuações para este trabalho, realizar o ensaio de desgaste e ensaio de fadiga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bonaldi, Patrick O, Schaeffer Lírio. **Estudo da Influência da Forma da Partícula na Sinterização com Fase Líquida Sobre as Propriedades Mecânicas e a Resistência a Corrosão de Aço Inoxidável AISI 316L Infiltrado**. Laboratório de Transformação Mecânica – LdTM – Centro de Tecnologia - UFRGS.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó Técnica e Produtos**, 3º Ed, São Paulo 1992, 358p

Da Silva, Vanderson F. **Metalurgia do pó: A importância desse processo e sua atuação no mercado Brasileiro**, Santo André, 2018.

Dincer, Mehmet. **Sinter Hardening Studied of Astaloy 85 Mo Powder with Varying Copper Contents**, 2014.

**Engrenagem Planetária**. < <http://www.pozelli.ind.br/engrenagem-planetaria>> acesso em 27/11/2019

Höganäs AB. **Höganäs Iron and Steel Powders for Sintered Components**. Höganäs, 1998.

Lervolino, Fernando. **Engrenagens Sinterizadas para caixas de transmissão Automotiva**. <<https://www.aquecimentoindustrial.com.br/engrenagens-sinterizadas-para-caixas-de-transmissao-automotiva/>> acesso em 26/11/2019

Lindskog, Per. **The history of Distaloy, Powder Metallurgy**, 56:5, 351-361, DOI: 10.1179/1743290113Y.0000000077, 2013.

Machado Rodríguez Á. S, et al. **O uso da metalurgia do pó no desenho e fabricação de engrenagens**. Guayaquil 2015.

MORO, Norberto; PAEGLE, André Auras. **Processos de fabricação: metalurgia do pó e o futuro da indústria**. Florianópolis, 2007.

NARASIMHAN, Kalathur S, SEMEL, Frederick J. **SINTERING OF POWDER PREMIXES – A BRIEF OVERVIEW**. Hoeganaes Corporation 1001 Taylors lane Cinnaminson, NJ 08077 (2007)

PEASE, Leander F, III, WEST Willian G. **Fundamentals of Powder Metallurgy**, Metal Powder Industry Federation, 2002, 452p.

SANTOS, Maurício. **Desenvolvimento de uma engrenagem cônica sinterizada: Substituição de tecnologia**. Porto Alegre, 2017.

Singh, Rajander. **Introduction to Basic Manufacturing and Workshop Tecnology**, New Age International Publishers, New Dehli, 2006, 506p.