

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Departamento de Metalurgia

ANÁLISE DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DO AÇO ABNT 1045  
SINTERIZADO

**Lucas Karpinski Falcone**

Trabalho de Diplomação

Orientador: Professor Dr. – Ing. Lirio Schaeffer

Porto Alegre  
2021

CIP - Catalogação na Publicação

Falcone, Lucas Karpinski  
ANÁLISE DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DO AÇO ABNT  
1045 SINTERIZADO / Lucas Karpinski Falcone. -- 2021.  
41 f.  
Orientador: Lirio Schaeffer.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Metalúrgica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2021.

1. Forjamento. 2. Metalurgia do pó. 3.  
Sinterforjamento. I. Schaeffer, Lirio, orient. II.  
Titulo.

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

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais e a minha irmã, pelo apoio constante e parceria em todas as situações.

A Deus.

Ao professor Dr. Ing. Lúrio Schaeffer pela orientação, atenção e pela oportunidade de constante aprendizado.

Ao Dr. Diego Wermuth pelo constante acompanhamento e ajuda durante a toda execução deste trabalho.

Ao Mestre André Rosiak por ajudar nos ensaios e pelo auxílio técnico durante este trabalho.

Aos professores deste curso que nos auxiliam de todas as formas durante toda esta etapa.

## SUMÁRIO

|  |    |
|--|----|
| AGRADECIMENTOS .....                                 | 3  |
| LISTA DE FIGURAS .....                               | 6  |
| LISTA DE TABELAS .....                               | 8  |
| LISTA DE SÍMBOLOS .....                              | 9  |
| LISTA DE ABREVIACÕES .....                           | 10 |
| RESUMO .....   | 11 |
| ABSTRACT .....                                       | 12 |
| 1 INTRODUÇÃO.....                                    | 13 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....                        | 14 |
| 2.1 FORJAMENTO .....                                 | 14 |
| 2.2 METALURGIA DO PÓ .....                           | 19 |
| 2.3 SINTERFORJAMENTO .....                           | 22 |
| 2.4 AÇO ABNT 1045 .....                              | 23 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS.....                           | 24 |
| 3.1 PROJETO .....                                    | 25 |
| 3.2 MISTURA DOS PÓS .....                            | 26 |
| 3.3 COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ .....                    | 28 |
| 3.4 SINTERIZAÇÃO .....                               | 28 |
| 3.5 FORJAMENTO .....                                 | 30 |
| 3.6 ENSAIOS.....                                     | 31 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....                       | 33 |
| 4.1 DENSIDADE A VERDE E SINTERIZADA DA GERATRIZ..... | 33 |
| 4.3 DENSIDADE DA PEÇA FORJADA.....                   | 34 |
| 4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO.....                        | 35 |
| 5 CONCLUSÃO.....                                     | 37 |

|   |                                       |    |
|---|---------------------------------------|----|
| 6 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 38 |
| 7 | REFERÊNCIAS .....                     | 39 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Sequência de forjamento. Fonte: (MACHADO, 2009).....  | 14 |
| Figura 2 - Forjamento de anel em matriz aberta. Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)   | 15 |
| Figura 3 - Etapas de um processo de forjamento em matriz fechada de bielas automotivas. Fonte: (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988)..... | 16 |
| Figura 4 - Forjamento de peça em matriz fechada. Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005).....   | 17 |
| Figura 5 - Peças forjadas a frio, indústria automobilística. Fonte: (SCHAEFFER, 2004).....   | 17 |
| Figura 6 - Atomização do pó metálico sendo vazado por orifício. Fonte: (CHANG; ZHAO, 2013).....                                    | 20 |
| Figura 7 - Atomização do pó metálico sendo vazado sobre disco rotativo. Fonte: (CHANG; ZHAO, 2013).....                            | 20 |
| Figura 8 - Moinhos utilizados para obtenção dos pós-metálicos. Fonte: (HAUSNER; ROLL; JOHNSON, 1968).....                          | 21 |
| Figura 9 - Rota esquemática do processo de sinterforjamento. Fonte: (CHAWLA, 2002).....  | 22 |
| Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho realizado.....   | 24 |
| Figura 11 - Matriz de forjamento utilizada no trabalho.....  | 25 |
| Figura 12 - Molde de compactação da geratriz.....  | 26 |
| Figura 13 - Mistura dos pós-metálicos.....   | 26 |
| Figura 14 - Misturador de pós.....   | 27 |
| Figura 15 - Prensa hidráulica de compactação.....  | 28 |
| Figura 16 - Forno de sinterização SANCHIS.....   | 29 |
| Figura 17 - Gráfico da temperatura de sinterização.....  | 29 |
| Figura 18 - Prensa hidráulica FKL.....   | 30 |
| Figura 19 – Posicionamento da geratriz na matriz para a etapa de forjamento.....   | 31 |
| Figura 20 – Máquina de ensaios EMIC.....   | 31 |
| Figura 21 - Geratriz compactada.....   | 33 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 22 – Peças sinterforjadas de aço ABNT 1045.....        | 34 |
| Figura 23 – Ensaio de compressão da geratriz sinterizada..... | 35 |
| Figura 24 – Ensaio de compressão da peça sinterforjada.....   | 36 |

## **LISTA DE TABELAS**

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - composição química do aço ABNT 1045. Fonte: (ABNT)..... | 23 |
| Tabela 2 - Composição química utilizada na mistura dos pós .....   | 24 |
| Tabela 3 - Distribuição das amostras dos pós-metálicos.....        | 27 |
| Tabela 4 – Densidades das geratrizes .....                         | 33 |
| Tabela 5 - Densidade das amostras sinterforjadas.....              | 34 |



## LISTA DE SÍMBOLOS

|                |                       |                      |
|----------------|-----------------------|----------------------|
| F              | Força                 | [N]                  |
| h              | Altura                | [m]                  |
| $\rho$         | Densidade             | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| T              | Temperatura           | [°C]                 |
| $\sigma$       | Tensão                | [N/m <sup>2</sup> ]  |
| $\varepsilon$  | Deformação            | % percentual         |
| R <sub>m</sub> | Limite de Resistência | [N/mm <sup>2</sup> ] |

## **LISTA DE ABREVIACOES**

|      |  |
|------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASM  | American Society for Metals              |
| CP   | Corpo de Prova                           |
| LdTM | Laboratório de Transformação Mecânica    |
| M/P  | Metalurgia do p                         |
| NBR  | Norma Brasileira                         |
| RPM  | Rotações por minuto                      |

## RESUMO

Com a intenção de reforçar a importância da otimização e conciliação de diferentes rotas de processamento metalúrgico, o presente trabalho visa demonstrar uma possível rota de sinterforjamento a quente do aço ABNT 1045. Foi produzido um *billet* sinterizado utilizado como geratriz para o forjamento de uma peça em formato do anel maior de uma biela utilizada em motosserra. Os pós utilizados para balancear a mistura do aço ABNT 1045 foram disponibilizados pelo Laboratório de Transformação Mecânica, tendo como base o pó de ferro ASC 100,29 da empresa HOGANAS. Foram compactadas amostras com pressão de 500MPa e com 600MPa e sinterizadas a 1150°C em atmosfera controlada (25% Hidrogênio e 75% Nitrogênio). As amostras sinterizadas foram aquecidas a 1200°C por 30 min e foram submetidas a etapa de forjamento. As peças sinterforjadas foram submetidas aos ensaios de densidade e de compressão para um comparativo com as geratrizes sinterizadas. Neste trabalho obteve-se o limite de escoamento médio de 352MPa e a densidade das peças sinterforjadas de 7,33g/cm<sup>3</sup> para a peça compactada a 500MPa e de 7,44g/cm<sup>3</sup> para a peça compactada a 600MPa.

## ABSTRACT

In order to reinforce the importance of optimizing and reconciling different metallurgical processing routes, the present work aims to demonstrate a possible hot sinterforging route for ABNT 1045 steel. A sintered billet was produced and used as a generator for forging a piece in shape of the larger ring of a connecting rod used in a chainsaw. The powders used to balance the ABNT 1045 steel mixture were provided by the Laboratório de Transformação Mecânica, the base of the mixture was the iron powder ASC 100.29 from the company HÖGANÄS. The mixture was compacted with a pressure of 500MPa and 600MPa and sintered at 1150°C in a controlled atmosphere (25% Hydrogen and 75% Nitrogen). The sintered samples were heated at 1200°C for 30 min and submitted to a forging step. The sinterforged parts were submitted to density and compression tests for a comparison with the sintered billets. In this work we obtained the mean yield limit of 352MPa and the density of the sinterforged ring was 7,33g/cm<sup>3</sup> when compressed with 500Mpa and 7,44g/cm<sup>3</sup> for 600MPa.

## **1 INTRODUÇÃO**

O progresso contínuo e o avanço das tecnologias inferem uma variável de extrema relevância para o sucesso e sobrevivência da indústria. Como possibilidade da rota de manufatura por forjamento de peças produzidas pelo processo de metalurgia do pó, consiste no forjamento de pré-formas sinterizadas, conhecido como sinterforjamento. Através dessa rota é possível a produção de componentes com benefícios de ambas as técnicas.

Técnica de conformação antiga, sendo provavelmente uma das primeiras técnicas de conformação mecânica utilizadas na história da metalurgia, o forjamento tem a sua origem na fabricação de instrumentos por povos antigos. Com os avanços tecnológicos dos últimos séculos e a afirmação dos materiais metálicos como grandes motores da evolução humana, os processos de forjamento têm posto de destaque na indústria metal mecânica.

Os motivos relevantes de precisão dimensional e acabamento superficial das peças produzidas por metalurgia do pó, que com os avanços recentes da técnica não apresentam problemas notórios de falhas de desempenho e propriedades mecânicas, incentivam na conciliação de ambos os processos formando a rota metalúrgica para a produção de produtos sinterforjados.

Tendo, as ferramentas de forjamento, uma vasta aplicação, desde alfinetes até motores para aeronaves e destaque na indústria automobilística. Os projetistas têm dado notável relevância a adotarem a rota da metalurgia do pó no processamento de materiais historicamente fabricados por fundição, estampagem ou usinagem. Empresas como Porsche e Toyota já fizeram uso de componentes sinterforjados em seus produtos, especialmente na produção de engrenagens e bielas.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados alguns trabalhos científicos que serviram como referencial para a realização deste trabalho.

### 2.1 FORJAMENTO

Forjamento é o processo de deformação controlada de um metal em formatos específicos, empregando o uso de forças compressivas, Figura 1, aplicadas através do conjunto de matrizes e ferramental como martelos de queda livre, que geralmente aplicam grandes forças a grandes velocidades de impacto ou por prensas, que deformam a peça em altas pressões com aumento gradual e controlado. É, provavelmente, o mais antigo método de conformação aplicado a metais conhecido em nossa história, datando à idades a.C. (CETLIN E HELMAN, 2005)

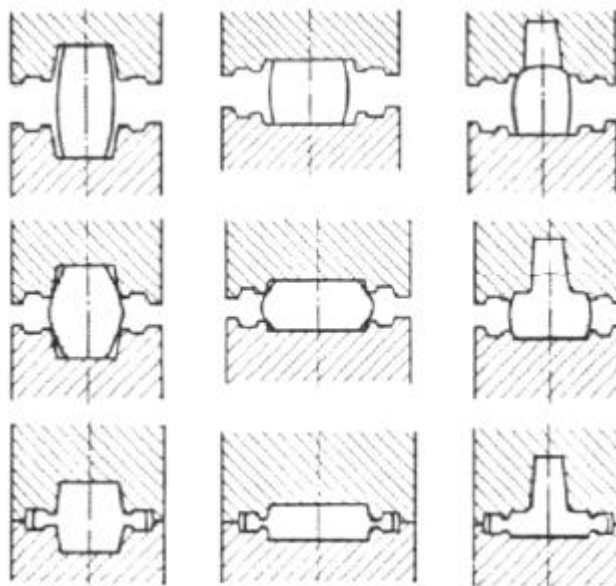


Figura 1 - Sequência de forjamento. Fonte: (MACHADO, 2009)

Com os avanços e desenvolvimentos dos maquinários durante a revolução industrial a mão do homem e o martelo foram substituídos por ferramentais que permitem ampla utilização do método nos mais diversos setores industriais sejam nos processos de forjamento em matriz aberta, com uso recorrente para peças grandes e de baixa complexidade geométrica e de forjamento em matriz fechada, peças complexas e permite grande volume de produção, podem ser usados tanto para metais ferrosos como para não ferrosos (DIETER, 1981).

Pode-se diferenciar os processos de forjamento em basicamente dois grupos sendo eles o forjamento em matriz aberta e o forjamento em matriz fechada. O método de forjamento em matriz aberta é mais utilizado para peças de geometria simples e de grande tamanho, exemplos clássicos deste método são eixos e virabrequins de grandes máquinas como navios, estiramento de barras e fabricação de anéis, Figura 2. Nestes casos a peça que será forjada é aquecida e colocada entre as matrizes da prensa onde ocorre, no exemplo de eixos de navios, a diminuição da seção transversal e conseqüentemente o alongamento da seção longitudinal, a peça é então rotacionada e a operação é repetida tantas vezes for necessário até que se obtenha um produto final do tamanho desejado enquanto na fabricação de anéis a peça é colocada em um mandril e uma prensa comprime a parte superior do anel, diminuindo sua espessura e aumentando o diâmetro do anel por conseqüência, essa operação é repetida até que se obtenha os parâmetros estipulados em projeto (CETLIN e HELMAN, 2005).

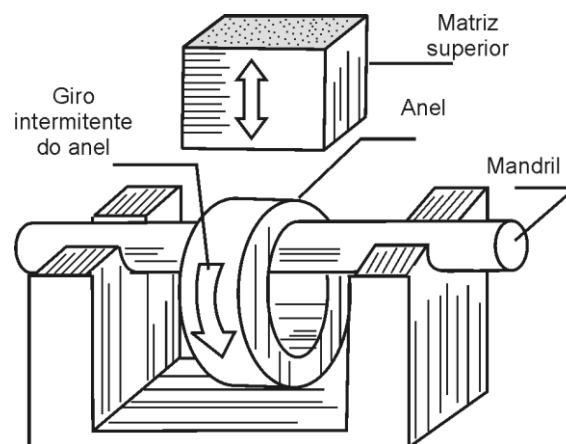


Figura 2 - Forjamento de anel em matriz aberta. Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

No forjamento em matriz fechada, geralmente, uma geratriz cilíndrica ou quadrangular é deformada entre duas matrizes usinadas com as cavidades de acordo com o formato da peça que se deseja obter, geralmente são usinadas mais de uma cavidade nas matrizes até se obter o formato final desejado e a geratriz é forjada sucessivamente até obter a forma final em mais de uma etapa, conforme Figura 3. Este método possibilita a fabricação de peças de geometria complexa e grandes reduções de seção quando feito a quente, usualmente a usinagem das peças acabadas é mínima, o que viabiliza o uso do método em grandes quantidades, amortizando então, os altos investimentos necessários nas matrizes de forjamento (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988).

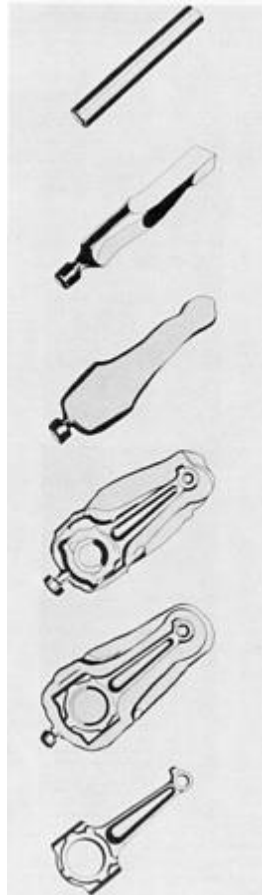


Figura 3 - Etapas de um processo de forjamento em matriz fechada de bielas automotivas. Fonte: (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988)

Na maioria dos processos de forjamento em matriz fechada é feito o aquecimento da geratriz na etapa inicial, com isso menor energia é requerida para a conformação da peça, o material ganha capacidade de escoamento sem a aparição de trincas (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988). Além disto, auxilia na homogeneização da microestrutura e na eliminação de bolhas de gás e porosidades no material. Com a intenção de se obter grandes volumes de produção com elevada resistência e replicabilidade, o processo de forjamento em matriz fechada é uma solução amplamente utilizada, Figura 4 (SCHAEFFER, 2016).



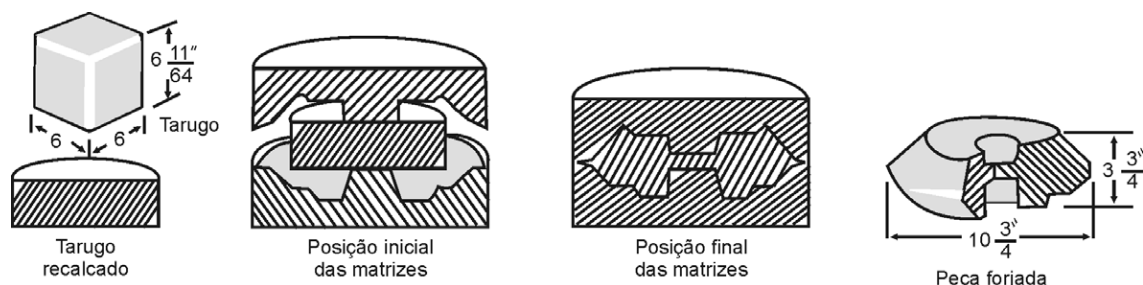


Figura 4 - Forjamento de peça em matriz fechada. Fonte: (CETLIN e HELMAN, 2005)

As temperaturas de trabalho dependerão do material, da complexidade geométrica desejada e da velocidade de conformação. As faixas mínimas e máximas se encontram onde a relação de eliminação do encruamento devido à taxa de recristalização seja atendida e, no caso da faixa máxima, onde a temperatura de trabalho seja próxima a temperatura de fusão do material, atentando aos efeitos de oxidação. Geralmente usa-se uma temperatura cerca de 38°C abaixo da temperatura de fusão (DIETER, 1981).

Dentre as técnicas de forjamento utilizadas, é possível a realização do trabalho a frio. Neste caso, enquanto o material é conformado, não ocorrem os fenômenos de recuperação e recristalização do material visto que o processo é realizado abaixo da temperatura de recristalização. É muito utilizado para peças de geometria simples, obtendo peças com excelente acabamento superficial e próximas ao estado de uso final. Técnica muito utilizada na indústria automobilística, a Figura 5 mostra alguns exemplos de peças forjadas a frio muito comuns nessa indústria (DIETER, 1981).

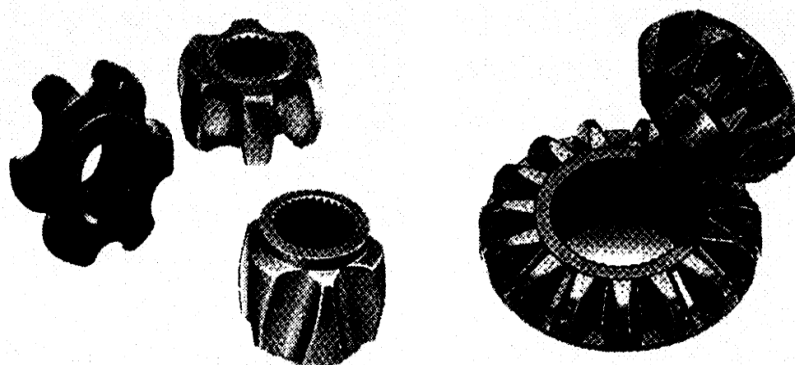


Figura 5 - Peças forjadas a frio, indústria automobilística. Fonte: (SCHAEFFER, 2004)

No forjamento a morno obtém-se benefícios tanto do forjamento a frio quanto do forjamento a quente. Podendo ser aplicado a peças mais complexas do que no processo de forjamento a frio e ainda assim resultando em elevadas propriedades mecânicas. Podendo ser mais vantajoso financeiramente se comparado ao trabalho a quente. Nesta técnica, a faixa de temperatura a ser trabalhada é variável de acordo com o material a ser trabalhado, sendo necessário o devido estudo e análise do projeto em questão (SCHAEFFER, 2004)

O forjamento a quente é a técnica mais utilizada, neste caso em função das elevadas faixas de temperatura em que a peça é submetida o processo ocorre acima da temperatura de recristalização do material, então a energia necessária para que ocorra a conformação do material é menor, o que possibilita maior escoamento de material sem surgimento de trincas. Defeitos como porosidades e trincas são evitados pelo aquecimento, os grãos são refinados e o material sofre um alívio em questão de segregação química em função das rápidas taxas de difusão em que está submetido nas temperaturas de trabalho (DIETER, 1981).

O processo de forjamento traz como efeito benéfico às peças a homogeneização da microestrutura, orientação das fibras favorável aos esforços mecânicos que muitas peças serão exigidas em uso como auxiliando na vida em fadiga, em propriedades sob tração, ao impacto e ductilidade, importante que as fibras estejam alinhadas no sentido a que a peça sofrerá os esforços. A microestrutura apresenta grãos finos e efeitos de porosidade e trincas podem ser reduzidos e eliminados durante o processo de forjamento (DIETER, 1981).

Peças forjadas tem destaque em questão das propriedades mecânicas quando comparadas à outras rotas metalúrgicas devido ao grau de encruamento que o material é trabalhado sendo controlado pelas variáveis do processo, temperatura, velocidade e deformação plástica (ASM HANDBOOK VOLUME 14, 1988).

Tensões residuais em peças forjadas são geralmente pequenas devido ao fato de a seção conformada ser, geralmente, uma seção de trabalho a quente. Peças forjadas de tamanho grande merecem atenção especial pois estão suscetíveis a formação de trincas ou empenamentos. Um resfriamento lento é a solução encontrada em muitos destes casos apresentando bons resultados (DIETER, 1981).

## 2.2 METALURGIA DO PÓ

O processo de metalurgia do pó (MP ou M/P) se dá pela conformação de uma mistura de pós-metálicos e não metálicos com o intuito de se obter um material com resistência mecânica conveniente. O início do método ocorre pela obtenção do pó que servirá de matéria-prima, com este material particulado são gerados os componentes a trabalhar na sequência do processo. A conformação deste pó na forma desejada é realizada através da aplicação de uma pressão mecânica com o uso de matrizes de compactação na forma geométrica que se deseja obter. Com este material compactado em estado ainda de “compactado verde” é realizado um tratamento térmico, neste passo o material adquire a resistência mecânica que é fundamental. É um método amplamente utilizado pois o produto gerado revela boas tolerâncias dimensionais e bom acabamento superficial (SYED, 2010).

A indústria utiliza amplamente este método de manufatura por apresentar vantagens em alguns casos no sentido de produzir peças que variam de geometrias simples a complexas, atendendo desde as pequenas exigências dimensionais de projeto, e por requerer pouco ou, em alguns casos, praticamente nenhum processo de acabamento no produto final.

Tendo em vista a fabricação de metálicos ferrosos ou não ferrosos através deste método, é usado em grande escala na indústria automotiva devido às boas características de volume de produção aliado com a complexidade geométrica que algumas destas peças possam vir a requerer, além do fato de minimizar os desperdícios durante o processo produtivo (EXNER, 1979).

Componentes obtidos por esse método apresentam níveis de porosidade que são impactados pelas etapas do processo como a pressão de compactação, tamanho das partículas do pó metálicos e tempo e temperatura que é realizada a sinterização (TRUDEL, 1998).

O processo de M/P é caracterizado basicamente em duas grandes etapas sendo a primeira a etapa de fabricação dos pós-metálicos e a segunda o processo produtivo de componentes com geometrias e resistências projetados. No projeto de fabricação de uma peça por M/P pode-se setorizar em 3 fases principais: Mistura, compactação e sinterização (PALLINI, 2006).

Entre os métodos de fabricação dos pós-metálicos o processo de atomização é descrito como obtenção do material metálico através de uma carga que é fundida e vazada de maneira que sofra rápido resfriamento, que pode ser realizado por jatos de ar, água ou por gás inerte. O fundido pode ser vazado por um orifício, conforme a Figura 6 ou sobre um disco rotativo que arremessa o material em uma forma de cascata, Figura 7.

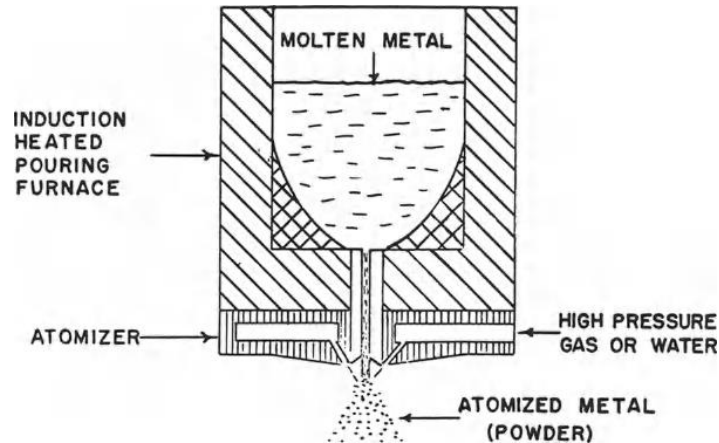


Figura 6 - Atomização do pó metálico sendo vazado por orifício. Fonte: (CHANG; ZHAO, 2013)

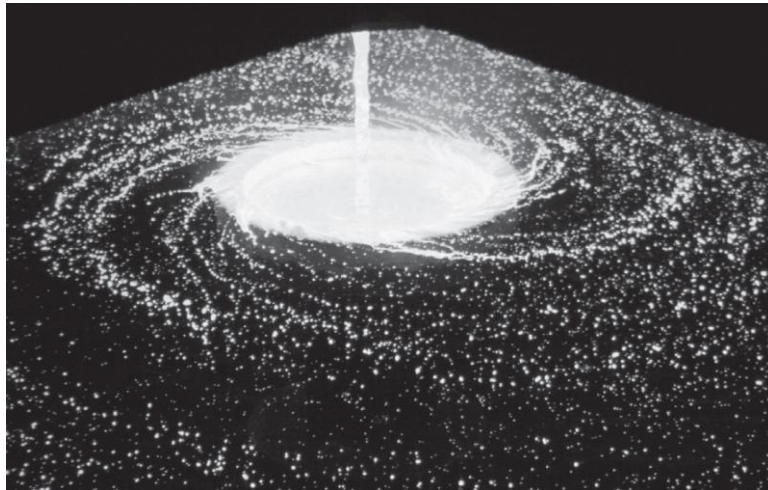


Figura 7 - Atomização do pó metálico sendo vazado sobre disco rotativo. Fonte: (CHANG; ZHAO, 2013)

Por moagem, usualmente, o pó metálico pode ser obtido através de moinhos de bolas, moinho de rolo ou moinho do tipo jet mill. Compreende em fracionar o material até um particulado de tamanho desejado através de métodos mecânicos de quebra por rolos ou martelos, Figura 8.

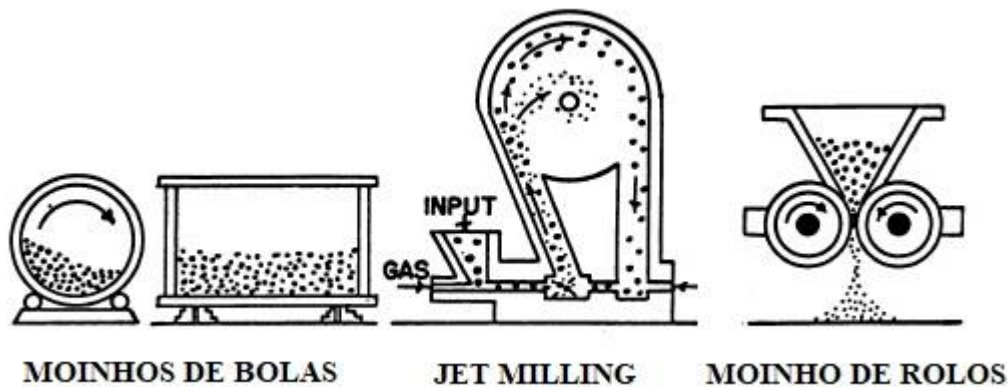


Figura 8 - Moinhos utilizados para obtenção dos pós-metálicos. Fonte: (HAUSNER; ROLL; JOHNSON, 1968)

Processos de redução química e eletrólise, no primeiro o pó é obtido através do processo de redução do metal por agentes redutores gasosos ou sólidos, usualmente carbono e hidrogênio são usados como agentes redutores, sendo o método com carbono um dos mais antigos que seguem em uso. No segundo processo, por eletrólise, o pó é depositado no cátodo da reação eletroquímica no formato de frágeis lâminas ou até mesmo na forma de pó. Pós provenientes de eletrolise são conhecidos por apresentarem alta pureza e boa compressibilidade, que é importante na produção de peças de alta densidade (CHANG; ZHAO, 2013).

As propriedades finais das peças produzidas por este processo sofrem influência direta da relação entre as partículas dos pós utilizados durante todas as etapas da rota de fabricação, desde a mistura dos pós, passando pela conformação e compactação da peça até a sinterização final (CHIAVERINI, 2001).

Tamanho das partículas é um fator importante de ser controlado pois é de extrema dificuldade obter um material com partículas de tamanho estatisticamente uniforme, peneiras são utilizadas para controlar esse aspecto. Se o pó apresentar poucas partículas pode acarretar em problemas de compressibilidade, sendo então favorável um pó com muitas partículas pequenas, bem como a superfície específica pois acarreta diretamente na área de contato entre as partículas, importante durante a sinterização (CHIAVERINI, 2001).

Nas etapas de compactação e sinterização a composição química deve ser bem controlada e conhecida afim de garantir a qualidade do processo, outro fator importante é a compressibilidade da mistura de pós que deve atender a demanda de conformação na pré-forma desejada (CHIAVERINI, 2001).

### 2.3 SINTERFORJAMENTO

Moderno processo que alia técnicas de forjamento com técnicas de metalurgia do pó, muitas indústrias têm demonstrado interesse devido ao fato de ser possível o seu uso para a produção de grandes volumes de peças de grande precisão a um custo final relativamente baixo se comparado com outros métodos (SCHAEFFER, 2016).

Consiste na produção de peças que serão forjadas por algum método tradicional, como em matriz fechada, a partir de formas pré-moldadas através da metalurgia do pó, no lugar de tarugos comumente utilizados no forjamento. Ao invés de formas de geometria básica é, então, utilizada uma geratriz sinterizada, com isso se ganha em questão de não precisar de usinagem, corte, uniformidade das geratrizes, maior controle do processo, possibilidade de produção de peças near net shape reduzindo custos e aumentando a produtividade do sistema como um todo (UPADHYAYA, 2002).

De forma geral, a rota utilizada para o sinterforjamento consiste na obtenção e mistura dos pós-metálicos, compactação dos pós metálicos na geometria da pré-forma, sinterização da pré-forma e, finalmente, no forjamento da peça sinterizada, conforme a Figura 9, (CHAWLA, 2002).

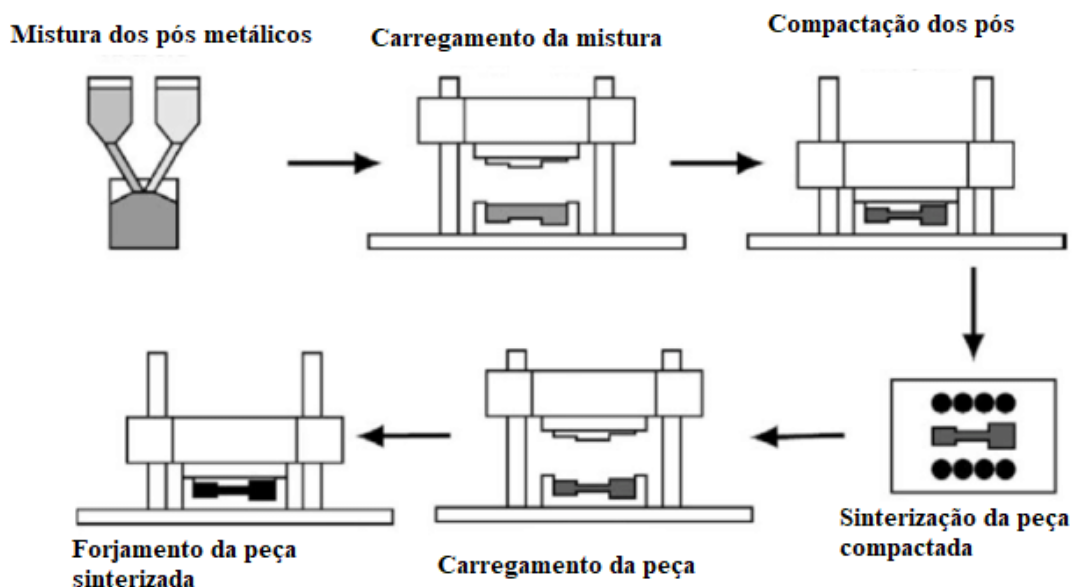


Figura 9 - Rota esquemática do processo de sinterforjamento. Fonte: (CHAWLA, 2002)

Dentre os inúmeros usos do método citado, vale destacar o seu uso no setor automotivo, principalmente quanto à fabricação de engrenagens e bielas como

alternativa aos processos, até então comuns, de manufatura como por fundição ou usinagem (SEETHARAMAN, 2005). A indústria adota desta rota de processamento metalúrgico com a justificativa da economia quanto a, principalmente, etapas de usinagem pós forjamento, preparo das geratrizes, produção em linha. Fatores estes que justificam o uso do processo para grandes volumes de produção em escala industrial sem perder a qualidade das propriedades mecânicas do material.

## 2.4 AÇO ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é amplamente utilizado na indústria mecânica como geral e em peças forjadas, sendo muito comum nas indústrias agrícola, rodoviária e energética. Muito utilizado na fabricação de eixos, anéis, cilindros, pinos, bielas e engrenagens. Classificado como um aço médio teor de Carbono apresenta boa resistência mecânica e resistência a fratura. Além das propriedades citadas apresenta boa tenacidade, usinabilidade e soldabilidade, o que justificam a ampla utilização do material (LUZ, 2017)

De acordo com a NBR 172/2000 é um aço para construção mecânica, ao carbono e especial com atenção às demandas nos ensaios de impacto no estado temperado e revenido. A composição química do aço ABNT 1045, pela norma NBR NM 87/2000 segue conforme a Tabela 1.

*Tabela 1 - composição química do aço ABNT 1045. Fonte: (ABNT)*

| <b>C</b>  | <b>Mn</b> | <b>Pmáx.</b> | <b>Smáx.</b> | <b>Si</b> |
|-----------|-----------|--------------|--------------|-----------|
| 0,43-0,50 | 0,60-0,90 | 0,040        | 0,050        | 0,10-0,60 |

Levando em consideração estas características dos processos apresentados, a indústria mecânica utiliza o aço ABNT 1045 aliado aos processos de sinterforjamento para a produção de bielas, o que incentiva pesquisas relacionando este material aos processos que serão apresentados neste trabalho.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

No presente trabalho é apresentado o sinterforjamento de um *billet* fabricado pela metalurgia do pó da liga ABNT 1045. A composição química utilizada na mistura dos pós está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição química utilizada na mistura dos pós.

| Mn    | Si   | Cr    | C     |
|-------|------|-------|-------|
| 0,65% | 0,2% | 0,35% | 0,45% |

O trabalho realizado segue a metodologia demonstrada no fluxograma da Figura 10.

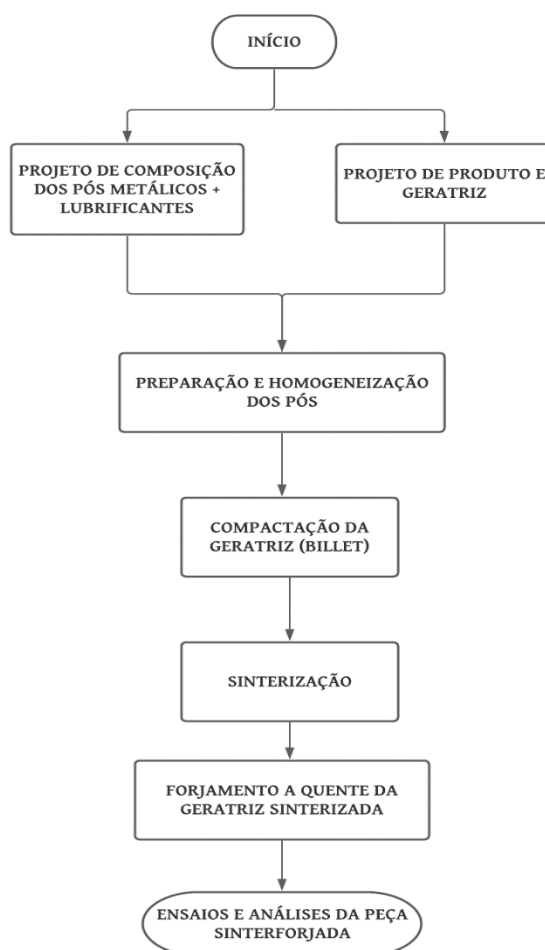


Figura 10 - Fluxograma das etapas do trabalho realizado.



### 3.1 PROJETO

Neste trabalho foi utilizado como base para o produto final, o segmento de uma biela com o uso de uma matriz de biela já existente no LdTM. A decisão de utilizar apenas um segmento da biela se deu por não se ter disponível um ferramental que possibilitasse a fabricação de uma geratriz sinterizada nas dimensões necessárias para forjar uma biela inteira. O corpo da biela, parte que não era de interesse no trabalho, foi fechado deixando apenas a seção do anel superior da matriz livre para o preenchimento durante a etapa de forjamento. A matriz utilizada está apresentada na Figura 11.



Figura 11 - Matriz de forjamento utilizada no trabalho.

As dimensões do *billet* a ser utilizado no processo seguem as dimensões da matriz na qual a mistura de pós será compactada, no formato de um cilindro de dimensões de 21mm de diâmetro e 48mm de altura. A matriz de compactação está apresentada na Figura 12, e possui uma cavidade cilíndrica vertical fabricado em aço ferramenta H13.



Figura 12 - Molde de compactação da geratriz.

### 3.2 MISTURA DOS PÓS

Os pós utilizados neste trabalho foram o pó de ferro ASC 100.29 da HÖGANÄS, complementando a liga do aço ABNT 1045 com pós dos elementos Mn, Si, Cr e C disponíveis no laboratório. A mistura dos pós necessita ter um lubrificante para a etapa de compactação, neste caso sendo utilizado o ácido esteárico na proporção de 1% da massa total da mistura dos pós. Foi utilizada uma balança analítica da marca MARTE para a medição das proporções da mistura de pós apresentada na Tabela 4. A Figura 13 apresenta uma imagem dos pós após a mistura.

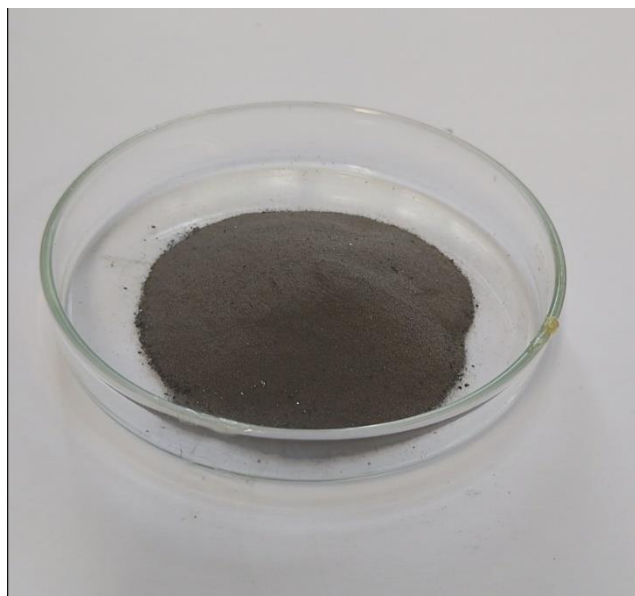


Figura 13 - Mistura dos pós-metálicos.

Com os componentes da mistura pesados, foi realizado, então, a homogeneização da mistura em um misturador do tipo duplo cone apresentado na Figura 14, por aproximadamente 20 minutos a 25 RPM.

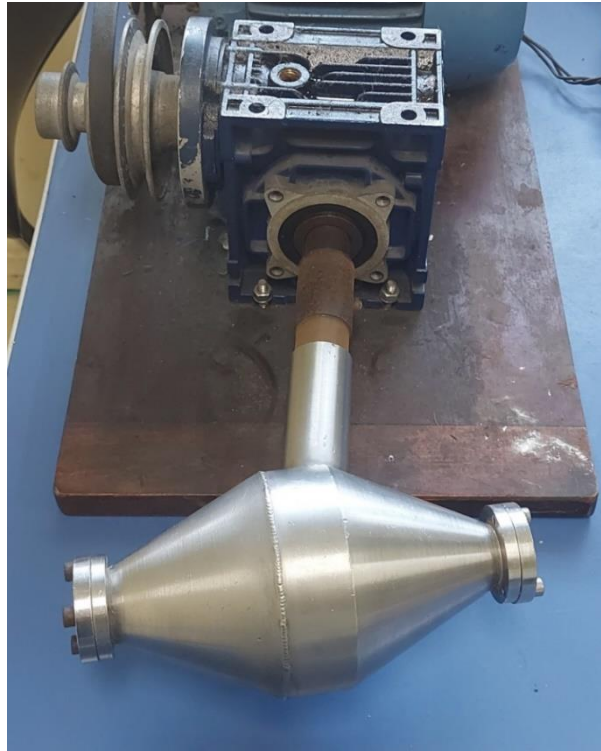


Figura 14 - Misturador de pós.

Com a mistura de pós homogeneizada, com o recurso da balança marca MARTE, o material foi dividido em 4 porções de amostras conforme a Tabela 3, para encaminhá-las a etapa de compactação.

*Tabela 3 - Distribuição das amostras dos pós-metálicos.*

|       | 500 MPa   |           | 600MPa    |           |
|-------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|       | Amostra 1 | Amostra 2 | Amostra 3 | Amostra 4 |
| Massa | 115,02g   | 113,00g   | 115,03g   | 115,06g   |

### 3.3 COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ

A compactação dos pós da liga ABNT 1045 foi realizada em uma prensa hidráulica da marca EKA de 40 toneladas apresentada na Figura 15.



Figura 15 - Prensa hidráulica de compactação.

Os parâmetros de compactação utilizados são fruto da revisão de literatura (MENDONÇA, 2015; DE PAULA, 2019; MARTINS, 2011) onde foi determinado que a pressão de 500MPa e 600MPa apresentavam os melhores resultados das propriedades mecânicas e de densificação.

Após a compactação das amostras as peças foram encaminhadas para a etapa de sinterização.

### 3.4 SINTERIZAÇÃO

As peças compactadas foram sinterizadas em um forno tubular elétrico da marca SANCHIS, com controle de precisão de temperatura de 1°C, Figura 16.



Figura 16 - Forno de sinterização SANCHIS.

O processo de sinterização foi realizado, de acordo com os dados da literatura (DE COSTA, 2014), à temperatura DE 1150°C com aquecimento à taxa de 10°C/min, saindo da temperatura ambiente até a temperatura de 1150°C, mantendo este patamar por uma hora, conforme o gráfico da Figura 17. A sinterização foi realizada em atmosfera controlada de composição de 75% de Nitrogênio e 25% de Hidrogênio.

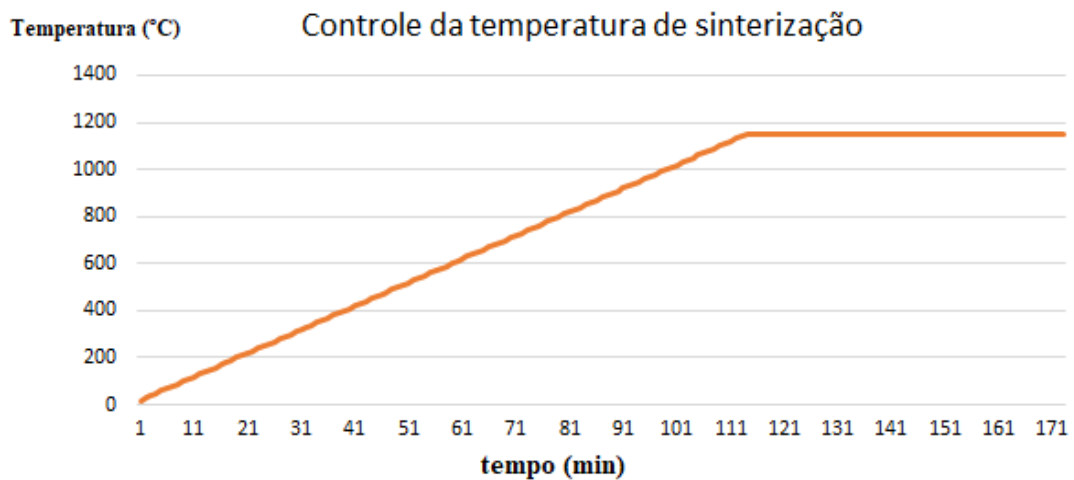


Figura 17 - Gráfico da temperatura de sinterização.

Após a fase de aquecimento, o resfriamento foi realizado em forno até atingir a temperatura ambiente. As peças sinterizadas foram encaminhadas para a etapa de forjamento.

### 3.5 FORJAMENTO

Após a sinterização da geratriz na forma do *billet*, estes foram seccionados em partes iguais formando duas peças de 500MPa e duas peças de 600MPa que foram encaminhadas ao processo de forjamento. O forjamento foi realizado utilizando-se primeiramente um forno resistivo da marca SANCHIS, à temperatura de 1200°C por 30 min a fim de pré-aquecer os *billets* até a temperatura desejada de forma homogênea. As peças pré-aquecidas foram retiradas do forno e transportadas à matriz de forjamento, fabricada em aço ferramenta AISI H13 e fixada a uma prensa FKL com capacidade de 6000kN, conforme a Figura 18.



Figura 18 - Prensa hidráulica FKL.

A matriz foi previamente aquecida por condução térmica utilizando-se uma chapa aquecida até 700°C. Foi utilizado o lubrodal como lubrificante para o processo de forjamento. A Figura 19 apresenta uma imagem durante o processo de sinterforjamento realizado no LdTM.





Figura 19 – Posicionamento da geratriz na matriz para a etapa de forjamento.

### 3.6 ENSAIOS

Foram realizadas as medições de densidade das amostras verde (somente compactadas) e após a sinterização. Dois *billets* sinterizados (500MPa e 600MPa) foram seccionados em duas partes iguais e encaminhados para o ensaio de compressão. Os ensaios de compressão foram realizados em uma máquina de marca EMIC 600KN, Figura 20.



Figura 20 – Máquina de ensaios EMIC.

Após o processo de forjamento das geratrizes sinterizadas, foi realizada a medição de densidade das peças sinterforjadas e retiradas amostras que foram encaminhadas para o ensaio de compressão.

O ensaio para determinar a densidade das peças obtidas foi realizado através do método de Arquimedes, no qual as amostras são imersas em um recipiente que permite a correta medição do volume de água deslocado, posicionado sobre uma balança de precisão correlacionando o volume medido e a massa das peças.

O ensaio de compressão das peças sinterforjadas foi realizado utilizando um segmento da peça devido a máquina de ensaio não ter capacidade para realizar o ensaio no anel inteiro. A máquina estava restrita a 300KN de força máxima devido a problemas mecânicos.

Após a obtenção dos resultados, estes foram comparados e estão apresentados no capítulo Resultados e Discussão.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo estão apresentados os resultados e sua discussão.

### 4.1 DENSIDADE A VERDE E SINTERIZADA DA GERATRIZ

A compactação da mistura resultou em 2 corpos de prova verdes a partir da compactação com a pressão de 500MPa e 2 corpos de prova verdes a partir da compactação com a pressão de 600MPa. Uma das geratrizes compactadas está apresentada na Figura 21.



Figura 21 - Geratriz compactada.

Os resultados das densidades ( $\rho$ ) a verde se comportaram de acordo com o referencial bibliográfico utilizado (DE PAULA, 2019; MARTINS, 2011) demonstrando que o procedimento de compactação estava adequado para o propósito deste trabalho. As densidades a verde e sinterizadas das geratrizes estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Densidades das geratrizes.

| AMOSTRA     | 500MPa                 |                        | 600MPa                 |                        |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|             | 1                      | 2                      | 3                      | 4                      |
| VERDE       | 6,63 g/cm <sup>3</sup> | 6,66 g/cm <sup>3</sup> | 6,80 g/cm <sup>3</sup> | 6,84 g/cm <sup>3</sup> |
| SINTERIZADO | 6,50 g/cm <sup>3</sup> | 6,48 g/cm <sup>3</sup> | 6,67 g/cm <sup>3</sup> | 6,68 g/cm <sup>3</sup> |

Após a sinterização notou-se uma leve redução na densidade com uma média de 2% em relação a densidade verde. Esta redução pode ter sido ocasionada devido ao forno apresentar uma trinca na câmara de sinterização, proporcionando uma interação

entre a atmosfera ambiente e a atmosfera de gás utilizada no controle do processo. Estes valores de densidade sinterizada da liga ABNT 1045 também coincidem com o referencial bibliográfico (MARTINS, 2011).

### 4.3 DENSIDADE DA PEÇA FORJADA

Após a etapa de forjamento verificou-se a possibilidade efetiva do sinterforjamento da liga ABNT 1045. A Figura 22 apresenta a imagem das amostras obtidas no processo de sinterforjamento.



Figura 22 – Peças sinterforjadas de aço ABNT 1045.

As amostras foram submetidas ao ensaio de densidade pelo método de Arquimedes e apresentaram os valores descritos na Tabela 5.

*Tabela 5 - Densidade das amostras sinterforjadas.*

| AMOSTRA                        | 1    | 2    | 3    | 4    |
|--------------------------------|------|------|------|------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 7,35 | 7,31 | 7,48 | 7,40 |

As densidades apresentadas na Tabela 6 demonstram que após o processo de sinterforjamento ocorre a densificação das amostras.

Analisando as peças sinterforjadas apresentadas na Figura 22 e seus resultados de densidade apresentados na Tabela 5, verificou-se que foram atingidos os objetivos principais deste trabalho pois foram obtidas peças com a forma e a dimensão desejadas além de obter-se a densificação em relação ao material sinterizado. Estes resultados evidenciam a viabilidade do uso deste processo para a fabricação de componentes a

partir de *billets* sinterizados conforme os estudos de sinterforjamento encontrados na literatura (SUTRADHAR, 1994).

#### 4.4 ENSAIO DE COMPRESSÃO

Foi realizado um ensaio de compressão nas amostras sinterizadas e nas amostras sinterforjadas com o intuito de verificar a mudança nas suas propriedades mecânicas. A Figura 23 apresenta a curva de compressão das amostras sinterizadas.

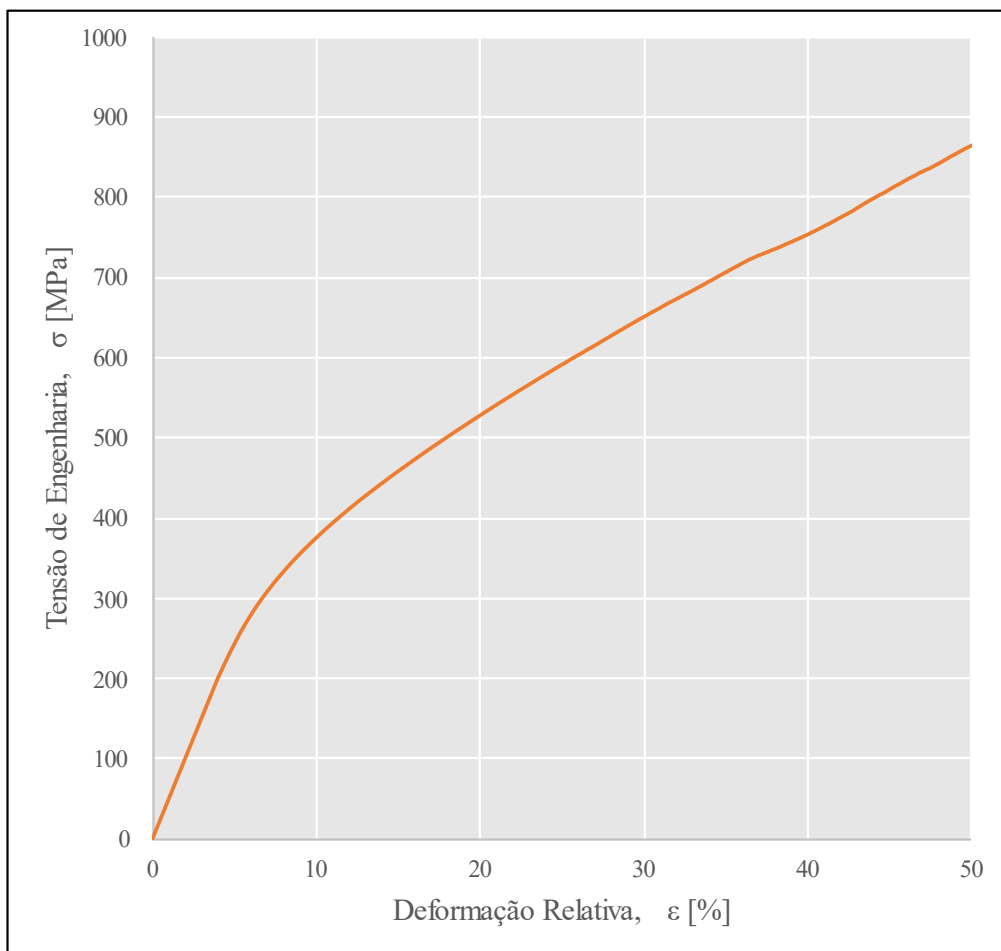


Figura 23 – Ensaio de compressão da geratriz sinterizada.

Nota-se que o limite de escoamento da geratriz sinterizada apresentou um valor médio de 238MPa, nos ensaios foram encontrados valores que variaram desde 211MPa até 265MPa. Peças porosas apresentam valores inferiores aos encontrados em materiais fundidos conforme apresentado na literatura (CASAGRANDE, 2011).

Após a etapa de sinterforjamento foram retirados corpos de prova da região de maior altura do anel e o resultado médio da compressão das amostras está apresentado na Figura 24.

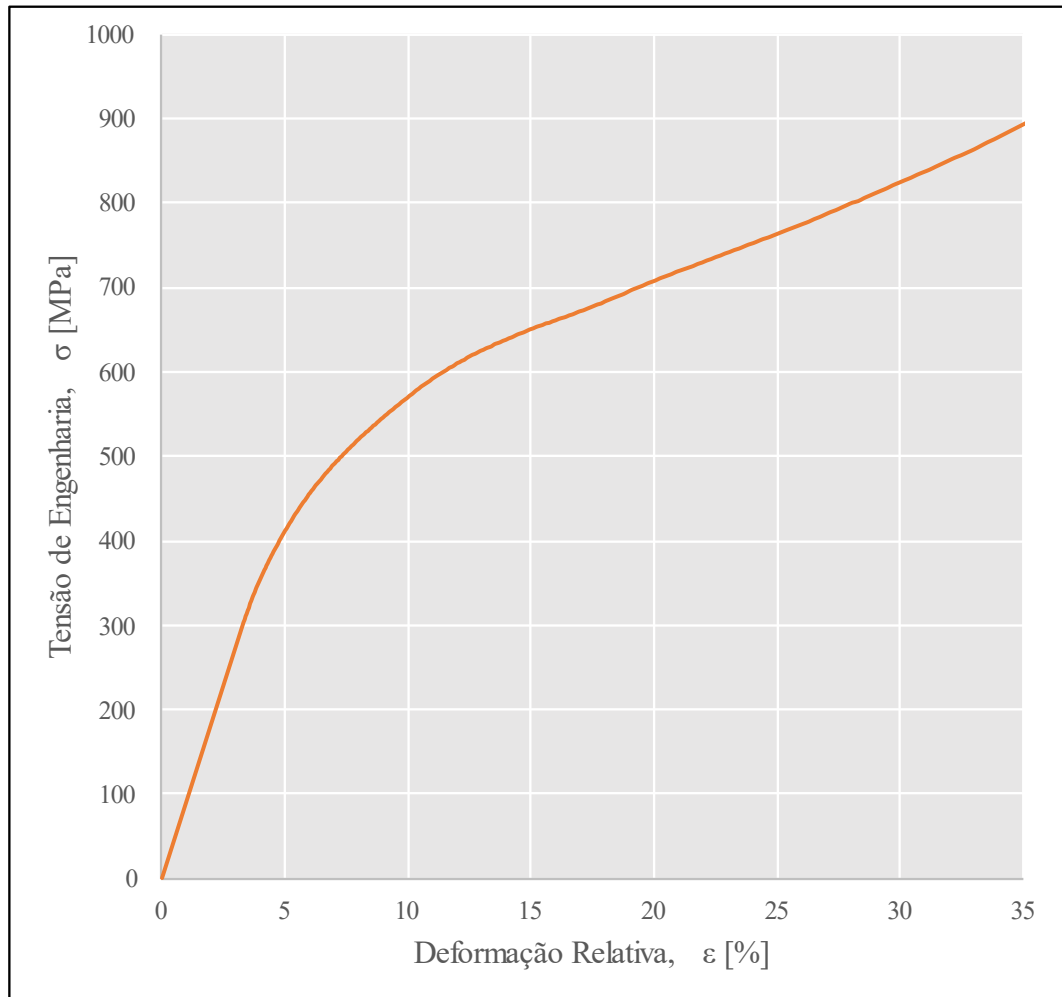


Figura 24 – Ensaio de compressão da peça sinterforjada.

Nota-se que o limite de escoamento da peça sinterforjada apresentou um valor médio de 352MPa, nos ensaios foram encontrados valores que variaram desde 334MPa até 361MPa.

Comparando os resultados do ensaio de compressão das amostras sinterizadas com as amostras sinterforjadas verifica-se um aumento médio de 48% no limite de escoamento.

## 5 CONCLUSÃO

Diante dos resultados obtidos e discutidos neste trabalho pode-se concluir que os parâmetros utilizados na etapa de compactação da mistura simples dos pós elementares da liga ABNT 1045 (500MPa e 600MPa) apresentaram resultados de densidade a verde similares ao da bibliografia, com média de  $6,73 \text{ g/cm}^3$ . A densidade do sinterizado não apresentou mudança significativa, tendo uma redução média de 2%. No entanto, após o sinterforjamento a quente da liga ABNT 1045 obteve-se a densificação das amostras atingindo uma densidade média de  $7,38 \text{ g/cm}^3$ , esse aumento na densificação comprova a efetividade do processo realizado conforme descrito na revisão de literatura.

As peças obtidas após o processo de sinterforjamento a quente apresentaram homogeneidade no dimensionamento e no formato das peças, não apresentando fraturas aparentes nem qualquer outro tipo de falha visível, evidenciando que a peça sinterizada apresentou deformabilidade o suficiente para a formação de um anel sinterforjado.

Os ensaios de compressão demonstraram que o processo de sinterforjamento aprimora as propriedades mecânicas de materiais sinterizados. O aquecimento seguido da aplicação de tensões compressivas resultantes no processo de forjamento é capaz de reduzir significativamente a porosidade do material. Durante o processo de forjamento, a extrusão radial do material induzida pela geometria axissimétrica também gera tensões trativas. Contudo o fluxo de material é limitado pelas paredes da cavidade ao final do processo, de forma que não foram observadas trincas durante a etapa de conformação.

Como resultado da densificação houve um acréscimo de 48% no limite de escoamento, atingindo 352MPa.

Mesmo com todas as dificuldades impostas pela pandemia mundial causada pelo vírus da COVID-19 foi possível concluir a eficácia do processo de sinterforjamento a quente da liga proposta e alcançar o objetivo principal deste trabalho, a efetiva fabricação de um componente sinterforjado, comprovando a melhoria das propriedades físicas e mecânicas de uma peça sinterizada.

## **6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Dadas as condições limitas de uso dos laboratórios e de seus recursos devido a pandemia causada pelo vírus da COVID-19, alguns ensaios se encontraram impossibilitados de serem realizados, dito isto, sugere-se para trabalhos futuros que:

- 1 – Efetuar a análise da metalografia do material sinterforjado;
- 2 - Dar continuidade na caracterização mecânica das amostras da liga do aço ABNT 1045;
- 3 - Estudar o sinterforjamento a frio da liga do aço ABNT 1045;
- 4 – Avaliar a diferença de propriedades partindo para a etapa de forjamento sem que haja o resfriamento da peça após a etapa de sinterização, evitando o reaquecimento;
- 5 – Estudar novas geometrias sinterforjadas mais complexas;
- 6 – Avaliar as propriedades após tratamento térmico das peças sinterforjadas;
- 7 - Estudar o sinterforjamento a quente de outras ligas.

## 7 REFERÊNCIAS

CASAGRANDE, J. **Estudo das propriedades mecânicas da liga Ti-Nb sinterizada para aplicação na área biomédica**. Dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, 2011.

CHANG, I.; ZHAO, Y. **Advances in powder metallurgy**: properties, processing and applications. New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2013.

CHAWLA, N; WILLIAMS , J.J; SAHA, R. , **Mechanical behavior and microstructure characterization of sinter-forged SiC particle reinforced aluminum matrix composites**, Journal of Light Metals, 2 v, ed. 4 , P. 211-228, 2002. ISSN 14715317.

CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. São Paulo, 4 ed., 2001.

DE COSTA, L. L.; TAVAES, A. C.; CORREA, F. J.; WERMUT D. P.; MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. **ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO DO AÇO AISI 4140: ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BILLETS OBTIDOS POR METALURGIA DO PÓ**, SÃO PAULO, 2014. ISSN 1516-392X.

DE PAULA, M. J. T. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DE UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**. Dissertação de mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, UFRGS, Porto Alegre, 2019.

DIETER, G. E.. **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981.

EXNER, H. E. **Principles of Single Phase Sintering** Volume 1, Ed.4 de Reviews on powder metallurgy and physical ceramics, 1979. ISSN 03790002.

GGD METALS. **Produtos – Aço Construção Mecânica**. Disponível em <<https://www.ggdmetals.com.br/produto/sae-1045/>>. Acesso em 02 de nov. 2021.

HAUSNER, H. H.; ROLL, K. H.; JOHNSON, P. K.. **IRON POWDER METALLURGY**: perspective in powder metallurgy. Nova Iorque: Springer-Science+Business Media, B.V., 1968. 3 v.

HELMAN, H.; CETLIN, P. R. **Fundamentos da conformação mecânica dos metais**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2015.

LUZ, G. **Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química**. Blog Materiais, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 26 de outubro de 2021.

MACHADO, M. L. P. **Conformação dos metais**: fundamentos e aplicação. Vitória: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo - Ifes, 2009.

MARTINS, V.; SCHILLING, V. V. B.; SCHAEFFER, L. **ESTUDO DA RECICLAGEM DO CARBONO OBTIDO DO DESMONTE DA PILHA DE ZINCO-CARBONO ATRAVÉS DA METALURGIA DO PÓ**. São Paulo, 2011. ISSN 1516-392X.

MENDONÇA, A. I.; PAULA, M. J. T.; SILVEIRA, M. O.; MARTINS, V.; TAVARES, A.; MARQUES, A. S.; COSTA, L. L.. **DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A MORNO DE UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**. Rio de Janeiro, 2015. ISSN 1516-392X

METALS HANDBOOK. **Forming and Forging**. 9 ed. Ohio, ASM, v. 14, 1988.

PALLINI, A. **Cost reduction in the Automotive Industry through sintering**. Society of automotive engineers Inc, Detroit 2006.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre-RS: Imprensa Livre, 2004.



SCHAEFFER, L. **Forjamento - Introdução ao Processo**. [S. l.: s. n.], 2016. ISSN 11107243.

SEETHARAMAN S., **Fundamentals of Metallurgy**, Woodhead Publishing, 2005.

SUTRADHAR, G., **Production of sinter-forged components**, Journal of Materials Processing Technology, 1994.

SYED, P. S. **CHAPTER-5 POWDER METALLURGY** Introduction Powder Metallurgy, 2010.

TRUDEL, Y. **Introduction to Metal Powder. Production and Characterization** ASM Metals Handbook - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, v.7, 9<sup>a</sup> ed, p. 81-89, 1998.

UPADHYAYA, G s. **Powder metallurgy technology**. Cambridge: Cambridge International Science Pub., 2002.