

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,
METALÚRGICA E DE MATERIAIS - PPGE3M**

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DE
UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**

MARCIO JOSÉ TORRES DE PAULA

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
2019

MARCIO JOSÉ TORRES DE PAULA

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DE
UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**

Trabalho realizado no Centro de Tecnologia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Processo de Fabricação
Orientador: Professor Dr. –Ing. Lírío Schaeffer

Porto Alegre
2019

MARCIO JOSÉ TORRES DE PAULA

**DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE SINTERFORJAMENTO A QUENTE DE
UMA CRUZETA DE AÇO ABNT 1045**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Processos de Fabricação, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e Banca Examinadora.

Orientador:

Professor Dr. –Ing. Lírio Schaeffer
LdTM/UFRGS

BANCA EXAMINADORA:

Dr. Eng. Arão de Matos Dias – Aron Metal Ltda

Prof. Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito – UFRGS

Prof. Dr. José Carlos Krause de Verney – ULBRA- Canoas-RS

Prof. Dr. Afonso Reguly
Coordenador do PPGE3M

AGRADECIMENTOS

Primeiramente sou grato a Deus pela grandiosa conquista, ao Prof. Dr. Lírío Schaeffer e ao Prof. Dr. Vinicius Martins pela confiança e dedicação, me auxiliando e direcionando nos resultados de inovação tecnológica.

Aos professores que participaram da banca, Prof.Dr. Alberto Moreira Guerreiro Brito, Dr. Eng. Arão de Matos Dias, Prof. Dr. José Carlos Krause de Verney, pelo empenho e comprometimento nas valiosas colaborações.

Todos os colegas do LdTM e do SENAI Lindolfo Collor, pela parceria, que muito me auxiliaram nos ensaios, matéria-prima e manufatura.

À minha família, meus avós Brasílicos de Paula e Rosina de Paula *in memorian* e a minha mãe Jaci Terezinha Torres, que me ensinaram a ser justo e honesto, a enfrentar as dificuldades, caminhando sempre pelo caminho correto.

Dedico também de uma forma muito especial, às minhas filhas, que por muitas noites as vi cair no sono ao esperarem minha atenção, este esforço é por elas.

RESUMO

O presente trabalho mostra o processo e a tecnologia na área da ferramentaria para a manufatura e obtenção de uma peça denominada cruzeta, componente típico de uso na linha da indústria automotiva. A cruzeta forjada a partir de uma geratriz sinterizada, chamada também de pré-forma, tendo sua geometria próxima ao perfil final da peça, a cruzeta. A matéria prima da geratriz tem em sua composição o pó de ferro ASC 100,29 e o grafite UNICARBO 50-fino, mensurada sua composição com característica à de um aço ABNT 1045. Com dados da sua curva de compressibilidade a geratriz foi compactada com uma pressão de 600 MPa, as geratrizes foram sinterizadas a 1150 °C em atmosfera redutora, mantido até 1100 °C e rapidamente transferida para uma matriz fechada para a execução do processo de forjamento a quente. Para o projeto de desenvolvimento da cruzeta e da geometria da geratriz, bem como as ferramentas de compactar o pó metálico e a matriz de forja, foram modeladas em CAD 3D. Para a confecção das ferramentas utilizou-se de máquinas operatrizes e máquinas com Comando Numérico Computadorizado. Com as cruzetas sinterforjadas, realizaram-se ensaios de compressão, análise de metalografia, densidade, microdureza, MEV e EDS. Com os resultados dos ensaios verificou-se o Limite de Escoamento de 289 MPa e Tensão Máxima de 372 MPa, homogeneidade da ferrita e perlita, a densidade da cruzeta sinterizada foi de 6,58 g/cm³ e forjada com 6,98 g/cm³, verificado a dureza de 185 HV, na análise com Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) foi observado o possível fechamento ou redução no tamanho do poro devido a conformação no forjamento, no ensaio Espectrômetro de Raio-X por Dispersão de Energia (EDS), quantificaram-se os elementos químicos constituintes na composição da cruzeta sinterforjada.

Palavras chave: Metalurgia do pó convencional. Sinterforjamento. Forjamento.

ABSTRACT

The present work shows the process and technology in the area of tooling for the manufacture and obtaining of a part called crosshead, a typical component used in the automotive industry line. The crosshead forged from a sintered geratrice, also called a preform, with its geometry close to the final profile of the part, the crosshead. The raw material of the geratrice has in its composition the iron powder ASC 100,29 and the graphite UNICARBO 50-fine, measured its composition with characteristic to that of an ABNT 1045 steel. With data of its compressibility curve the geratrice was compacted with a At a pressure of 600 MPa, the geratrices were sintered at 1150 °C in a reducing atmosphere, maintained up to 1100 °C and quickly transferred to a closed die for the execution of the hot forging process. For the project to develop the crosshead and the geometry of the geratrice, as well as the tools for compacting the metal powder and the forging die, they were modeled in 3D CAD. For making the tools, machine tools and machines with Computer Numerical Command were used. Compression tests, metallography analysis, density, microhardness, MEV and EDS were carried out with sintered crosspieces. With the results of the tests it was verified the Flow Limit of 289 MPa and Maximum Stress of 372 MPa, homogeneity of the ferrite and pearlite, the density of the sintered crosshead was 6.58 g / cm³ and forged with 6.98 g / cm³, checking the hardness of 185 HV, in the analysis with Scanning Electron Microscope (MEV) it was observed the possible closing or reduction in the pore size due to conformation in the forging, in the Energy Dispersion X-Ray Spectrometer (EDS) test, the constituent chemical elements in the composition of the sintered crosshead were quantified.

Keywords: Conventional powder metallurgy. Sinterforging. Forging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Desenvolvimento do projeto do produto (A) Mensurado proporção de pó (B), feito a compactação do pó (C), realizado a sinterização do compactado (D), a geratriz é forjada (E), obtendo o produto final, a cruzeta sinterforjada (F).....	16
Figura 2 - Micrografia do aço ABNT 1045: A) amostra antes do ataque químico. Aumento de 50x e B) após o ataque com Nital 2%. Aumento de 100x [13].....	19
Figura 3 - Ensaio de compressão a frio mostra curva de tensão verdadeira versus deformação verdadeira, do aço 1045 trefilado no estado normalizado [7].....	20
Figura 4 - Compactado de pó de ferro após sinterização a 1150 °C, por 120 min em atmosfera de hidrogênio, destacando-se a porosidade.	22
Figura 5 - Competitividade da MP frente à Usinagem em função do volume fabricado [21]	23
Figura 6 - Comparação da metalurgia do pó, com processos de produção de peças no quesito consumo de energia por kg processado e aproveitamento de matéria-prima [23]	24
Figura 7 - Etapas do processo da metalurgia do pó [20].	25
Figura 8 - Imagem ilustrativa da morfologia do pó de ferro ASC 100.29 [26, 27].....	25
Figura 9 - Microestrutura de um compactado produzido com pó de ferro ASC 100.29. Ataque com Nital [26, 27]	26
Figura 10 - Compactação de simples ação.....	27
Figura 11 - Compactação de dupla ação	28
Figura 12 - Estágios do mecanismo de sinterização.....	29
Figura 13 - Tipos de produtos obtidos pela metalurgia do pó	30
Figura 14 - Biela sinterizada forjada acabada [33].....	33
Figura 15 - Comparativo de resistência mecânica entre diversos materiais e processos [23]	34
Figura 16 - Fluxograma do trabalho desenvolvido	35
Figura 17 - Dimensões do projeto do produto (A) em perspectiva isométrica modelo do produto (B).....	36
Figura 18 - Dimensionamento da geratriz com base na geometria da cruzeta	36
Figura 19 - Em vista superior visualiza-se o perfil da geratriz menor que o perfil da cruzeta.....	37
Figura 20 - Balança e o copo de Becker	37
Figura 21 - Misturador de cargas dos pós	38
Figura 22 - Fluxograma do trabalho desenvolvido para ferramenta.....	38
Figura 23 - Ferramenta de compactar em Perspectiva e vista explodida (A) e dimensões externas da ferramenta (B).....	39
Figura 24 - Funcionamento da ferramenta de compactação, vista em corte: (A) pó metálico colocado na cavidade; (B) punção inferior e/ou superior inicia a prensagem; (C) o material é compactado e (D) material compactado é extraído da cavidade	40
Figura 25 - Detalhamento da matriz (A) e foto da execução das matrizes (B)	40
Figura 26 - Eletro erosão a fio (A); medição da dureza da matriz (B) e medição de rugosidade da superfície (C)	41
Figura 27 - Desenho do punção inferior	41
Figura 28 - Desenho do punção superior.....	42
Figura 29 - Bloco temperado (A); corte na eletro a fio (B); punção dado acabamento (C) e punções separados (D)	42
Figura 30 - Ferramenta confeccionada (A) e ferramenta ajustada e montada, matriz e punções (B)	43
Figura 31 - Prensa hidráulica e matriz de compactar (a) detalhe da matriz de compactar ampliada (b).....	44

Figura 32 - Gráfico de sinterização convencional (A) e forno utilizado para sinterizar as geratrizes (B).....	45
Figura 33 - Cruzeta, produto no bloco (A) e produto extraído do bloco com a cavidade pronta na matriz (B).....	45
Figura 34 - Geratriz sinterizada (A); geratriz forjada (B) e suas vistas superiores respectivamente(C) e (D)	46
Figura 35 - Geratriz aquecida na cavidade da matriz para o forjamento.....	47
Figura 36 - Geratriz conformada no perfil da cavidade da matriz de forjamento.....	47
Figura 37 - Conjunto superior e inferior em perspectiva	48
Figura 38 - Desenho da matriz superior de forjamento.....	49
Figura 39 - Desenho da matriz inferior de forjamento.....	49
Figura 40 - Corpo da matriz de forjamento	49
Figura 41 - Descrição de cada peça da ferramenta	50
Figura 42 - Postiços pré-usinados e retificados	50
Figura 43 - Forno de tratamento térmico (A) e medição da dureza após têmpera e o revenimento(B).....	51
Figura 44 – Nas figuras (A) e (B), mostra simulações para programação de usinagem .	52
Figura 45 - Foto da eletroerosão (A) eletrodo de cobre sendo centralizado na peça (B); foto do eletrodo (C).....	53
Figura 46 - Inserto matriz superior (A) e inserto matriz inferior (B)	54
Figura 47 - Colunas torneadas (A); face retificada (B) e corte feito na eletroerosão a fio (C)	54
Figura 48 - Bases superior e inferior furadas na fresadora, cortadas na eletroerosão a fio unidas.....	55
Figura 49 - Conjunto superior (A); conjunto inferior (B), as colunas, buchas e matrizes insertadas.....	55
Figura 50 - Prensa hidráulica FKL (A) e ferramenta de forjamento fixada na prensa (B)	56
Figura 51 - Montagem e leitura com acessórios adaptados na prensa (A) e (B)	58
Figura 52 - Análise MEV e EDS.....	59
Figura 53 - O valor da área na figura (a) e na figura (b) sendo a medida “ hg” calculada a altura da geratriz com 21,3 mm	61
Figura 54 - Porosidade sem ataque químico Nital, com aumento de 100x.....	62
Figura 55 - Com a taque nital, visualiza-se a ferrita e perlita	62
Figura 56 - Contorno e tamanho de grão da ferrita e perlita	63
Figura 57 - Na face seccionada, feito medições de dureza	64
Figura 58 – Ponto onde foi seccionada parte da cruzeta (A) e a parte cortada para amostra de ensaio (B)	64
Figura 59 - Gráfico tensão verdadeira versus deformação verdadeira do corpo de prova da referida cruzeta sinterforjada.....	68
Figura 60 - Micrografia por MEV da amostra analisada.....	66
Figura 61 - A análise elementar por energia dispersiva.....	66
Figura 62 - Nas figuras (A) e (B) ainda com rebarbas, nas figuras (C), (D) e (E) retirado parte das rebarbas, figura(F) geratriz somente sinterizada.....	67
Figura 63 - Trincas na rebarba.....	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição com valores em % em peso do aço ABNT 1045.	18
Tabela 2 – Propriedades do aço ABNT 1045 [11,12]	19
Tabela 3 - Propriedades típicas do pó de ferro ASC100.29 [26, 27]	26
Tabela 4 - ABNT 1045 no estado sinterizado e no estado sinterforjado	33
Tabela 5 - Comparativo entre as peças sinterizadas e sinterforjados	61
Tabela 6 - Média dos valores encontrados da cruzeta sinterforjada	63
Tabela 7 - Valores coletados no ensaio de compressão	65
Tabela 8- Material e percentual na amostragem	67

LISTA DE ABREVIATURAS

3D	-	Três Dimensões
a.C.	-	Antes de Cristo
ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	-	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	-	Desenho Assistido por Computador (<i>Computer-Aided Design</i>)
CAM	-	Manufatura assistida por computador (<i>Computer-Aided Manufacturing</i>)
CNC	-	Controle Numérico Computadorizado (<i>Computer Numeric Control</i>)
CP	-	Corpo de Prova
EDM	-	Usinagem por descarga elétrica (<i>Electrical Discharge Machining</i>)
EDS	-	Espectrômetro de Raio X por Dispersão de Energia (<i>Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy</i>)
EPI	-	Equipamento de Proteção Individual
HB	-	Dureza Brinell
HRC	-	Dureza Rockwell
HV	-	Dureza Vickers
IFSUL	-	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-riograndense
IPT	-	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ISSO	-	<i>International Organization for Standardization</i>
LdTM	-	Laboratório de Transformação Mecânica
LVDT	-	Transformador Diferencial Variável Linear (<i>Linear Variable Differential Transformer</i>)
MEV	-	Microscópio Eletrônico de Varredura
MP	-	Metalurgia do Pó
MPIF	-	<i>Metal Powder Industries Federation</i>
PPGE3M	-	Programa de Pós-Graduação em engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais
RPM	-	Rotação por minuto
SAE	-	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SENAI	-	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
UFRGS	-	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

A_i	Área da secção instantânea	[mm ²]
A_b	Área da base da geratriz	[mm ²]
F	Força	[N]
h_g	Altura inicial da geratriz	[mm]
h_0	Altura inicial	[mm]
h_i	Altura instantânea do corpo de prova	[mm]
k_f	Tensão de escoamento do material	[MPa]
m	Massa	[g]
T	Tempo	[min]
V	volume	[cm ³]
v	Velocidade da prensa	[mm/s]

Símbolos gregos

δ	Alongamento	[%]
ρ	Densidade	[g/cm ³]
φ	Deformação verdadeira	[—]
\varnothing	Diâmetro	[mm]
μm	Micrômetro	[m]
σ_t	Tensão Máxima	[MPa]

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	IV
RESUMO V	
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	IX
LISTA DE ABREVIATURAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
SUMÁRIO XII	
1. INTRODUÇÃO	14
1.1. OBJETIVO GERAL.....	14
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA	15
1.4. VISÃO GERAL DO TRABALHO.....	15
2. REVISÃO DE LITERATURA	17
2.1. FORJAMENTO.....	17
2.2. AÇO ABNT 1045	18
2.2.1. Composição química e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045	18
2.2.2. Aplicações industriais do aço ABNT 1045	20
2.3. METALURGIA DO PÓ.....	20
2.3.1. Porosidades e Características da MP.....	21
2.3.2. Vantagens e limitações da metalurgia do pó	22
2.3.3. Etapas do processo da metalurgia do pó.....	24
2.3.4. Mistura e Compactação	26
2.3.5. Compactação de simples e dupla ação	27
2.3.6. Sinterização	28
2.3.7. Aplicações gerais de produtos obtidos pela Metalurgia do pó	29
2.3.8. Dureza de corpos sinterizados.....	30
2.4. SINTERFORJAMENTO.....	31
2.4.1. Processo de fabricação	31
2.4.2. Propriedades mecânicas	32
2.4.3. Aplicações de Sinterforjados.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1. PROJETO DE PRODUTO E GERATRIZ	35
3.1.1. Desenho do produto	35
3.1.2. Desenho da geratriz.....	36
3.2. PREPARAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DOS PÓS (ASC 100,29 + GRAFITE).....	37
3.2.1. Preparação da mistura.....	37
3.2.2. Homogeneização dos pós	38
3.3. DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DA FERRAMENTA PARA COMPACTAR A GERATRIZ	38
3.3.1. Confecção da matriz	40
3.3.2. Confecção dos punções	41
3.4. COMPACTAÇÃO A FRIO DA GERATRIZ	43
3.5. SINTERIZAÇÃO DA GERATRIZ.....	44
3.6. DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DA FERRAMENTA DE FORJAMENTO.....	45
3.7. FORJAMENTO A QUENTE DA GERATRIZ SINTERIZADA	55

3.8. ENSAIOS REALIZADOS	57
3.8.1. Ensaio de densificação da cruzeta	57
3.8.2. Análise metalográfica da peça sinterforjada	57
3.8.3. Dureza da peça sinterforjada	57
3.8.4. Compressão da peça sinterforjada	58
3.8.5. Ensaio Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectrômetro de Raio X por Dispersão de Energia.....	59
4. ANÁLISE EXPERIMENTAL	60
4.1. COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ	60
4.2. DENSIDADE DA CRUZETA SINTERIZADA E FORJADA.....	61
4.3. ANALISE METALOGRAFICA DA CRUZETA SINTERFORJADA	62
4.4. DUREZA DA CRUZETA SINTERFORJADA	63
4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DA CRUZETA SINTERFORJADA.....	64
4.6. ENSAIO MEV E EDS	66
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	68
5.1. COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ	68
5.2. DENSIDADE DA CRUZETA SINTERIZADA E SINTERFORJADA.....	68
5.3. ANALISE METALOGRAFICA DA CRUZETA SINTERFORJADA	68
5.4. DUREZA DA CRUZETA SINTERFORJADA	69
5.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DA CRUZETA SINTERFORJADA.....	69
5.6. ENSAIO MEV E EDS	70
5.7. CRUZETA SINTERFORJADA.....	70
6. CONCLUSÃO.....	71
SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS.....	73
REFERÊNCIAS.....	74
APÊNDICE.....	80

1. INTRODUÇÃO

O avanço da tecnologia torna a cada dia mais acirrada a competitividade e a sobrevivência da indústria. O setor da indústria do forjamento e da metalurgia do pó, processos distintos e técnicas consolidadas já nesta quarta revolução da indústria, vem aperfeiçoando o processo do sinterforjamento, que é o forjamento de produtos sinterizados, somando assim as vantagens de cada processo convencional em uma única técnica de processamento.

O forjamento, antigo processo de conformação de metais, tem suas origens no trabalho dos ferreiros há muito séculos a.C, mas houve a Revolução Industrial substituindo o ferreiro, no término do século XIX. Em 1856 se revolucionou a indústria metal mecânica, entre eles a de forjados com a produção em massa do aço com a invenção do conversor Bessemer se obtendo o ferro gusa [1, 2].

Existe atualmente, um grande número de maquinários para o forjamento, capaz de produzir peças das mais diversas formas e tamanhos, desde alfinetes, pregos, parafusos, porcas, dobradiças e até suporte de motor para aeronaves [3].

Empresas que produzem produtos metálicos porosos com o processo de forjamento obtiveram destaque considerável de nível nacional e internacional, aproveitando-se das vantagens da metalurgia do pó [4, 5].

Um número cada vez maior de projetistas está dando preferência aos componentes sinterizados em substituição aos componentes metálicos, tradicionalmente fabricados por fundição, estampagem ou usinagem, tendo-se em vista também, a alta produtividade na indústria para atender a demanda do mercado [6, 7]. Peças sinterforjadas são usadas numa grande variedade de indústrias, tais como: automotiva, máquinas agrícolas, material bélico, eletrodomésticos [8].

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é mostrar aos profissionais da indústria e pesquisadores o processo de manufatura dos ferramentais para o sinterforjamento a quente de uma cruzeta a base do pó de ferro ASC 100,29 e o grafite, na proporção de um aço ABNT 1045.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Tendo como objetivos específicos a partir das amostras, os seguintes tópicos:

- ilustrar o processo de sinterforjamento na fabricação de uma cruzeta, mostrando desenhos detalhados e em 3D até o produto em meio físico;
- mostrar o processo de mensurar os pós metálicos na proporção de um aço ABNT1045 e sua homogeneização;
- ilustrar os desenhos e processos de manufatura da matriz de compactar o *billet*, denominado também como a geratriz, tendo a geratriz sua periferia externa próxima ao perfil do produto final;
- ilustrar o processo e manufatura da matriz de forjamento da cruzeta que será utilizada logo após da sinterização da geratriz;
- sinterizar a geratriz e forjar a cruzeta de aço ABNT 1045;
- analisar visualmente a cruzeta sinterforjada a fim de verificar trincas superficiais e seu preenchimento na matriz;
- realizar ensaios da cruzeta sinterforjada com avaliação da sua compactação, densidade, dureza, metalografia, compressão, MEV e EDS.

1.3. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA

Tendo como base a utilização do processo de sinterização dos pós-metálicos e o processo de forjamento, aprimora-se o conhecimento destas duas técnicas, com suas vantagens e desvantagens, dando opção para as indústrias na criação de novos produtos tecnológicos através do processo do sinterforjamento.

1.4. VISÃO GERAL DO TRABALHO

O trabalho de modo geral visa mostrar o processo da metalurgia do pó, forjamento a quente e a manufatura de suas respectivas ferramentas para confecção da cruzeta sinterforjada. Uma síntese dos procedimentos é mostrada na figura 1.

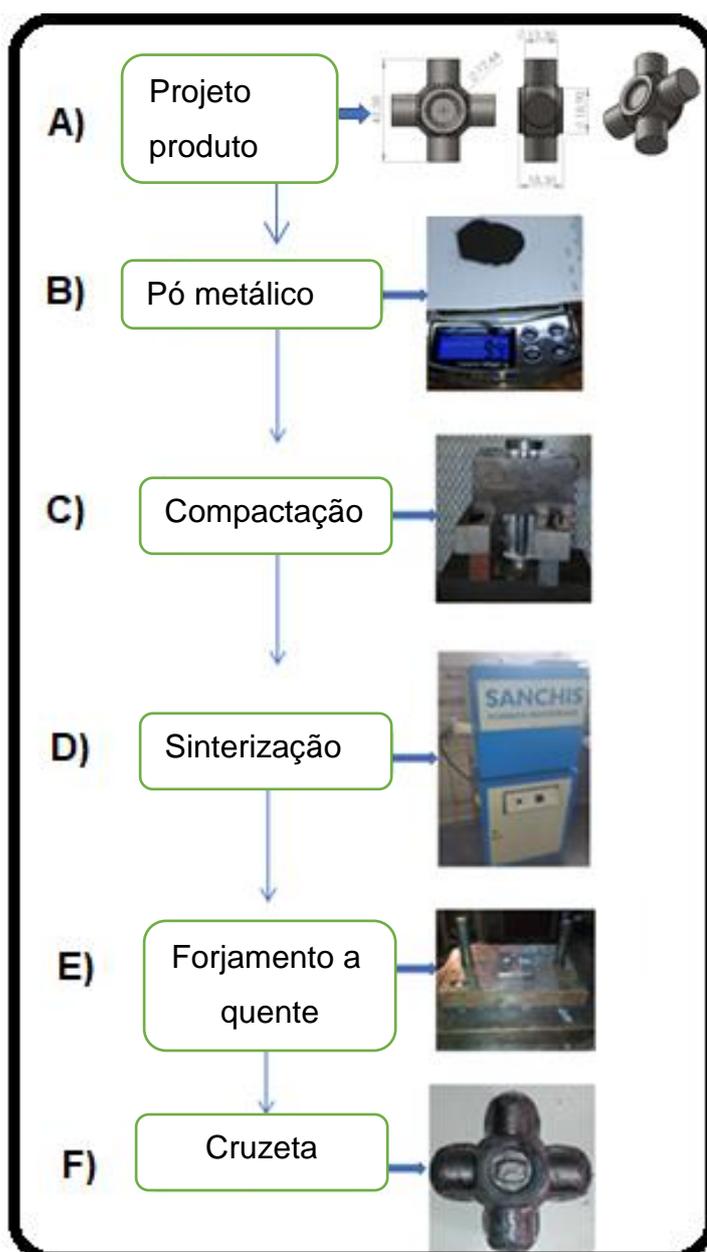


Figura 1 - Desenvolvimento do projeto do produto (A) Mensurado proporção de pó (B), feito a compactação do pó (C), realizado a sinterização do compactado (D), a geratriz é forjada (E), obtendo o produto final, a cruzeta sinterforjada (F).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo é comentada a revisão de itens como forjamento, aço ABNT 1045, metalurgia do pó, compactação, sinterização e sinterforjamento.

2.1. FORJAMENTO

O forjamento é um processo de conformação mecânica, com capacidade de conformar o material plasticamente. No forjamento existem dois tipos gerais de equipamentos para este processo: os martelos de queda livre e as prensas sendo geralmente com matriz fechada [6,2]. O forjamento é realizado a quente mas também executado a frio e a morno.

Dentro das tecnologias de manufatura dos metais, o forjamento aparece como um dos mais antigos processos de fabricação. No entanto, o moderno e tecnológico processo empregado nas grandes forjarias, em pouco lembra o velho martelo manual e a brasa utilizada para aquecer o metal, que consistiam nos principais equipamentos nos primórdios do processo [4, 3, 9].

De acordo com o *site* SteelForge, o aço forjado é mais durável em certas aplicações porque, apesar de nascer como aço fundido, ele é forjado por prensas hidráulicas, mecânicas, martelos e demais tipos, que forçam os grãos do aço a entrar em alinhamento. O aço moldado não passa por esse mesmo processo, o que faz do aço forjado resistente e menos suscetível a quebra [4, 9].

Em geral, todos os materiais conformáveis, podem ser forjados. Os mais utilizados para a produção de peças forjadas são os de aços (baixo teor de carbono, ligados, aços estruturais, aços para cementação, para beneficiamento, aços inoxidáveis, aços ferramenta). Produtos conformados pelo processo de forjamento caracterizam-se pelo aproveitamento da matéria-prima, reduzindo custos, perdas que originam sucata e pela produção econômica de produtos que exigem características mecânicas com dimensões controladas. Produtos forjados apresentam uma microestrutura homogênea, livres de porosidades e com um fibramento favorável às propriedades mecânicas devido a deformação plástica [3,2].

Após o processo de forjamento geralmente as peças passam pelo processo de usinagem para dar o acabamento final ou rebarbamento [3].

2.2. AÇO ABNT 1045

O aço ABNT 1045 se classifica como aço de médio teor de carbono (0,43% a 0,50% de C) apresenta boa resistência mecânica e tenacidade, bem como, boa usinabilidade e soldabilidade. Quando laminado a quente ou normalizado é também um aço para beneficiamento com temperabilidade baixa, ou seja, baixa penetração de dureza na seção transversal, não sendo recomendando seu uso para espessuras superiores a 60 mm de qualquer geometria. Possui uma boa relação entre resistência mecânica e resistência à fratura. É utilizado em geral com durezas de 180 a 300 HB, sendo geralmente fornecido laminado com dureza de 260 HB [10].

2.2.1. Composição química e propriedades mecânicas do aço ABNT 1045

Na tabela 1, podem-se ver os elementos químicos que compõem a estrutura química do aço ABNT 1045 [10]. O carbono é responsável direto pela dureza superficial do material. O manganês auxilia na temperabilidade, atua como desoxidante e também age como dessulfurante, ao combinar-se com o enxofre, formando sulfeto de manganês, eliminando o problema de fragilidade a quente. O silício é o elemento essencialmente desoxidante, pois neutraliza a ação do CO, por ocasião da fusão e solidificação dos aços. O fósforo e enxofre são considerados impurezas nocivas no aço [1,11].

Tabela 1 - Composição com valores em % em peso do aço ABNT 1045.

C	Mn	Si	Cr	Al	P	S
0,43	0,60	0,40 máx.			0,04 máx.	0,05máx.
--	--					
0,50	0,90					

Fonte: (<https://ggdmetals.com.br>)

Na tabela 2 verificam-se as propriedades mecânicas no estado laminado a quente, normalizado e recozido do aço ABNT 1045 [12].

Tabela 2 – Propriedades do aço ABNT 1045 [11,12]

Condições	Temperatura de Austenitização (°C)	Tensão Máxima- [σ_t] [MPa]	Limite de escoamento-[k_f] [MPa]	Alongamento- [δ] [%]	Redução de área [%]	Dureza Brinell [HB]	Densidade- [ρ] [g/cm ³]
Laminado	-	620	415	25	50	201	-
Normalizado	900	595	370	28	55	170	7,87
Recozido	790	520	350	30,20	57	149	-

Fonte: <http://www.qualinox.com.br>

Na figura 2, verifica-se a micrografia do aço ABNT 1045, obtido a partir de uma barra trefilada no estado normalizado.

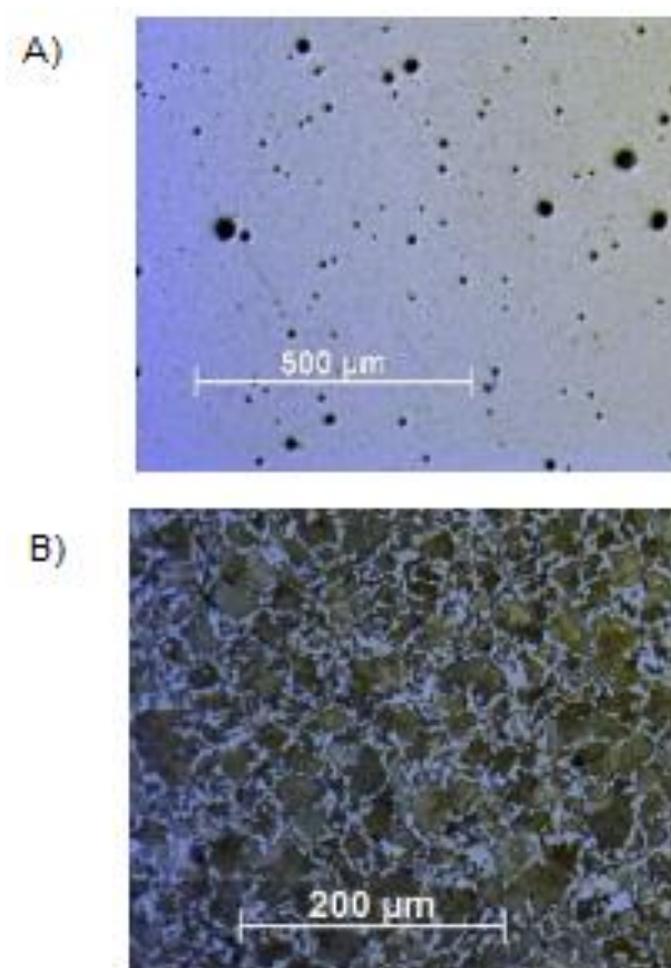


Figura 2 - Micrografia do aço ABNT 1045: A) amostra antes do ataque químico. Aumento de 50x e B) após o ataque com Nital 2%. Aumento de 100x [13]

Onde os pontos negros nas micrografias podem ser inclusões causadas por oxidação ou porosidades. A microestrutura do aço ABNT 1045 em estado normalizado apresenta ferrita (região clara) e perlita (região escura) com contornos de grão bem delimitados [12, 13].

Na figura 3, através do ensaio de compressão é apresentada a Tensão e a Deformação Verdadeira do aço ABNT 1045.

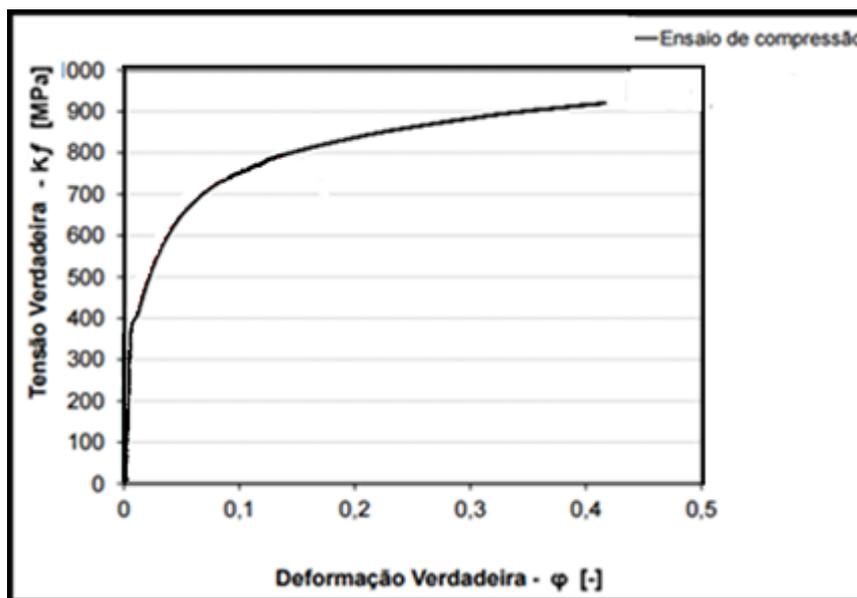


Figura 3 - Ensaio de compressão a frio mostra curva de tensão verdadeira versus deformação verdadeira, do aço 1045 trefilado no estado normalizado [7].

2.2.2. Aplicações industriais do aço ABNT 1045

O aço ABNT 1045 é utilizado na indústria mecânica na confecção de componentes de uso em geral, por ser um aço com médio teor de carbono, oferece boa resistência mecânica. Aplicado na construção mecânica, em peças de produtos forjadas e usinadas para o setor de máquinas e automóveis, tais como eixos em geral, pinos, cilindros, ferrolho, grampos, braçadeiras, pinças, cilindros, colunas, engrenagens, virabrequim entre outros [8,11].

O forjamento do aço ABNT 1045 deve ser realizado na temperatura mínima de 850 °C a 870°C e máxima de 1240 °C a 1250 °C [10, 12].

2.3. METALURGIA DO PÓ

A compressão de pós de ligas metálicas e não metálicas e cerâmicas em uma cavidade de uma ferramenta com perfil igual ou aproximado do produto desejado é conhecido como a Metalurgia do Pó.

O resultado do processo de compressão é a compactação da mistura dos pós, chamado de “compactado verde”, que logo após é aquecido, em condições controladas, com o objetivo de melhorar a coesão. Um dado importante do processo é que a temperatura de aquecimento permanece abaixo da temperatura de fusão do metal base da mistura para ocorrer a interdifusão, ligação mecânica entre as partículas do pó metálico [14, 15].

No Brasil, a Metalurgia do Pó (MP) nasceu na década de 40, quando Vicente Chiaverini, com o apoio decisivo do Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo – IPT instalou e operou uma pequena usina experimental [16].

A MP atualmente é empregada na fabricação de várias peças metálicas ferrosas e não ferrosas, em sua grande maioria de aplicação na indústria automotiva, mas também em cerâmica, materiais de fricção, contatos elétricos, filtros metálicos, materiais magnéticos [17].

O processo da MP tem como característica o baixo custo para produção de peças em fabricação em série quando automatizadas, baixo impacto ambiental quando comparada com outras tecnologias, pois exige um menor consumo de energia de transformação e possibilita um alto aproveitamento da matéria-prima. Possui ainda como característica a obtenção de peças com as tolerâncias finais necessárias para aplicação direta no produto do cliente, o que acaba reduzindo os custos, por não haver um processo de manufatura posterior [17, 18].

2.3.1. Porosidades e Características da MP

Uma característica em destaque é com o ganho de matéria-prima, pois não gera cavacos [19]. Também importante na MP é a sua porosidade, sendo os espaços entre as suas partículas sólidas de geometria na maioria das vezes irregulares, decorrentes da falta de ligação atômica de suas partículas durante a sinterização, dependendo do tipo de trabalho que estas peças forem executar, a porosidade poderá ser benéfica ou indesejada [20, 21].

Peças fabricadas pelo processo da MP possuem porosidade, um volume de pequenos vazios distribuídos uniformemente do volume total aparente. Vários fatores podem determinar esta condição característica, dentre elas a pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização, tamanho e forma das partículas do pó, existência de processos complementares de compressão [18]. A porosidade

possibilita a fabricação de filtros metálicos e mancais auto lubrificantes [20, 22]. Na figura 4, pode-se ver em detalhes a porosidade no material.

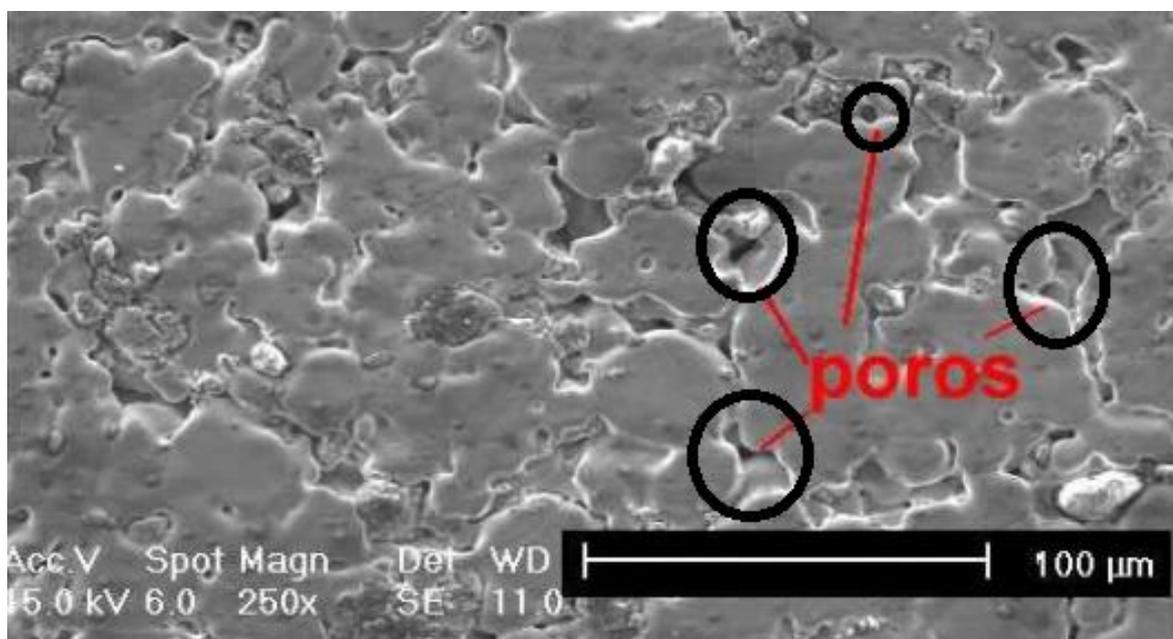


Figura 4 - Compactado de pó de ferro após sinterização a 1150 °C, por 120 min em atmosfera de hidrogênio, destacando-se a porosidade.

Fonte: <https://www.cimm.com.br>

A densidade aparente (ρ) é afetada pela porosidade a sua compressibilidade como também a porosidade da peça acabada. Existem dois tipos de porosidade: porosidade tipo esponjosa, caracterizada pela presença de poros que não estão interligados entre si e porosidade em que os poros estão interligados entre si. Quando os poros estiverem ligados com a superfície, verifica-se um aumento da superfície específica das partículas, além de ficar facilitada a absorção de gases durante o seu processamento [16, 18].

2.3.2. Vantagens e limitações da metalurgia do pó

A Metalurgia do Pó, como qualquer processo inovador, possui vantagens e limitações. As vantagens são as seguintes:

- facilidade de automação do processo [20];
- produtividade elevada: processo adequado para grandes lotes [20];
- a figura 5 mostra um gráfico comparativo das peças produzidas com a metalurgia do pó frente a processos de usinagem convencionais, os

sinterizados serão sempre vantajosos em grandes lotes de produção [18].

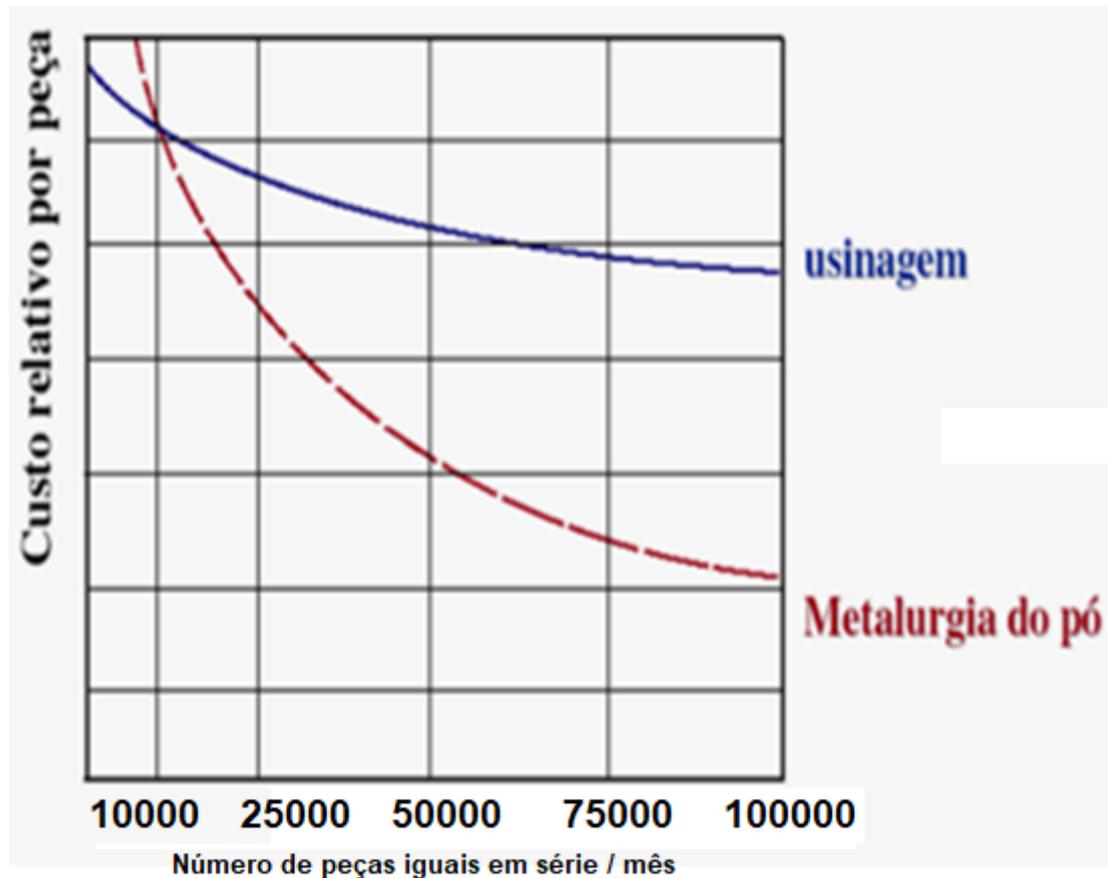


Figura 5 - Competitividade da MP frente à Usinagem em função do volume fabricado [21]

- pureza dos produtos obtidos, e controle preciso da composição química;
- máximo aproveitamento de material;
- precisão e repetitividade;
- permite formas complexas com bom acabamento superficial;
- boa tolerância dimensional, dispensando operações posteriores de usinagem;
- perda mínima de matéria-prima; homogeneidade estrutural e de propriedades;
- processo que exige uma baixa energia de transformação do material [14, 20];
- maior eficiência energética, conforme mostra o gráfico da figura 6;

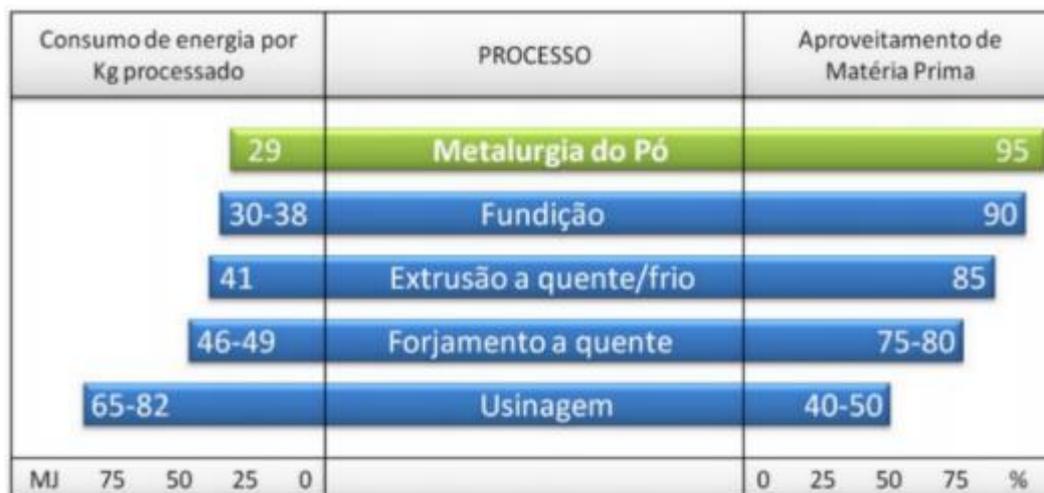


Figura 6 - Comparação da metalurgia do pó, com processos de produção de peças no quesito consumo de energia por kg processado e aproveitamento de matéria-prima [23]

Na metalurgia do pó se atinge um consumo de energia por quilograma de matéria processada de 29 MJ (baixa energia de transformação) e aproveitamento da matéria-prima acima de 95 %, sendo vantajoso seu uso na indústria [23].

A metalurgia do pó também apresenta algumas limitações que podem ser vistas conforme sentenças apresentadas a seguir:

- geometria da peça deve permitir extração;
- custo de ferramental é elevado;
- tamanho da peça, em função da capacidade de compactação (força envolvida);
- eventuais trincas superficiais não podem ser corrigidas [16].

2.3.3. Etapas do processo da metalurgia do pó

A tecnologia da MP baseia-se na prensagem de pós em moldes metálicos e consolidação da peça por aquecimento controlado. O resultado é um produto com a forma desejada, bom acabamento de superfície, composição química e propriedades mecânicas controladas. O processo da metalurgia envolve quatro etapas fundamentais: a obtenção, a mistura, compactação e a sinterização dos pós, como podem ser visto no esquema, de acordo com a figura 7 [16, 24].

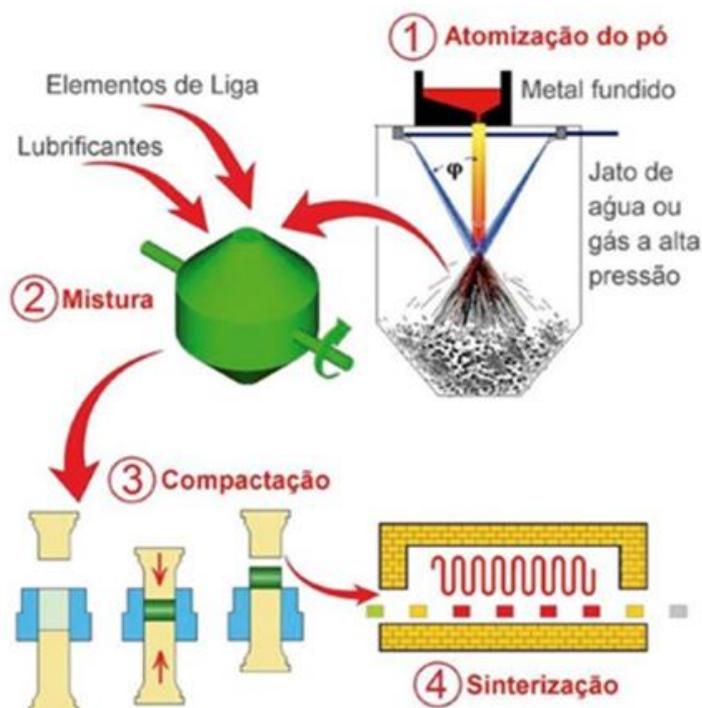


Figura 7 - Etapas do processo da metalurgia do pó [20].

Fonte: Industrial Heating

Exemplo de pó metálico utilizado na Metalurgia do Pó é o denominado ASC 100.29 produzido pela Höganäs AB, o qual é um pó de ferro atomizado com compressibilidade elevada que possibilita a obtenção de compactados com densidades de até $7,2 \text{ g/cm}^3$ com uma única compactação. ASC 100.29 é particularmente apropriado para peças estruturais de alta densidade e também como material base para aplicações magnéticas e por ser um aço estrutural é utilizado na indústria automotiva. A temperatura típica de sinterização desse pó varia de $1120\text{-}1250 \text{ }^\circ\text{C}$ e o tempo de sinterização de 30 a 60 minutos [25, 26].

A figura 8, mostra uma micrografia ilustrando a morfologia deste pó.

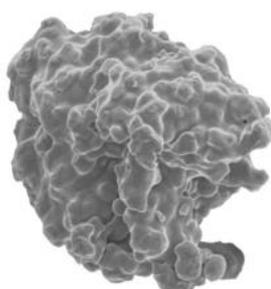


Figura 8 - Imagem ilustrativa da morfologia do pó de ferro ASC 100.29 [26, 27]

A tabela 3 apresenta as propriedades típicas do pó ASC 100.29.

Tabela 3 - Propriedades típicas do pó de ferro ASC100.29 [26, 27]

Análise Química	Carbono: < 0,01% Outros: 0,08%	
Densidade Aparente (pó solto)	2,98 g/cm ³	
Compressibilidade	Pressão de Compactação	
	400 MPa	6,77 g/cm ³
	600 MPa	7,20 g/cm ³
Resistência Verde	Pressão de Compactação	
	400 MPa	41 MPa
	600 MPa	
800 MPa		
Granulometria	>212 μm = 0% >150 μm = 8% < 45 μm = 23% < 150 μm e > 45 μm = 69%	

A figura 9 ilustra a microestrutura de um compactado produzido com esse pó, na qual se pode observar uma matriz ferrítica e a presença de óxido e/ou porosidades.

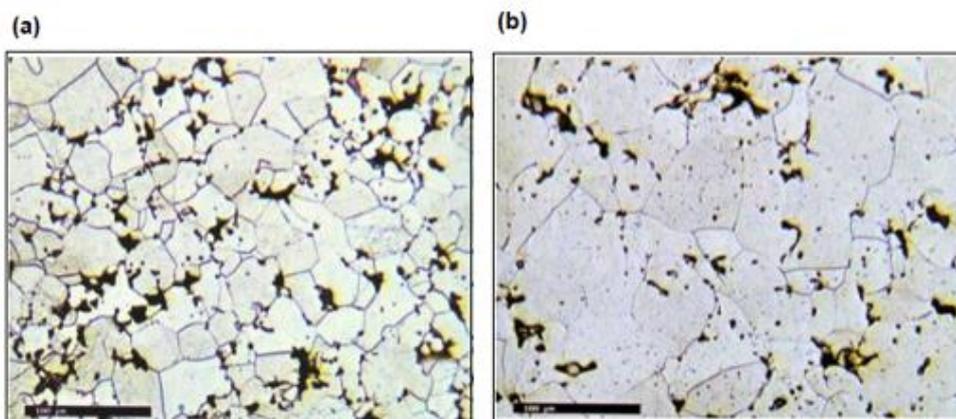


Figura 9 - Microestrutura de um compactado produzido com pó de ferro ASC 100.29. Ataque com Nital [26, 27]

2.3.4. Mistura e Compactação

Após a atomização, como mostra na figura 5, segue a operação de mistura em que consiste em obter uma homogeneização das diversas matérias primas que irão compor o material sinterizado, que inclui pós metálicos e lubrificantes. Na mistura se espera uma homogeneidade dos elementos químicos em sua composição ali especificada.

Na compactação, uma quantidade predeterminada de pó é colocada na cavidade (enchimento) de uma matriz montada em uma prensa, que pode ser mecânica ou hidráulica [17].

Na compactação de simples ação ocorre por deslocamento do punção superior ou na compactação de dupla ação onde há movimento de ambos os punções, geralmente em temperatura ambiente. Nos primeiros movimentos do punção, a compactação causa apenas o adensamento do pó, sem deformação das partículas e sem produzir adesão entre elas. Com o aumento da pressão, ocorre deformação plástica das partículas, formando uma espécie de “solda fria” [14, 28].

Nessa fase, o projeto da peça torna-se muito importante, porque pode acarretar a formação da zona neutra, que é uma região em que as partículas sofreram menos forças de compactação, que irá gerar uma peça final heterogênea, com zonas de propriedades distintas, por isso que certas formas de peça são inviáveis [14].

2.3.5. Compactação de simples e dupla ação

A compactação simples é a forma mais simples de compactar o material, sendo aplicada em casos que a peça possui uma altura muito baixa em relação à superfície. Na figura 10, o exemplo da compactação de simples ação [16].

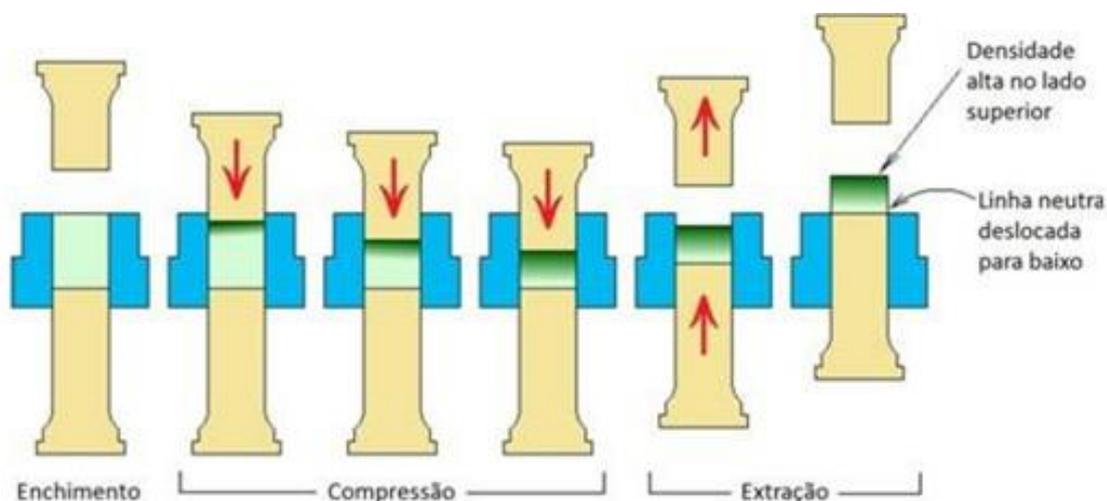


Figura 10 - Compactação de simples ação
Fonte: Grupo setorial da MP

Na compactação de dupla ação ambos os punções realizam o movimento de compressão. Tendo como efeito a centralização da linha neutra da peça. Isso pode ser visto na figura 11 [17].

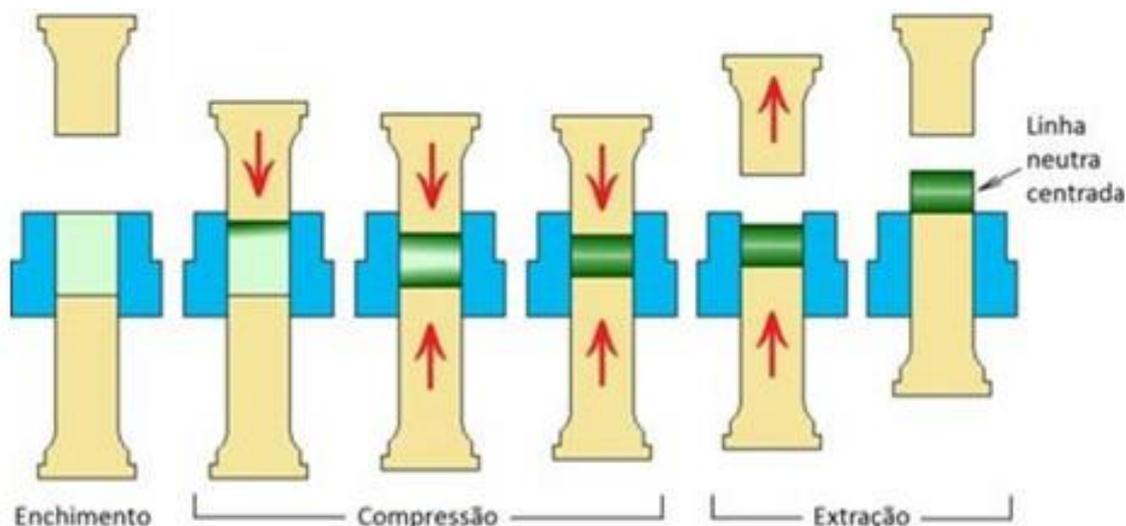


Figura 11 - Compactação de dupla ação
Fonte: Grupo setorial da MP

2.3.6. Sinterização

Do ponto de vista da metalurgia do pó, define-se sinterização como o processo onde o compactado verde é aquecido a altas temperaturas, mas abaixo da temperatura de fusão do metal base, e transforma-se em corpos sólidos [16].

Além da temperatura, também devem ser controlados: a velocidade de aquecimento e resfriamento, o tempo de permanência e a atmosfera. O tempo de aquecimento melhora o mecanismo de coesão do compactado para uma determinada temperatura. Em contrapartida, temperaturas próximas às de fusão do metal, geram obtenção da força coesiva máxima em um curto espaço de tempo, geralmente segundos [19].

Embora objeto de inúmeros experimentos científicos, não existe ainda uma teoria universalmente aceita para explicar o mecanismo de sinterização. No entanto, com o conhecimento atual pode-se distinguir seis estágios distintos e não necessariamente sequenciais que ocorrem durante a sinterização: soldagem inicial das partículas, crescimento de pescoço, diminuição da área superficial, arredondamento dos poros, fechamento dos canais que interligam os poros, contração dos poros, a densificação, coalescimento e crescimento dos poros [17].

No primeiro estágio, as ligações se desenvolvem principalmente pela ligação atômica entre grãos adjacentes, formando-se a região do "pescoço" sem nenhuma variação dimensional. Com a elevação de temperatura, aumentam as superfícies de ligação, observando-se o crescimento do pescoço. Apesar de haver transporte de material, não se observa ainda deformação na peça.

A próxima etapa se dá o início do processo de fechamento dos poros intercomunicantes e, simultaneamente, o arredondamento dos poros, provocando deformações que podem ser de contração ou expansão na peça. Este estágio é particularmente importante na fabricação de peças autolubrificantes e filtros, cuja estrutura deverá ter porosidade aberta e controlada [29].

Seguindo com o aumento da temperatura, observa-se a contração dos poros acompanhado pela diminuição do volume da peça e aumento das propriedades mecânicas. Finalmente, o último estágio da sinterização, ocorrerá um coalescimento e crescimento dos poros remanescentes, conforme mostra a figura 12 [29].

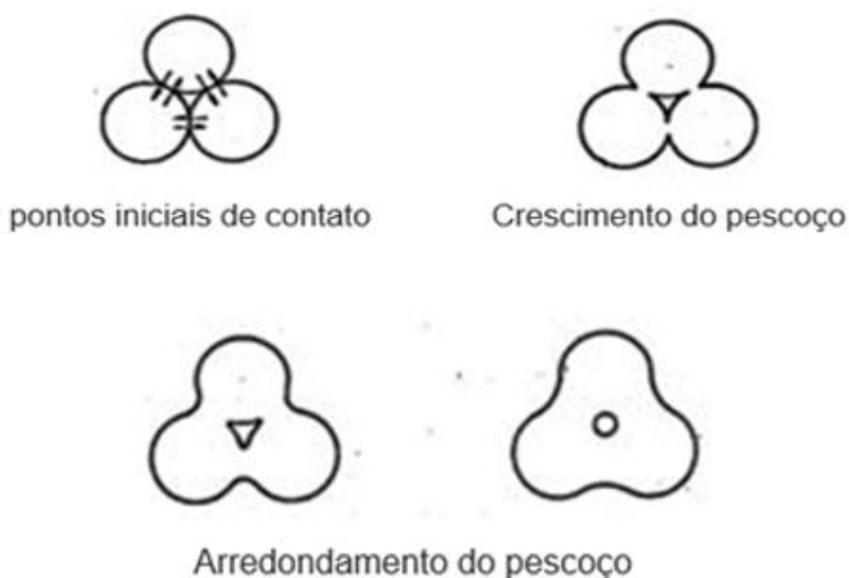


Figura 12 - Estágios do mecanismo de sinterização

Em resumo, a sinterização é um processo relativamente simples que, no entanto exige controle rigoroso das variáveis que podem influenciar a formação da liga metálica, sendo que a variável mais importante do processo de sinterização é o controle da temperatura, pois a ligação das partículas de pó metálico aumenta bastante com pequenos aumentos da temperatura de sinterização [30].

2.3.7. Aplicações gerais de produtos obtidos pela Metalurgia do pó

A variabilidade da metalurgia do pó está ligada a grande quantidade de materiais possíveis de se utilizar na fabricação de peças e componentes, com dimensões bastante próximas ao formato final desejado e com uma excelente estabilidade dimensional e forma geométrica [31, 32]. Praticamente todos os

segmentos industriais utilizam produtos sinterizados, tais como: automobilístico, eletrodomésticos, eletroeletrônico, “hardware”, mecânico e ferramentas, aeronáutico e aeroespacial, têxtil e agrícola, alimentício e farmacêutico, como pode ser visto na figura 13 [19].



Figura 13 - Tipos de produtos obtidos pela metalurgia do pó
Fonte: Grupo Setorial da Metalurgia do Pó

2.3.8. Dureza de corpos sinterizados

Realizar um ensaio de dureza em um produto oriundo da metalurgia do pó deve-se seguir a norma, pois os sinterizados são compostos de regiões sólidas e poros, os valores de macrodureza determinados pelos métodos convencionais Brinell, Rockwell ou Vickers são geralmente menores do que aqueles de materiais inteiramente sólidos, com a mesma composição e condição metalúrgica. De fato, o penetrador encontrará uma resistência muito menor no sinterizado e a presença

aleatória dos poros faz com que a diferença entre os valores mínimo e máximo da dureza seja muito maior do que aqueles obtidos no material inteiramente sólido [33].

A macrodureza em sinterizados é denominada dureza aparente. Muitas vezes os valores de dureza aparente podem ser diferentes em diversos pontos da peça sinterizada, sendo comum a indicação de "regiões de ensaio" particulares. Os valores de dureza aparente obtidos não devem ser associados à Resistência à Tração ou à Resistência ao Desgaste, em particular com a abrasão. Facilmente pode-se chegar a conclusões e valores errados, dado à presença da porosidade e caso a dureza medida seja afetada, por exemplo, pela ação da abrasão superficial na aplicação da carga de ensaio [33, 34].

Valores mais baixos da dureza aparente de sinterização não significam que as propriedades funcionais do material sinterizado sejam sempre afetadas negativamente. Os valores de dureza aparente de sinterizados nunca devem ser convertidos de uma escala para outra. A verdadeira dureza da estrutura do sinterizado, dureza da fase metálica presente, é comparável com a dureza do metal fundido de mesma composição e condição metalúrgica. Esta determinação somente pode ser efetuada pelo ensaio de microdureza, utilizando-se geralmente a escala Vickers, carga 100 gramas (HV 0,1), 200 gramas (HV 0,2) e 300 gramas (HV 0,3). Conforme recomendações normativas, a dureza isoladamente não deve ser motivo de aprovação, rejeição ou impedimento de lotes de peças sinterizadas [33, 34].

2.4. SINTERFORJAMENTO

A técnica de conformação mecânica através do forjamento de produtos sinterizados.

2.4.1. Processo de fabricação

Uma das mais recentes utilizações da Metalurgia do Pó está despertando grande interesse na indústria, principalmente no setor automobilístico, sobretudo na produção de peças de precisão. O forjamento de geratrizes sinterizados, desperta o interesse devido ao custo final baixo na produção de grandes lotes de produtos obtidos a partir dos pós metálicos, quando comparado a outros processos de produção [35].

Com estudos deste novo processo, como sinterforjamento a quente, a frio, sinterforjamento de materiais ferrosos e não ferrosos, geralmente geratrizes com

geometrias assimétricas e geratrizes com geometrias de discos ocos assimétricos [36].

A produção de um componente sinterforjado passa pela produção de uma pré-forma produzida por compactação e sinterização, para remoção do lubrificante, recozimento pleno das partículas encruadas e em seguida a operação de forjamento [37]. Característica importante, as porosidades em materiais sinterizados tendem a reduzir com a deformação plástica quando submetidas ao forjamento posteriormente [38].

Fatores determinantes também no processo de sinterforjamento, a densidade da geratriz, as condições de lubrificação na interface matriz e a geratriz e efeitos de velocidades [39].

Havendo também possibilidade de se obter produtos sinterforjados tratados termicamente, onde logo após a geratriz sendo sinterforjada se faz o tratamento térmico de têmpera, se observando melhorias nas propriedades mecânicas de dureza e resistência à tração [40].

De maneira resumida, a técnica de sinterforjamento consiste em compactar o pó em uma ferramenta de compactação, como resultado tem-se a geratriz, alcançando uma densidade relativa aproximada de até 75%, sinterizando esta geratriz em atmosfera inerte e rapidamente a transferência da peça para uma prensa onde esta fixada a ferramenta de forjamento, obtendo-se assim, a forma final do produto [37, 41].

O forjamento em matriz fechada minimiza a formação de rebarbas, comuns no forjamento convencional, reduzindo ou eliminando perdas de material nesta operação ou em operações posteriores de usinagem ou retífica [17, 42].

2.4.2. Propriedades mecânicas

Com análises do Metal Powder Industries Federation (MPIF) e o Grupo Setorial da Metalurgia do Pó, proporcionaram dados importantes, na tabela 4 pode-se ver o comparativo de um aço-carbono ABNT 1045, no estado sinterizado e após no estado sinterforjado [22, 43].

Tabela 4 - ABNT 1045 no estado sinterizado e no estado sinterforjado

Propriedades mecânicas	Símbolo	Unidade	Sinterizado	Sinterforjado
Densidade	ρ	[g/cm ³]	6,4 a 6,8	7,67
Tensão Máxima	σ_t	[MPa]	220	500
Limite de escoamento	k_f	[MPa]	160	340
Alongamento	δ	[%]	2,5	25

Fonte: infomet

O processo de sinterforjamento apresenta todas as vantagens inerentes ao processo convencional de metalurgia do pó com propriedades mecânicas comparáveis às obtidas pelo forjamento convencional [37].

2.4.3. Aplicações de Sinterforjados

A biela sinterizada e forjada, como mostra a figura 14, é o principal produto fabricado por esta técnica. Além das vantagens da metalurgia do material (praticamente livre de inclusões comuns no forjado convencional), o aproveitamento do processo de forjamento atinge mais de 85% do material inicial, levando em conta a usinagem posterior que o produto demanda, contra apenas 42% do forjado convencional [37].



Figura 14 - Biela sinterizada forjada acabada [33]

A biela, figura 14, fabricada com uma liga Fe-Cu-C, obteve uma economia entre 15 a 20%, obtida pela redução de refugos, de massa e etapas de usinagem. Mas o principal benefício técnico é a variação de peso entre peças durante a fabricação da biela sinterizada/forjada de ± 2 g contra 6 ± 15 g do forjado

convencional. Também a homogeneidade microestrutural é superior em função da qualidade da matéria prima, resultando em maior resistência à fadiga [33].

Na figura 15, pode-se ter uma ideia da comparação de resistência mecânica entre matérias primas e processos convencionais e em evidência os aços sinterizados com densidade de 7,3 a 7,86 g/cm³ [44, 45].

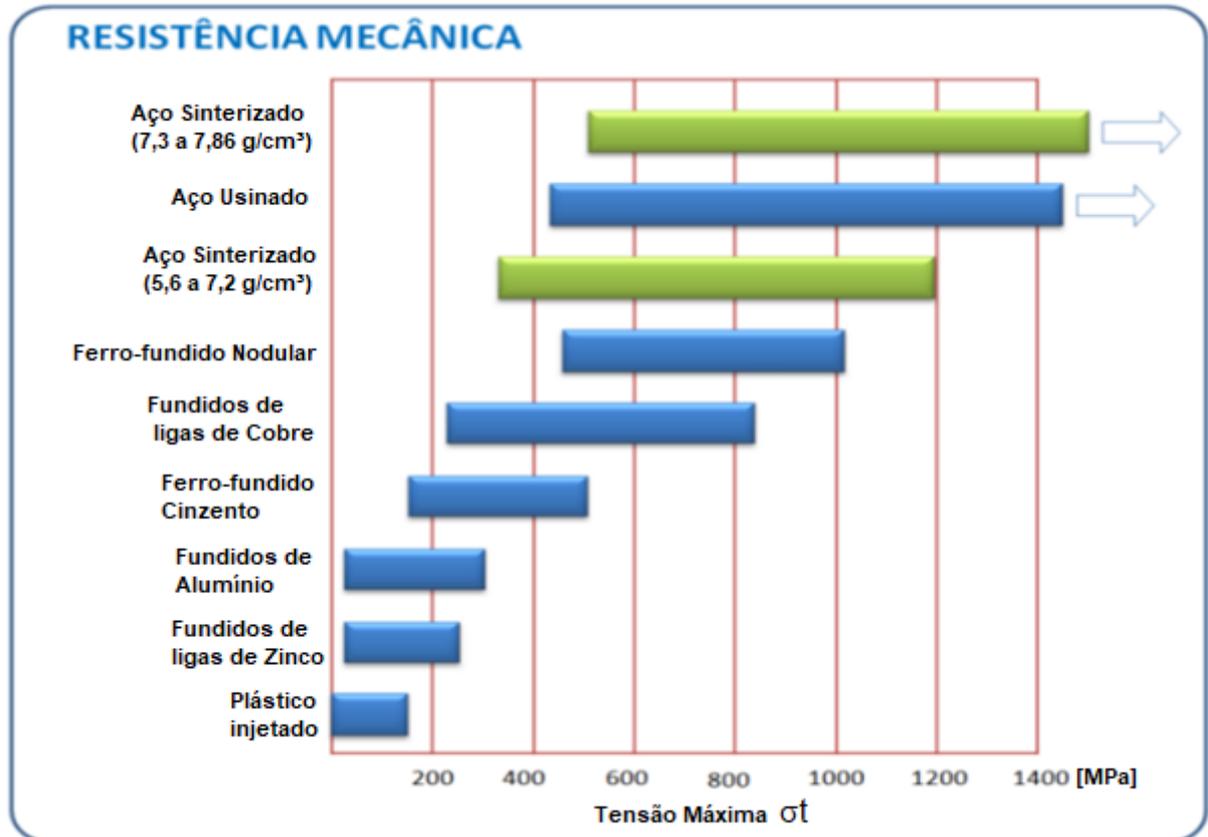


Figura 15 - Comparativo de resistência mecânica entre diversos materiais e processos [23]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho apresenta o processo de sinterforjamento na fabricação de uma cruzeta com características do aço ABNT 1045, utilizando-se como matéria-prima o pó de ferro puro com grafite, de nomenclatura ASC 100.29.

O fluxograma da figura 16 apresenta um resumo do procedimento experimental adotado para o desenvolvimento deste trabalho.

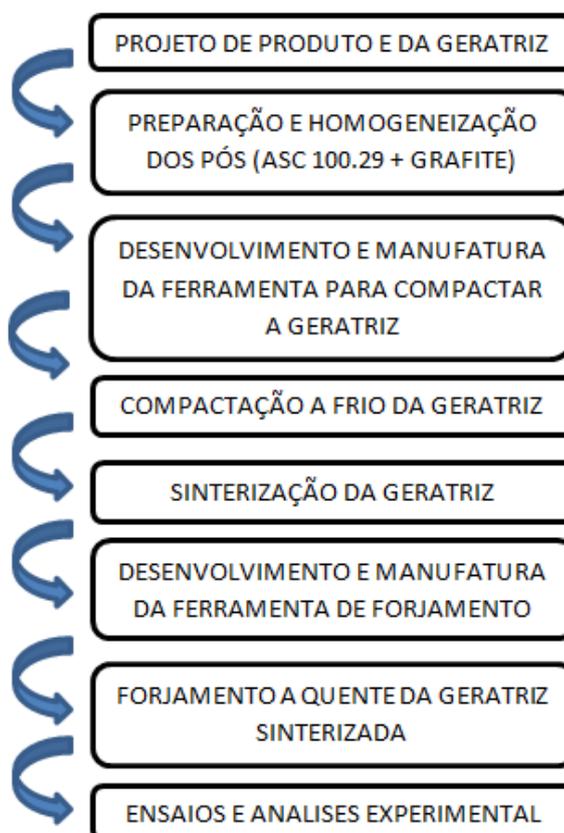


Figura 16 - Fluxograma do trabalho desenvolvido

3.1. PROJETO DE PRODUTO E GERATRIZ

3.1.1. Desenho do produto

Em projeto de ferramentas, moldes e matrizes, por exemplo, o nascimento de um novo produto se inicia a partir do projeto do produto definido. Este projeto foi realizado utilizando o *software* de CAD *SolidWork's*, onde se definiu os detalhes e dimensões de produto final, material da cruzeta a partir de pó metálico ASC 100,29.

As dimensões detalhadas e em perspectiva são mostradas na figura 17 [41].

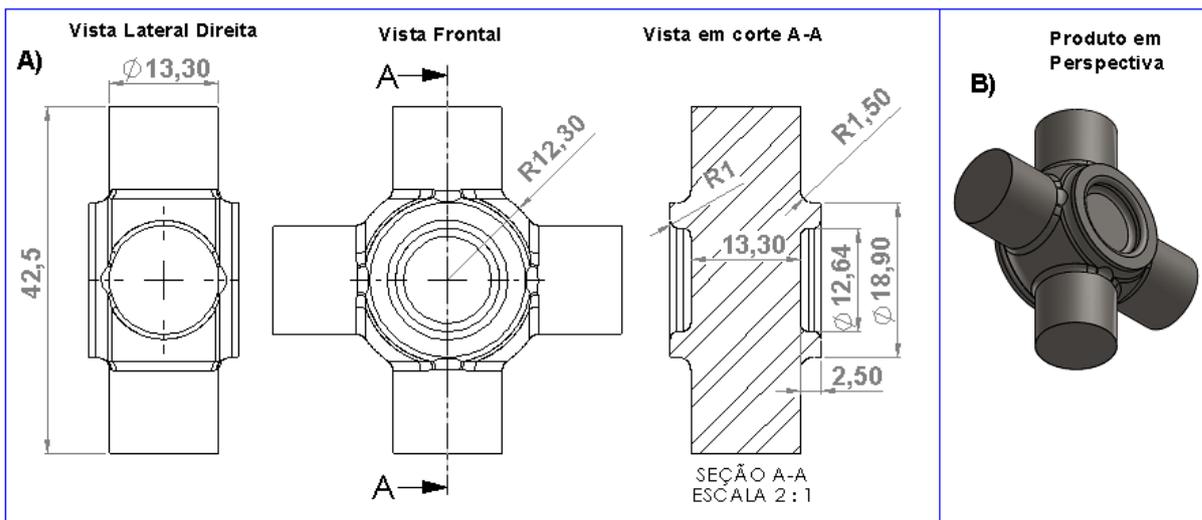


Figura 17 - Dimensões do projeto do produto (A) em perspectiva isométrica modelo do produto (B)

3.1.2. Desenho da geratriz

Definido o desenho do produto, se fez as análises de dimensões e massa para o modelamento da sua geratriz.

Para início de projeto, a geratriz manteve a mesma massa da cruzeta, utilizando-se dos recursos do software CAD *SolidWorks*, onde simulando mostrou que a geratriz partiria de uma espessura de 21,3 mm, esta medida auxiliou para o projeto da matriz de compactação que será abordado posteriormente, detalhes da geratriz mostrada na figura 18. A geometria externa da geratriz é ligeiramente menor do que as medidas do produto final, para seu alojamento posterior na cavidade da matriz de forjamento, porém tendo massa o suficiente para o preenchimento da cavidade, a figura 19 mostra a simulação da periferia da geratriz menor do que a do produto.

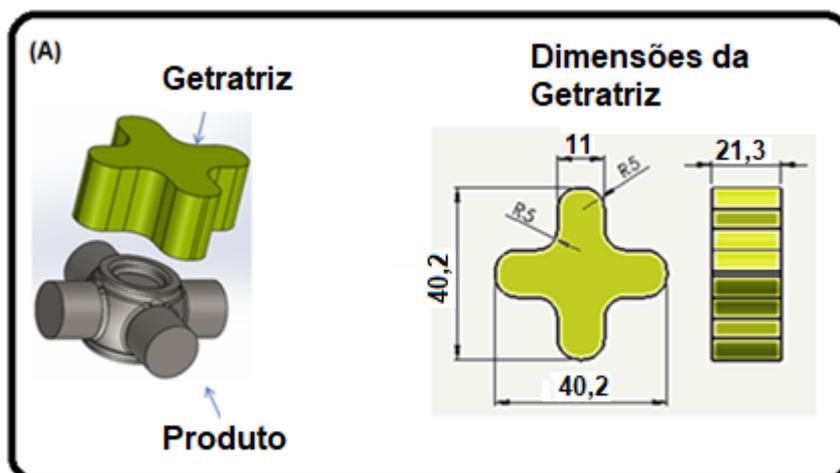


Figura 18 - Dimensionamento da geratriz com base na geometria da cruzeta

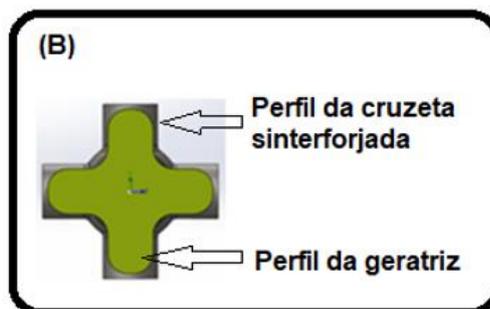


Figura 19 - Em vista superior visualiza-se o perfil da geratriz menor que o perfil da cruzeta

3.2. PREPARAÇÃO E HOMOGENEIZAÇÃO DOS PÓS (ASC 100,29 + GRAFITE)

Com o auxílio do *software* de CAD *SolidWork's* foi definido a massa para fabricar uma unidade do produto, aproximadamente 151,2 gramas, sendo definido para o estudo a fabricação de cinco unidades, cinco cruzetas sinterforjadas.

3.2.1. Preparação da mistura

Selecionado para mistura o pó de ferro ASC 100,29 e grafite Unicarbo 50-Fino, utilizou-se uma balança analítica, marca *Marte/explorer* e um Becker onde foi preparada a massa dos pós para garantir as proporções adequadas da liga, a fim de obter os resultados de sua massa com 756 g de pó, sendo 0,45% de grafite, que correspondem a 3,4 g e o restante 752,6 g, de pó de Ferro, a figura 20 mostra a pesagem.



Figura 20 - Balança e o copo de Becker

3.2.2. Homogeneização dos pós

Pesados os ingredientes da mistura, figura 19, os mesmos foram colocados em um misturador de pó com a capacidade de volume de aproximadamente 3500 g por aproximadamente 45 minutos com 24 rpm para realizar a homogeneização do pó, conforme mostra a figura 21.



Figura 21 - Misturador de cargas dos pós

Logo, para o total de 756 g do pó, utilizando-se da mesma balança da figura 20, preparou-se a quantidade para cinco porções de pós para compactar as geratrizes de mais ou menos 151,2 g da liga, sendo 0,45% de grafite e 99,55% ferro, acrescidos de 1,5% do lubrificante estearato de zinco, cerca de 2,3 gramas para cada amostra.

3.3. DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DA FERRAMENTA PARA COMPACTAR A GERATRIZ

O fluxograma da figura 22 apresenta um resumo do procedimento adotado para o desenvolvimento desta etapa do processo.

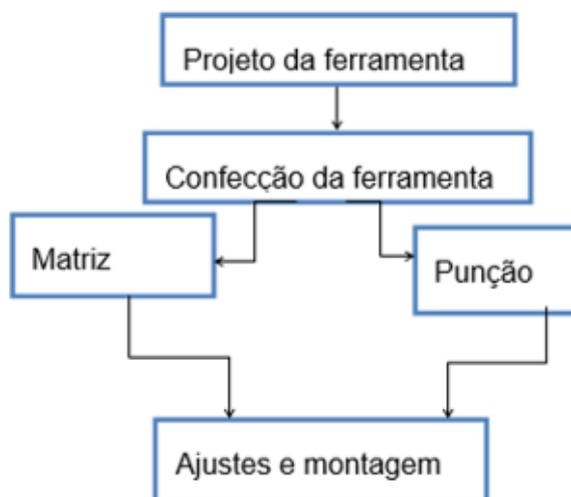


Figura 22 - Fluxograma do trabalho desenvolvido para ferramenta

Tendo o projeto de produto já definido, denominado como cruzeta, figura 17, a partir dele feito o desenho do perfil da geratriz, figura 18, sendo o compactado verde da geratriz, se fez o projeto da ferramenta definindo dimensões de cada item, especificações de materiais e tratamento térmico. A figura 23 mostra detalhes e especificações da ferramenta do tipo, compactação de simples ação.

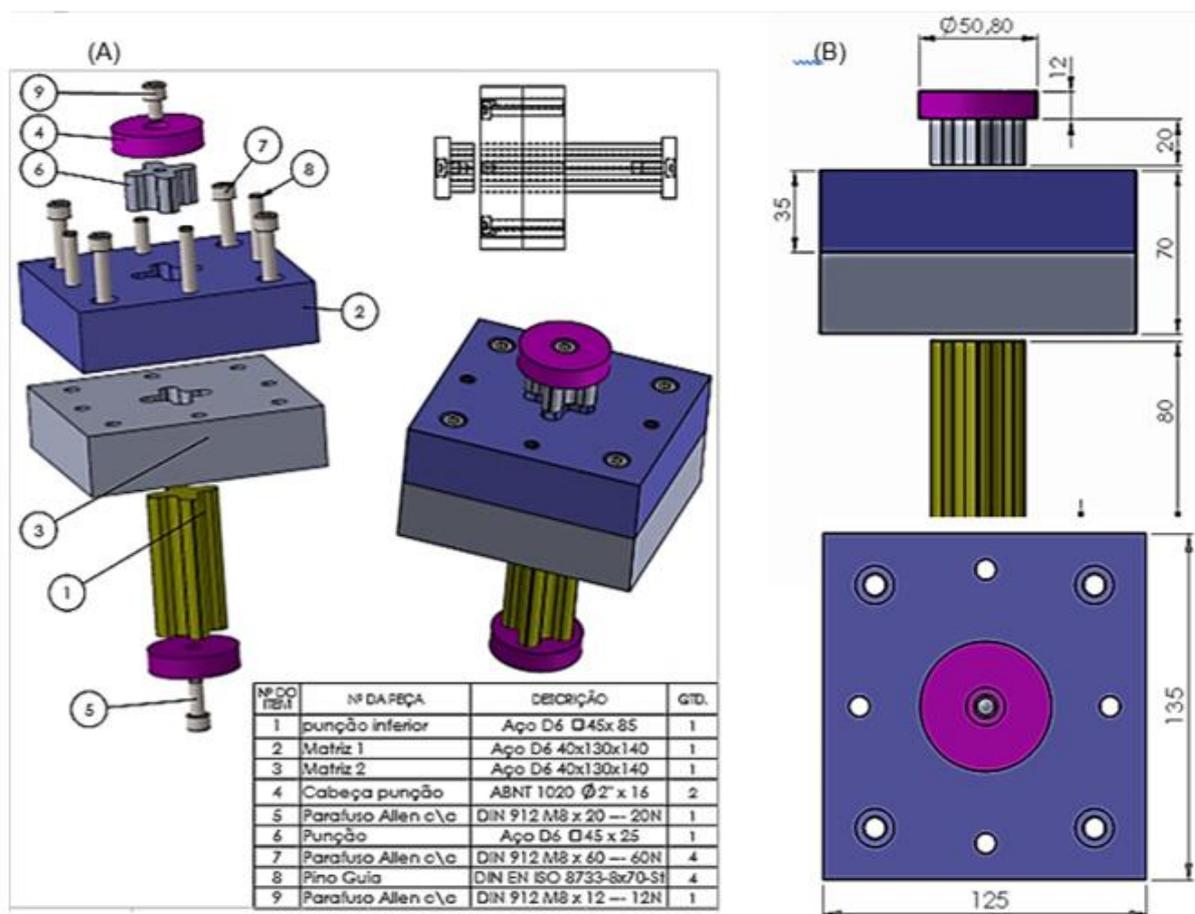


Figura 23 - Ferramenta de compactar em Perspectiva e vista explodida (A) e dimensões externas da ferramenta (B)

No projeto, se trata de uma ferramenta de compactação uniaxial, se fez análise de área útil de preenchimento do pó na cavidade, também como movimentos dos punções no curso de compactação e extração, exemplo na figura 24 [46, 47].

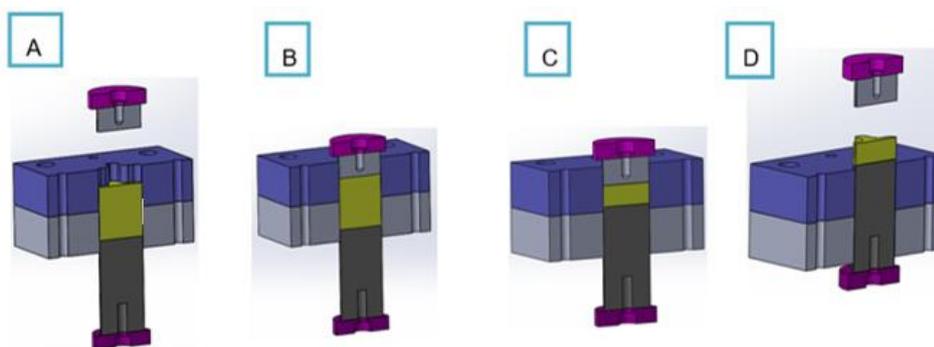


Figura 24 - Funcionamento da ferramenta de compactação, vista em corte: (A) pó metálico colocado na cavidade; (B) punção inferior e/ou superior inicia a prensagem; (C) o material é compactado e (D) material compactado é extraído da cavidade

3.3.1. Confeção da matriz

Após definido o projeto e detalhamento de cada item, se fez a seleção do material e a usinagem das placas, número do item 2 sendo a matriz 1 e número do item 3 sendo a matriz 2, conforme visto na legenda da figura 23 (A). A figura 25 (A), mostra o detalhamento da matriz 1.

Decidiu-se fazer 2 matrizes, sendo bipartidas, onde cada placa foi fresada independentemente, posteriormente retificadas as faces, furações de parafusos de fixação das placas e de pinos guia e principalmente um furo central feito antes do tratamento térmico, para o corte na máquina de eletroerosão a fio posteriormente.

A figura 25 (B), mostra (A) furo de pino guia; (B) furo central para passagem do fio na máquina de eletroerosão a fio; (C) alojamento, rebaixo para fixação de parafusos; (D) sendo a matriz 1; (E) sendo a matriz 2.

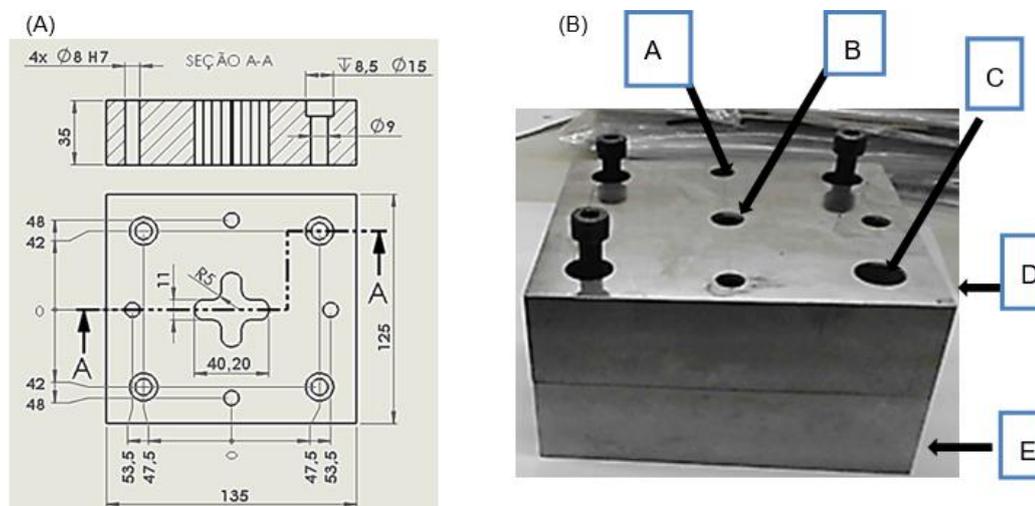


Figura 25 - Detalhamento da matriz (A) e foto da execução das matrizes (B)

Utilizou-se para confecção da ferramenta o aço D6 e realizado tratamento térmico de têmpera e revenimento, foi executado o corte da cavidade pré-forma da cruzeta.

Existem muitos processos possíveis na área da ferramentaria para este tipo de confecção. A figura 26 mostra etapas do processo realizado, nesta confecção utilizado a máquina Eletroerosão a fio, modelo Robocut α -OíE, a medição da dureza executado num durômetro modelo *Mitutoyo* HR-300, verificado a dureza de 55-56 HRC.

A medição da rugosidade da cavidade cortada na eletroerosão a fio, utilizado um rugosímetro modelo *Mitutoyo* SJ-210, analisado a rugosidade em 2,5 μ m.

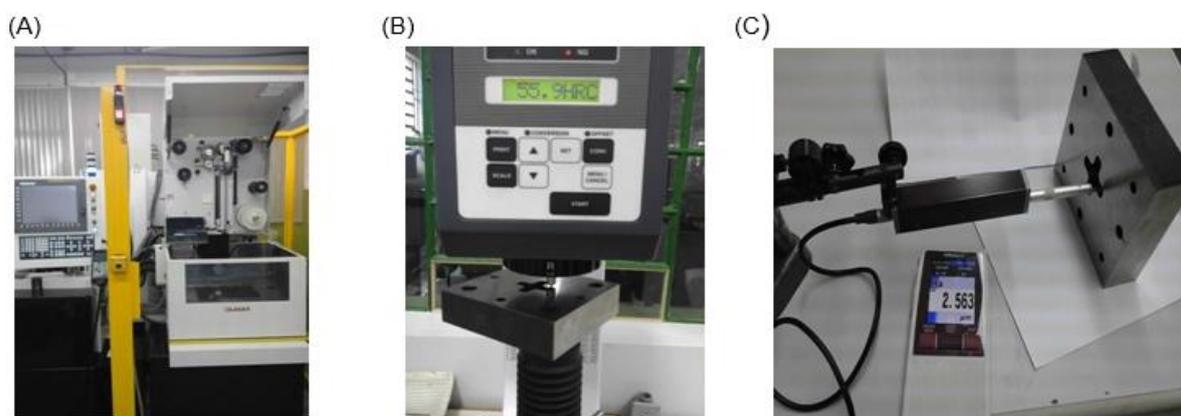


Figura 26 - Eletro erosão a fio (A); medição da dureza da matriz (B) e medição de rugosidade da superfície (C)

3.3.2. Confecção dos punções

Punções confeccionados em aço D6 e a cabeça dos punções em aço ABNT 1020. Na figura 27 mostra detalhes dimensionais do punção inferior e a figura 28 mostra os detalhes do punção superior.

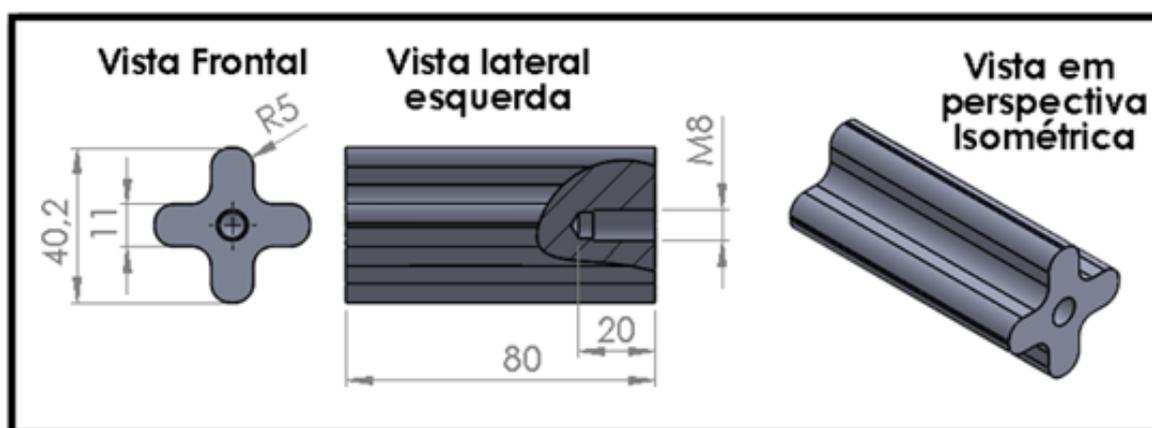


Figura 27 - Desenho do punção inferior

A figura 28 mostra detalhes dimensionais do punção superior.

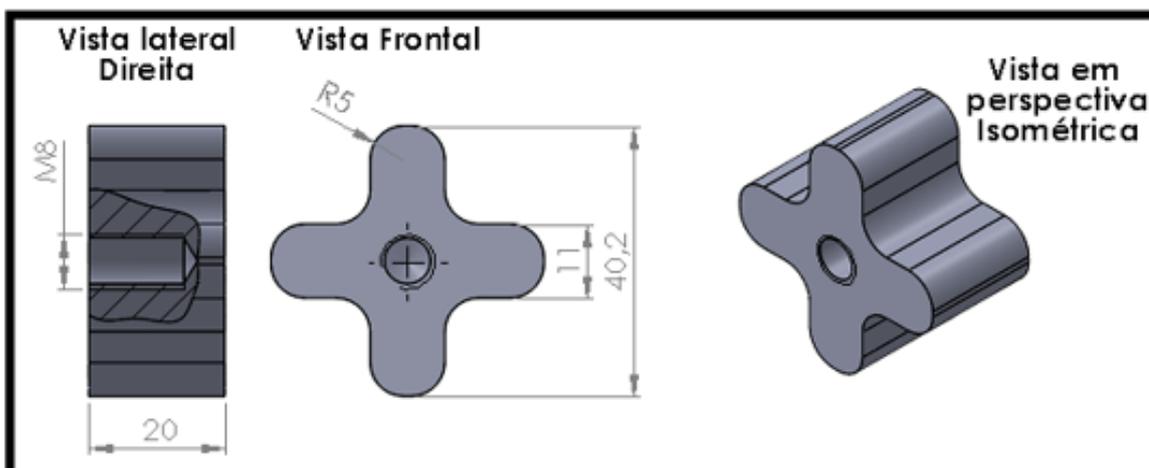


Figura 28 - Desenho do punção superior

No processo de fabricação dos punções, mostrado na figura 29, foi usinado o bloco, aço inteiriço com sobremetal, feito as roscas em seus topos para posteriormente parafusar a cabeça do punção, após o bloco foi temperado e revenido [44].

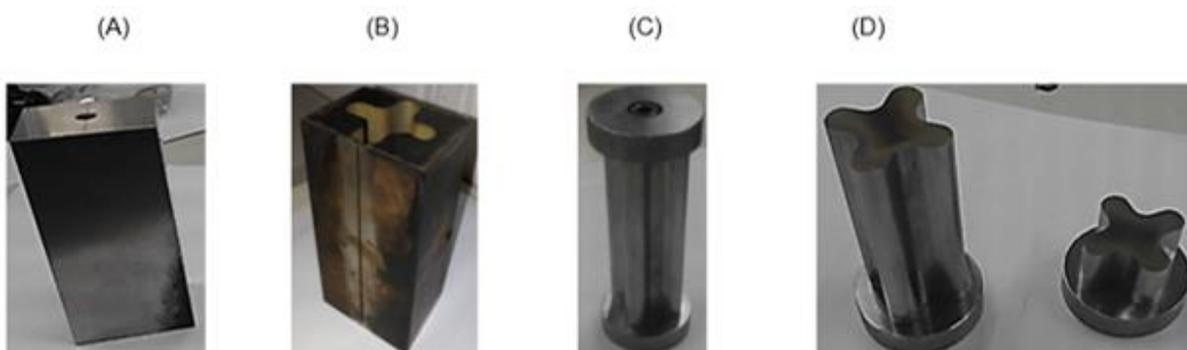


Figura 29 - Bloco temperado (A); corte na eletro a fio (B); punção dado acabamento (C) e punções separados (D)

Na máquina de Eletro Erosão a fio, foi cortado o perfil já nas dimensões, sendo dado somente acabamento e feito a montagem da cabeça, este material cortado retirado do bloco, foi cortado novamente na seção transversal, separando-os em dois, sendo os punções superior e inferior.

Logo, tendo confeccionado a matriz e os punções, foram feitos os testes e ajustes de montagem da ferramenta, conforme mostrado na figura 30 [46].

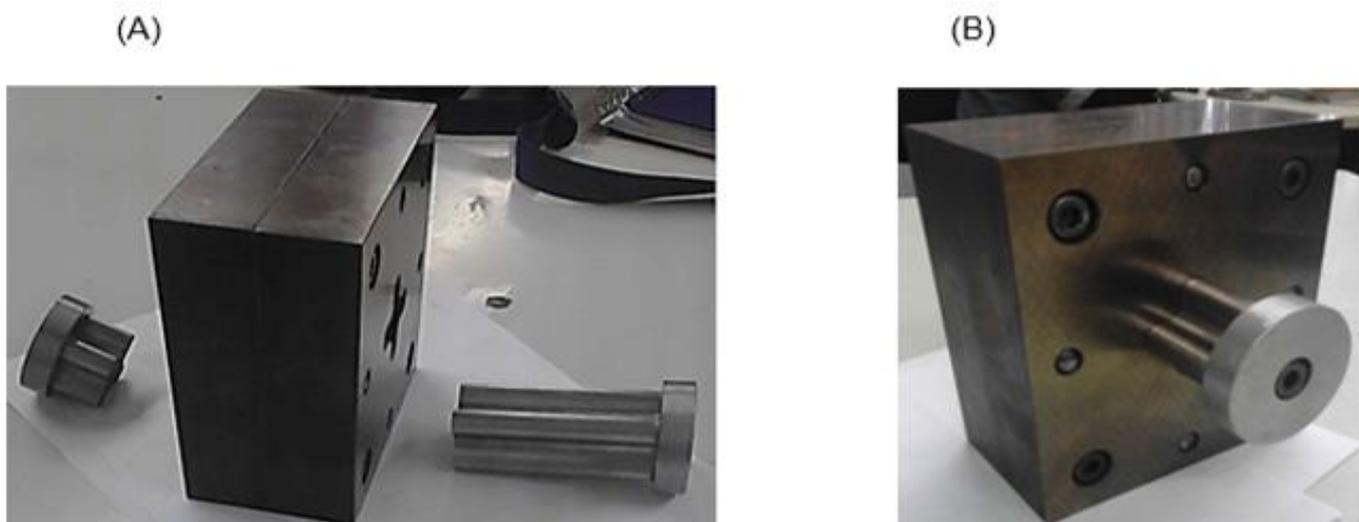


Figura 30 - Ferramenta confeccionada (A) e ferramenta ajustada e montada, matriz e punções (B)

3.4. COMPACTAÇÃO A FRIO DA GERATRIZ

Com os pós metálicos já preparados conforme processo já descrito e ferramenta de compactar pronta, foram compactados 5 geratrizes com mesma massa, tendo já a curva de compressibilidade, conforme revisão de literatura onde se determinou os parâmetros de pressão de compactação de 600 MPa para as geratrizes [41]. Portanto, utilizou-se uma prensa hidráulica da marca Eka – capacidade máxima 4000 kN – e a matriz de compactação, conforme mostra a figura 31.

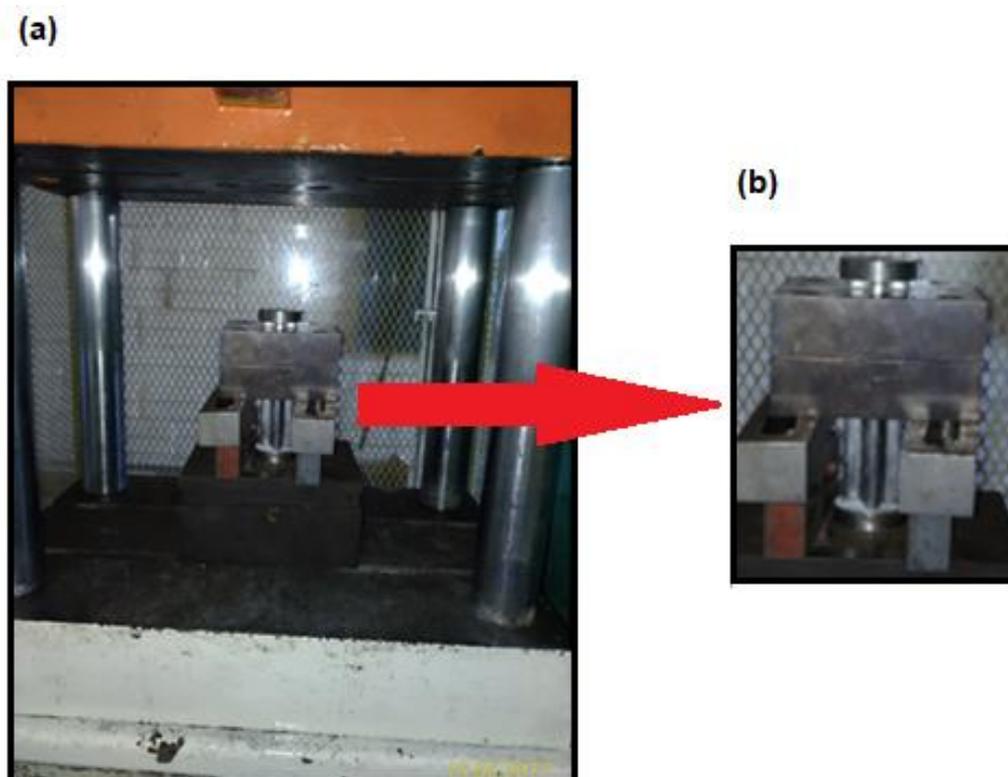


Figura 31 - Prensa hidráulica e matriz de compactar (a) detalhe da matriz de compactar ampliada (b)

3.5. SINTERIZAÇÃO DA GERATRIZ

A sinterização das geratrizes foi realizada em forno tubular vertical elétrico, do tipo mufla de resistência de carboneto de silício, com controle eletrônico, precisão de mais ou menos 1 °C, na temperatura de trabalho. O ciclo de sinterização proposto constituiu de aquecimento até 1150 °C, com uma taxa de 10 °C/min., mantendo constante durante 60 minutos com atmosfera controlada de mistura de gás com 25% de H₂ e 75% de N₂.

O resfriamento com uma taxa média de 9,7 °C/min. de 1150 °C até 900 °C, de 900°C até 600°C com uma taxa média de 7,8 °C e a partir de 600 °C até a temperatura ambiente com uma taxa média de 6 °C/min.

A figura 32 mostra uma curva convencional esquemática de sinterização traçada (A) e o forno utilizado para sua sinterização (B).

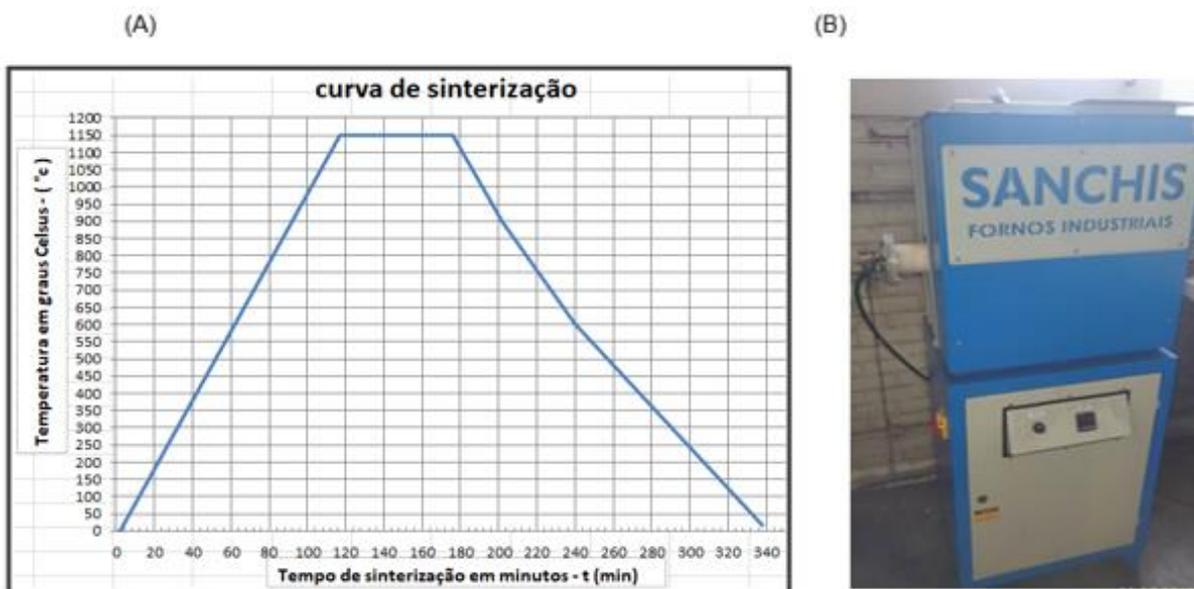


Figura 32 - Gráfico de sinterização convencional (A) e forno utilizado para sinterizar as geratrizes (B)

Após a sinterização foi realizado o ensaio de densidade, abordado no capítulo de ensaios realizados.

3.6. DESENVOLVIMENTO E MANUFATURA DA FERRAMENTA DE FORJAMENTO

Para desenvolver e confeccionar a matriz de forjamento da cruzeta foi utilizado o modelamento do produto para extrair a cavidade. Na figura 33 mostra o produto no bloco e depois separado com cavidade criada.

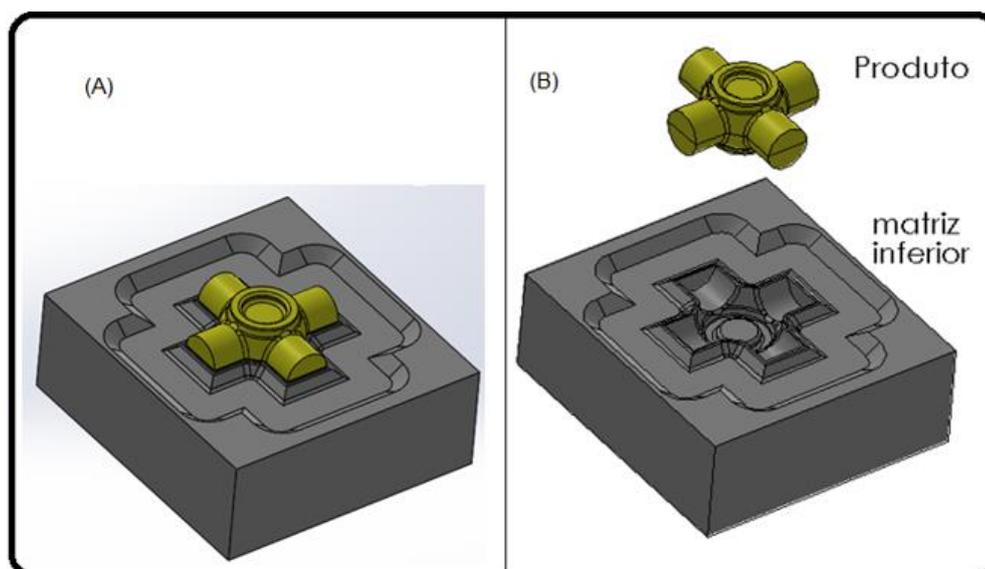


Figura 33 - Cruzeta, produto no bloco (A) e produto extraído do bloco com a cavidade pronta na matriz (B)

Na sequência foi feito uma análise a partir da pré-forma, a geratriz, e conformando-a logo após a sinterização da pré-forma como mostra a figura 34.

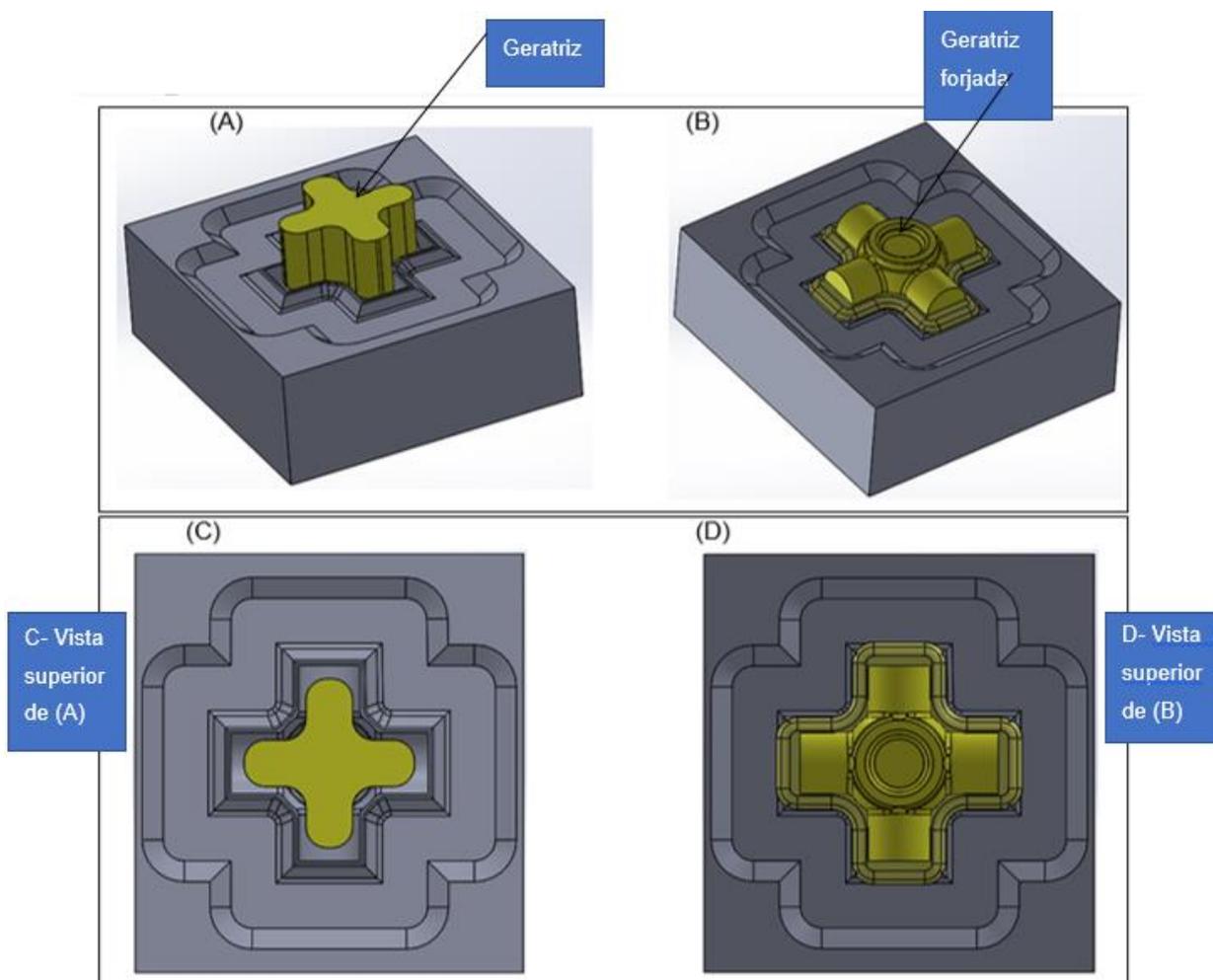


Figura 34 - Geratriz sinterizada (A); geratriz forjada (B) e suas vistas superiores respectivamente (C) e (D)

A ferramenta trabalhou da seguinte maneira, a geratriz sinterizada, aquecida a uma temperatura de 1150 °C, foi posicionada na cavidade, que também é pré-aquecida para não haver um choque térmico. A figura 35 mostra a geratriz centralizada na matriz.

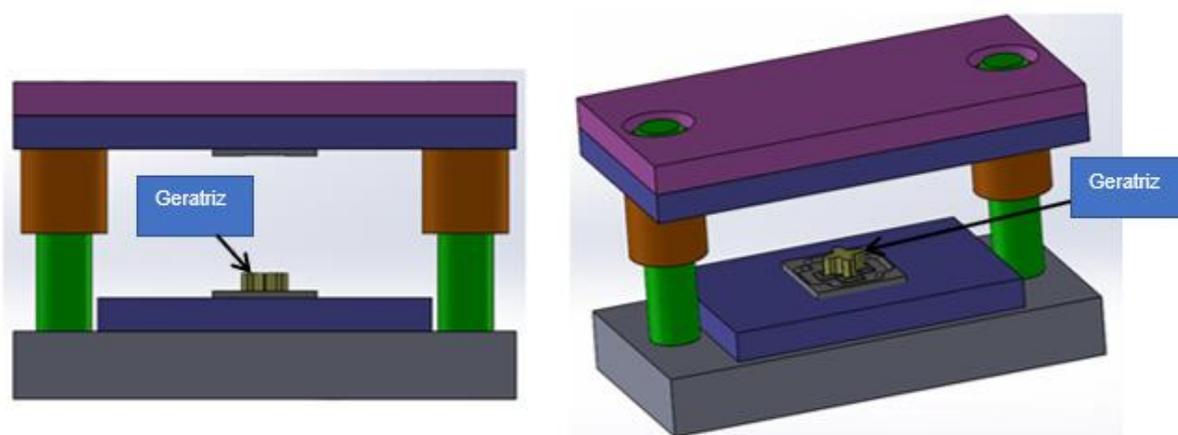


Figura 35 - Geratriz aquecida na cavidade da matriz para o forjamento

Na sequência, o conjunto superior é acionado, prensando a geratriz, conformando-o no perfil desejado, como mostrado na figura 36.

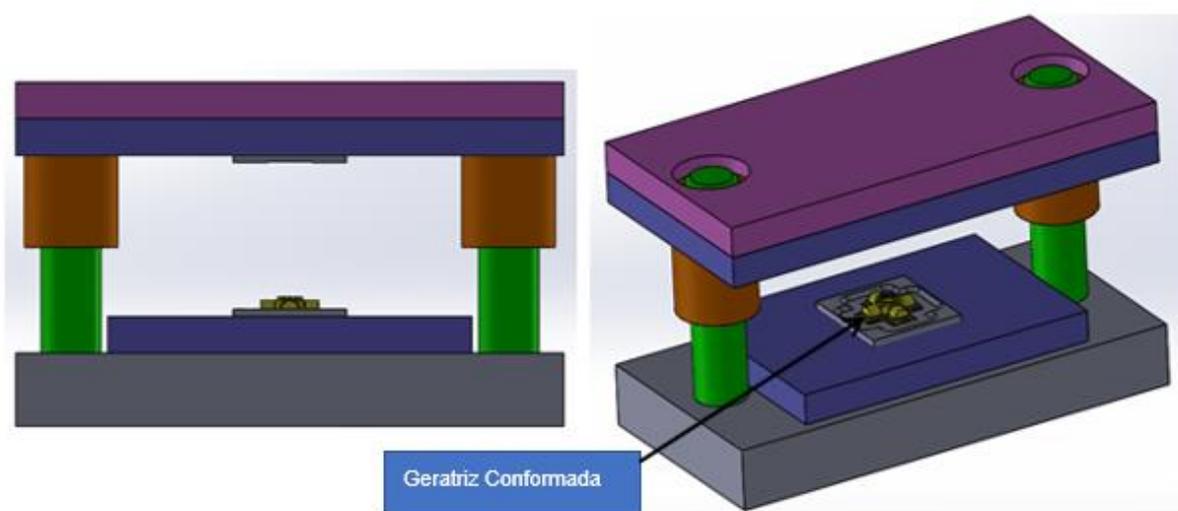


Figura 36 - Geratriz conformada no perfil da cavidade da matriz de forjamento

Para fixar as matrizes de forjamento, foi projetado um conjunto de bases, superior e inferior, ambas alinhadas em seu movimento pelas buchas e colunas guias, mostrado na figura 37.

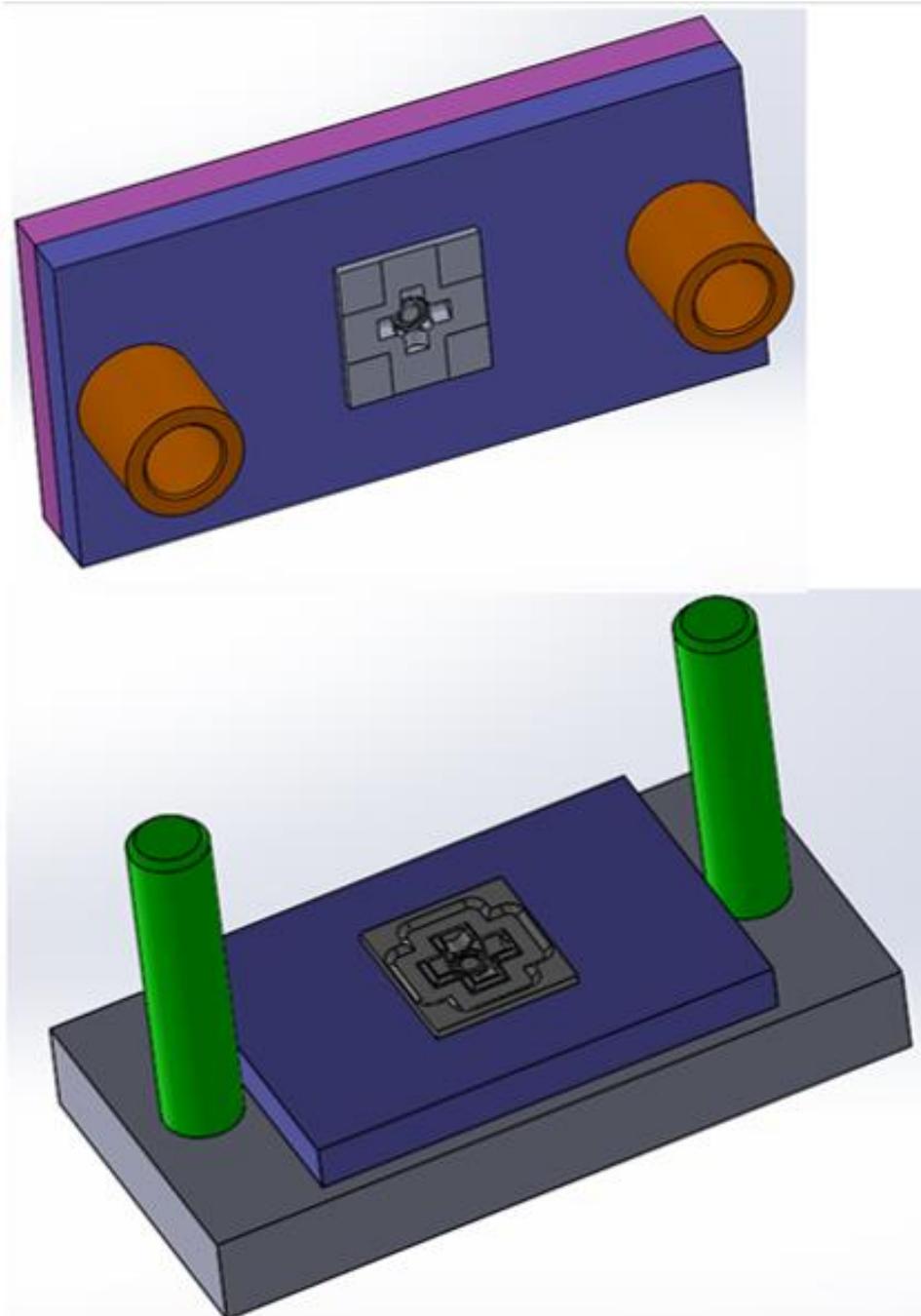


Figura 37 - Conjunto superior e inferior em perspectiva

Com a tecnologia de usinagens em máquinas que utilizam *software* de CAD/CAM, não é necessário cotar todos detalhes do desenho, pois o *software* de CAM, faz a programação da usinagem, evitando assim também que o desenho fique poluindo sua visualização, dificultando sua interpretação quando o desenho impresso. A figura 38 mostra o desenho da matriz superior de forjamento.

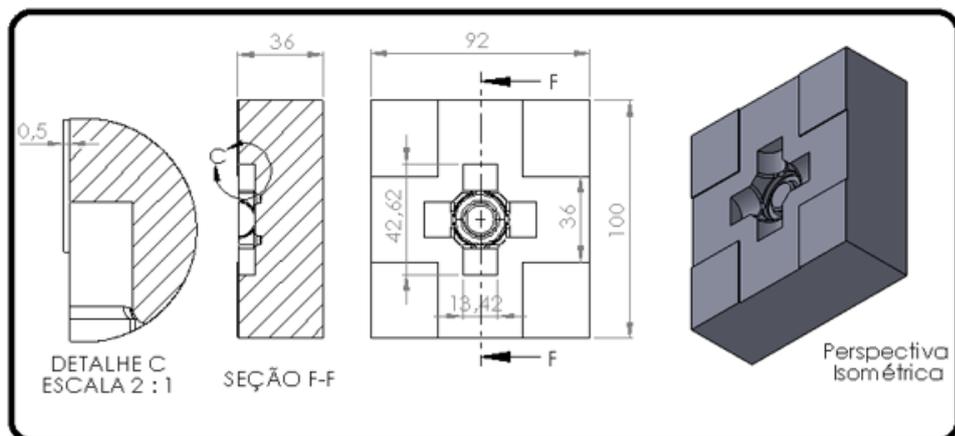


Figura 38 - Desenho da matriz superior de forjamento

Na figura 39 visualiza-se as dimensões da matriz inferior de forjamento.

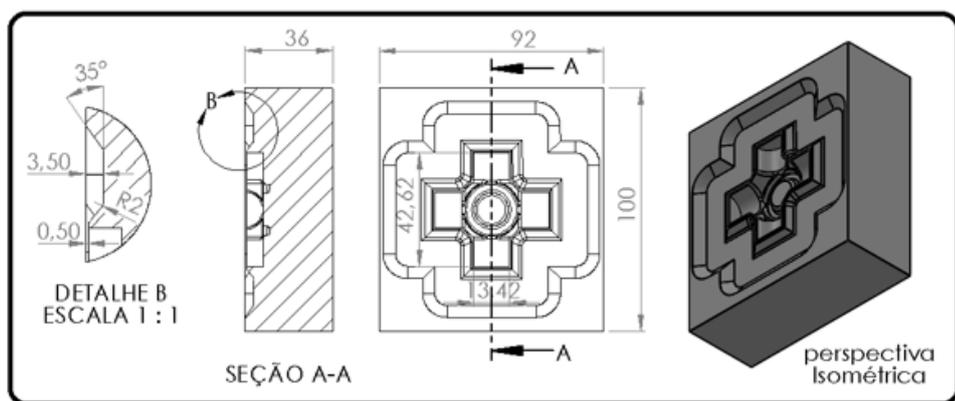


Figura 39 - Desenho da matriz inferior de forjamento

Este conjunto montado, denominado como ferramenta de forjamento, na figura 40 mostra suas dimensões externas.

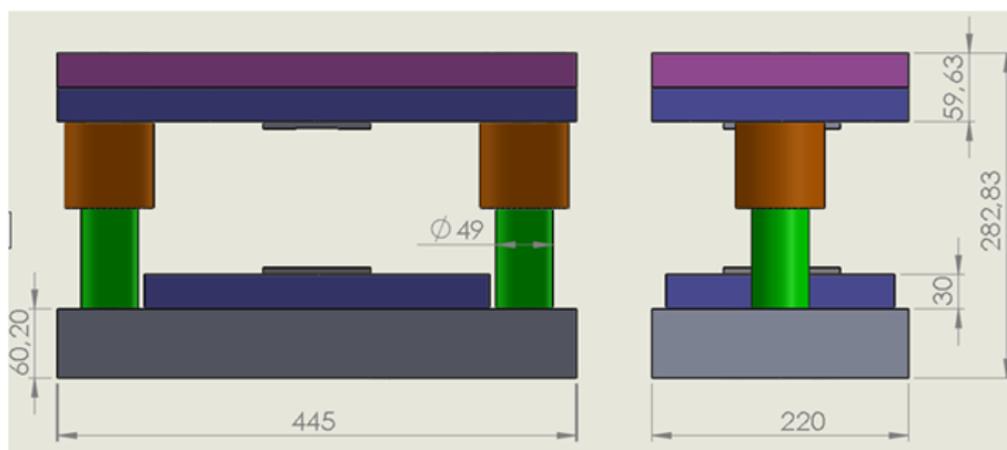


Figura 40 - Corpo da matriz de forjamento

A figura 41 denomina cada item em detalhes e suas especificações.

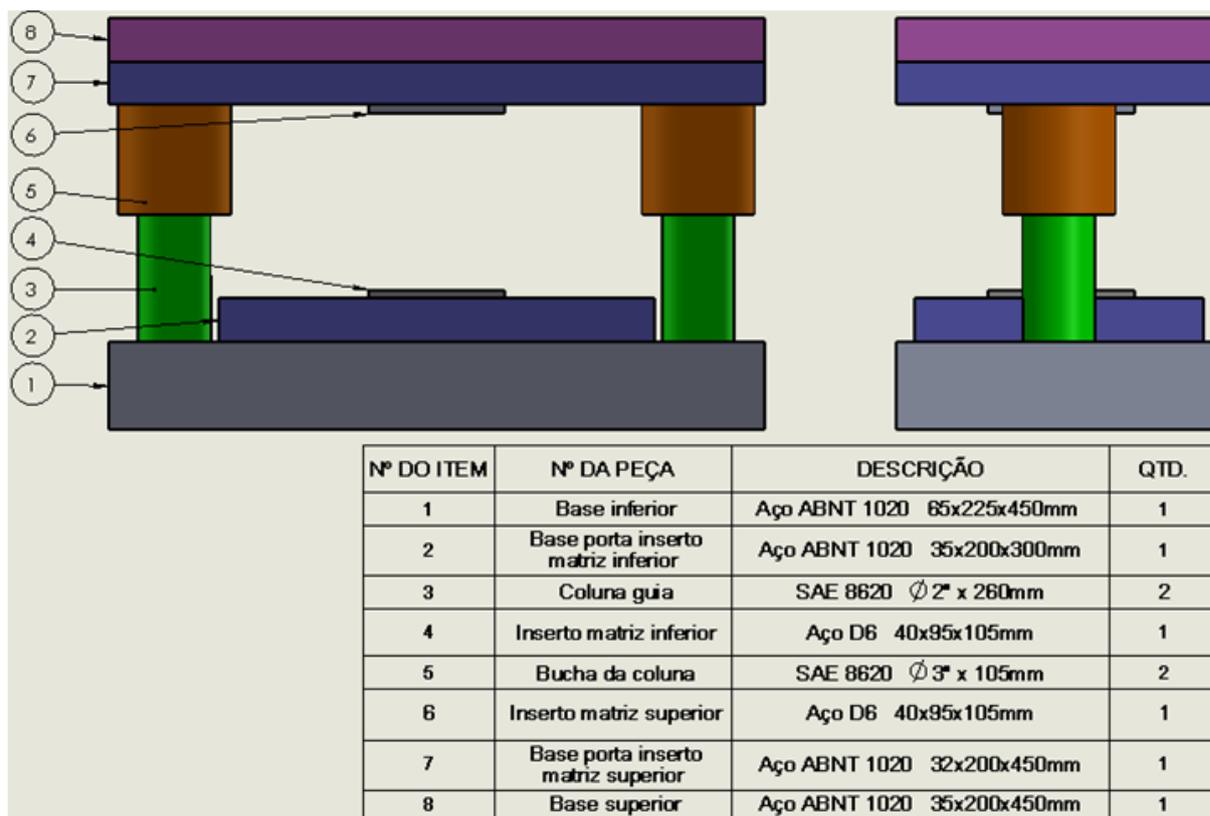


Figura 41 - Descrição de cada peça da ferramenta

Além das placas do conjunto superior e inferior, foram utilizadas duas peças em material D6 para fabricação das matrizes de forjamento, item número 4 e 6 da figura 41, os dois postigos foram inseridos nas bases do conjunto inferior e superior. Estes dois postigos, sendo os insertos da matriz inferior e superior, deram o formato final da cruzeta confeccionado em aço D6. Os postigos foram usinados em uma fresadora ferramenteira, feito um pré-desbaste da cavidade e retificados, deixando um sobremetal de 0,4 mm nas suas dimensões para posterior ajuste, como mostra a figura 42.

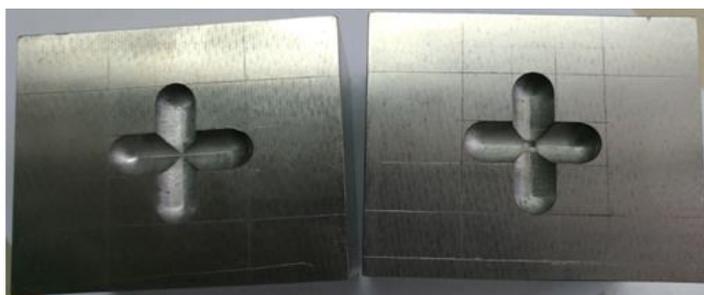


Figura 42 - Postigos pré-usinados e retificados

Utilizando o forno de têmpera da marca RUHSTRAT, os blocos foram temperados e revenidos, mostrado na figura 43(A) e a medição da dureza (B) executado num durômetro modelo *Mitutoyo* HR-300, verificado dureza de 54-56 HRC.

(A)



(B)



Figura 43 - Forno de tratamento térmico (A) e medição da dureza após têmpera e o revenimento(B)

O próximo passo foi fazer a usinagem das cavidades nos postigos em um centro de usinagem ROMI *Discovery 760*. Foi feita a programação e simulação via CAM, utilizando o *software cad-cam Edgecam*, como mostra a figura 44.

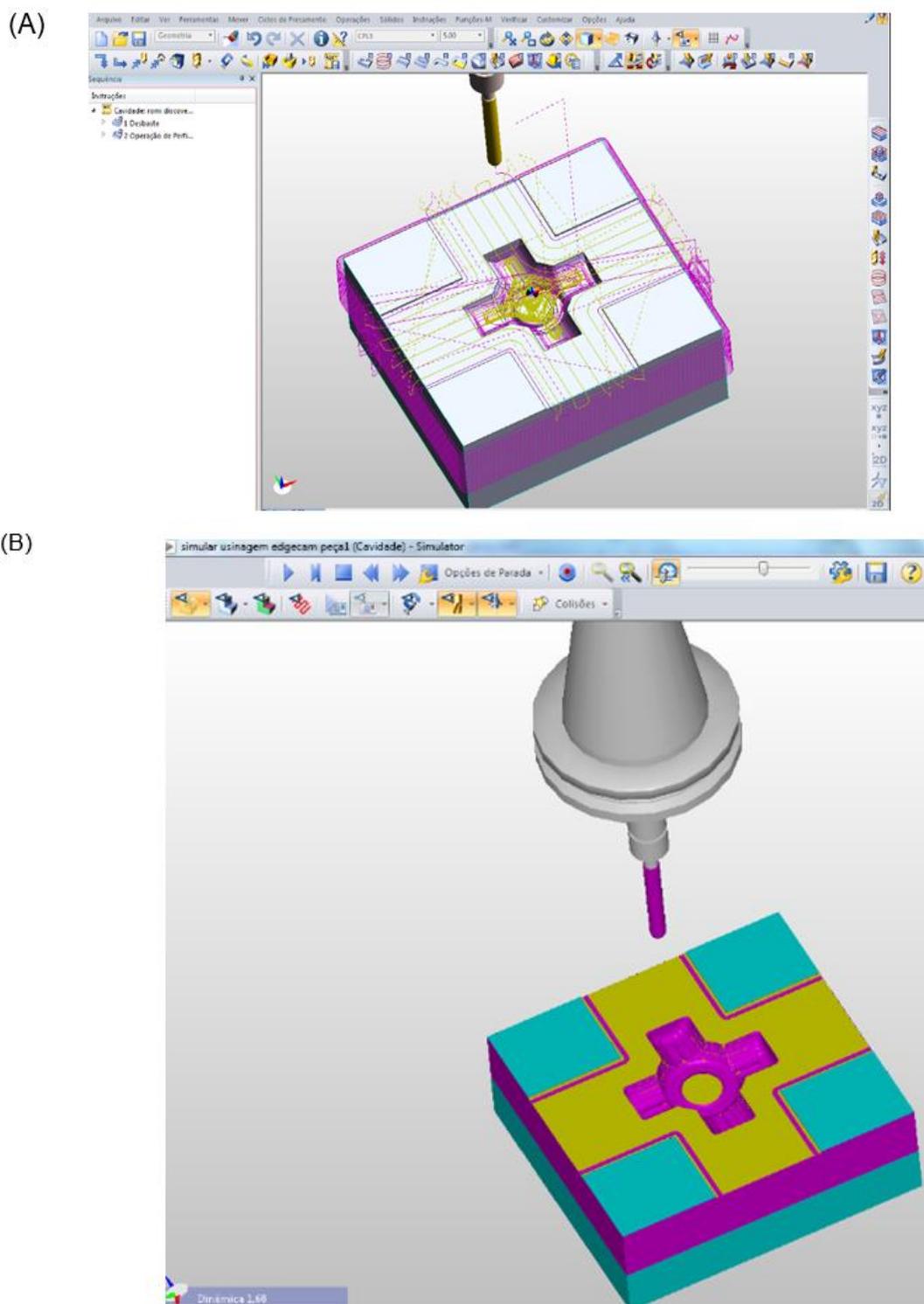


Figura 44 – Nas figuras (A) e (B), mostra simulações para programação de usinagem

Como não foi possível retirar da máquina CNC pronta, devido ao perfil da cavidade tendo geometrias complexas e cantos retos, e a fresa, ferramenta sendo cilíndrica, foi feito o uso da máquina eletroerosão a penetração, modelo SCHIESS NASSOVIA-FE 501, tendo já o eletrodo de cobre dimensionado, foi erodido as cavidades, figura 45.

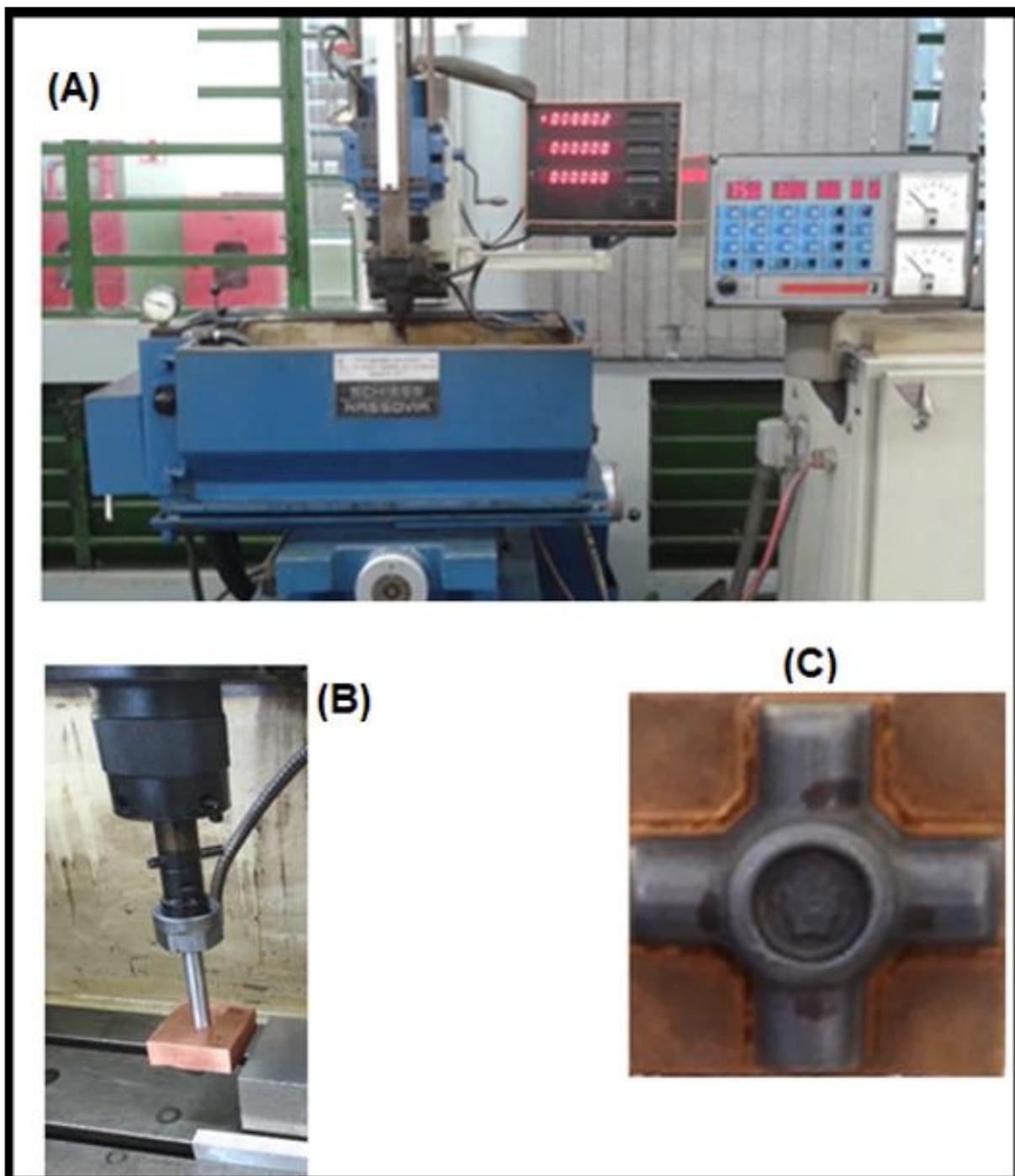


Figura 45 - Foto da eletroerosão (A) eletrodo de cobre sendo centralizado na peça (B); foto do eletrodo (C)

Destaca-se a confecção dos postigos, pois as matrizes são de extrema precisão para que forjando o sinterizado possa adquirir a forma e a dimensão do produto final, conforme projeto da cruzeta sinterforjada, como mostrado na figura 46 as cavidades confeccionadas na eletroerosão por penetração.

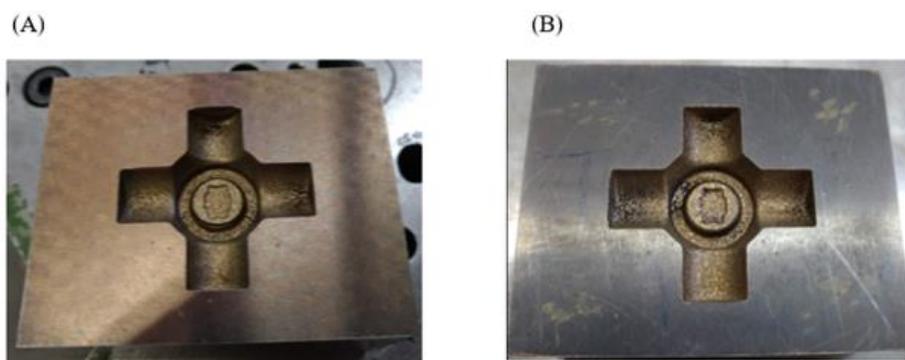


Figura 46 - Inserto matriz superior (A) e inserto matriz inferior (B)

Na sequência da confecção, as usinagens das placas do conjunto superior e inferior foram usinadas em uma fresadora ferramenteira modelo (kone KFE-3) e suas faces retificadas em uma retífica plana modelo (MELLO P58), colunas e buchas, foram usinadas em um torno mecânico convencional modelo (CLARK CDE 6266), também foi feito o corte nas placa para impostiçar os insertos, matriz superior e inferior na máquina de eletroerosão a fio modelo Robocut α -OíE, como mostra a figura 47.

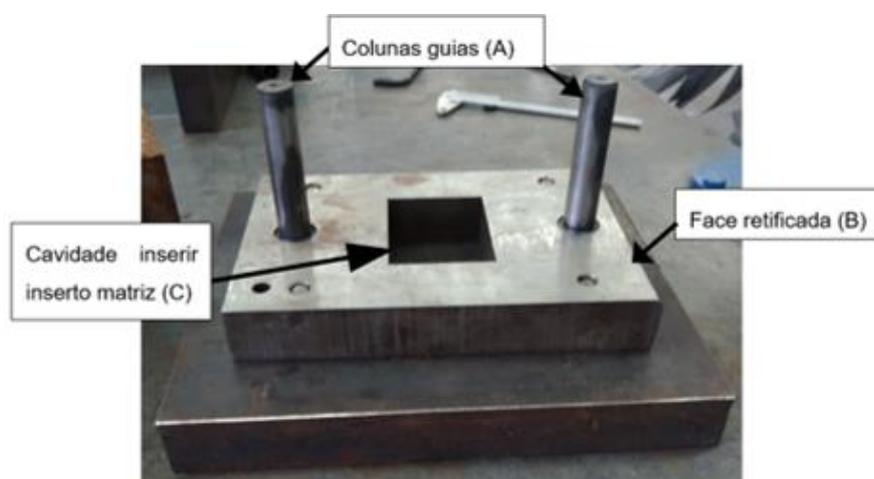


Figura 47 - Colunas torneadas (A); face retificada (B) e corte feito na eletroerosão a fio (C)

As furações para colunas e buchas e o corte para impostiçar os insertos foram feitas com as bases unidas para manter o mesmo alinhamento, como mostra a figura 48.



Figura 48 - Bases superior e inferior furadas na fresadora, cortadas na eletroerosão a fio unidas

A figura 49 mostra as matrizes insertadas com interferência de ajuste H7j6, colunas e buchas montadas nas placas do conjunto inferior e superior, as buchas e colunas com ajuste deslizante, norma ISO (H7g6), estando assim a ferramenta de forjamento pronta.

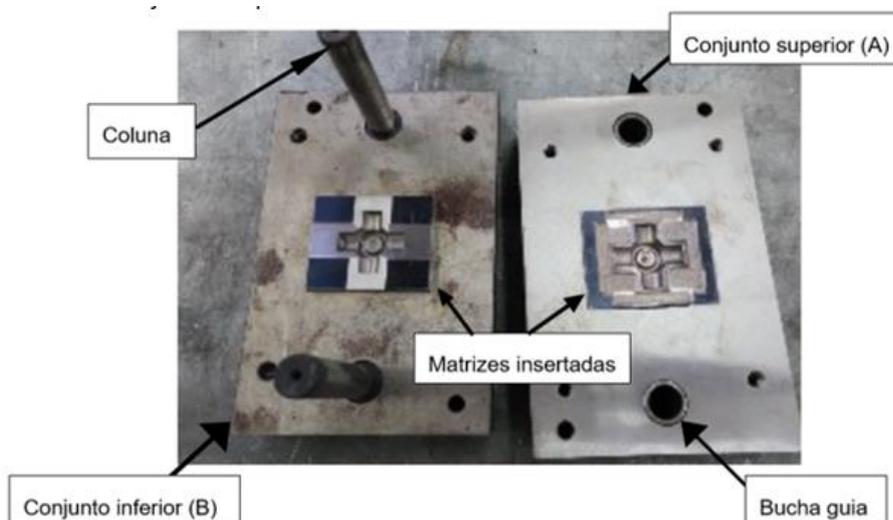


Figura 49 - Conjunto superior (A); conjunto inferior (B), as colunas, buchas e matrizes insertadas

3.7. FORJAMENTO A QUENTE DA GERATRIZ SINTERIZADA

Para realizar o forjamento da geratriz sinterizada ou o sinterforjamento, tendo o mesmo significado para este processo para obter a cruzeta de aço ABNT 1045, foi utilizado um forno específico da marca SANCHIS, aquecido com temperatura de 1150 °C, a fim de aquecer as geratrizes e também a prensa hidráulica da marca FKL

com capacidade de força de 6000 kN, a sua prensagem com velocidade de 3,4 mm/s, ilustrada na figura 50.

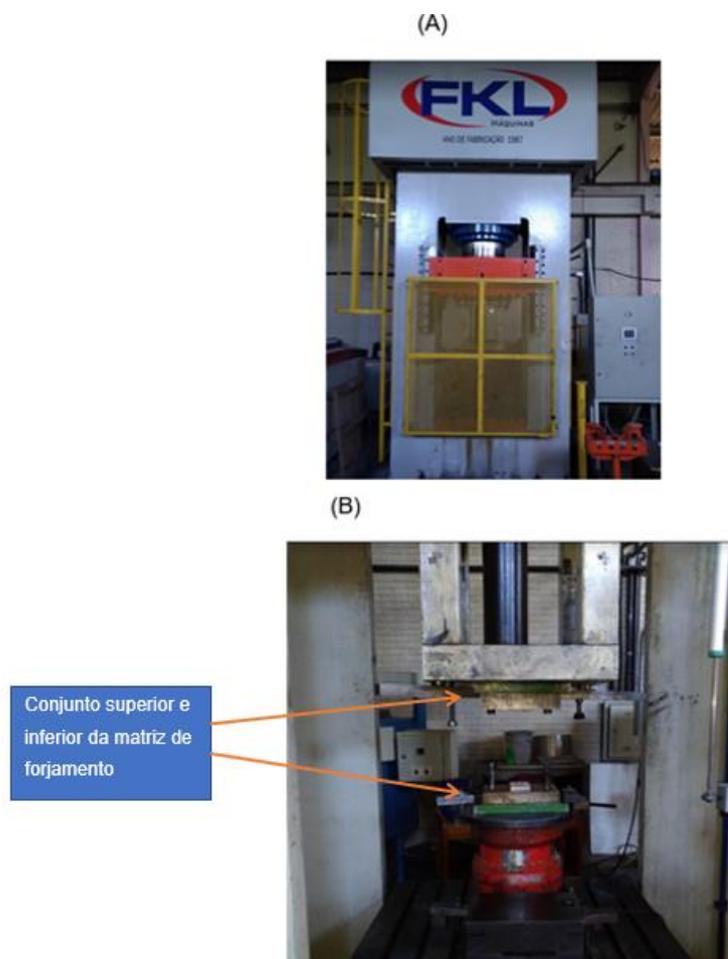


Figura 50 - Prensa hidráulica FKL (A) e ferramenta de forjamento fixada na prensa (B)

A prensa foi regulada seu curso de abertura e o limite máximo de fechamento quando entrar em contato o lado superior com a inferior da matriz de forjamento, utilizado uma força de 4000 kN. Com as geratrizes no forno, elevando a temperatura de 1150 °C, colocou-se também um tarugo de aço de baixo carbono no forno, para o mesmo ser utilizado primeiramente de modo somente para ficar em contato com as matrizes para préaquecimento das mesmas por condução, não havendo assim um choque térmico na prensagem. Após a estabilização da temperatura e com uso de uma pinça tenaz e demais E.P.I., retirou-se a primeira geratriz, com uma tenaz e a colocou dentro da matriz, centralizado-a de forma manual na cavidade.

A prensa é acionada através de botões bi manuais, que servem para garantir e/ou evitar que o operador possa colocar uma das mãos enquanto a máquina é

fechada. Após o fechamento do molde e deformação total do material dentro da cavidade, a máquina é aberta e retirada a peça de dentro da matriz

Repetiu-se este processo para as demais geratrizes confeccionadas para o forjamento da cruzeta.

3.8. ENSAIOS REALIZADOS

3.8.1. Ensaio de densidade da cruzeta

O ensaio para mensurar a densidade auxilia para definir qual percentual de deformação adequada para eliminar ou diminuir ao máximo a porosidade existente no interior da geratriz. No ensaio se definiu qual foi à média das densidades das peças logo após sinterizadas e depois de forjadas. Pela determinação da massa e do volume dá-se a densidade e estas foram feitas através do método de Arquimedes, onde as amostras foram submergidas em um recipiente com água posicionado sobre uma balança, correlacionando o volume de água.

Assim as peças sinterizadas e forjadas foram calculadas em relação ao volume medido e a massa das peças.

3.8.2. Análise metalográfica da peça sinterforjada

Para análise metalográfica do sinterforjado, o corpo de prova passou pelo processo de embutimento, logo passou pelos processos de lixamento e de polimento metalográfico: iniciou se o processo mecanicamente, utilizando lixas de grão 120 a 600, já havendo uma melhora em sua planicidade e acabamento, a amostra foi levada para a politriz metalográfica.

No corpo de prova já preparado foi avaliada a porosidade longitudinal sem ataque químico, e avaliação da ferrita e perlita com ataque químico de nital (2% ácido nítrico e 98% de álcool etílico P.A.). Estas características foram observadas em um microscópio ótico Olympus CK 40M.

3.8.3. Dureza da peça sinterforjada

Foram seccionadas as cinco cruzetas para avaliação de sua dureza. A dureza foi mensurada em cinco pontos com o microdurômetro Mitutoyo – *Hardness Testing Machine*, tendo como padrão de dureza a escala Vickers (HV), obtendo assim a dureza aparente da superfície. Para estes ensaios, foi aplicada uma carga de 300 gf

com penetrador de diamante.

A medida de microdureza na escala Vickers, segundo a norma ASTM E 384 – *Standard Test Method for Microhardness of Materials*, define o ensaio de microdureza, o qual foi realizado no microdurômetro.

3.8.4. Compressão da peça sinterforjada

No presente estudo utilizou-se o ensaio de compressão a frio para determinar a curva de escoamento “ $k_f \times \varphi$ ” do aço ABNT 1045 no estado sinterforjado. A prensa hidráulica da marca Eka – capacidade máxima 400 kN, com sua velocidade “ v ” de 3,7 mm/s, adaptada com equipamentos de medição, foram utilizados, um LVDT (sensor de deslocamento), uma célula de carga de 80 kN acoplada à prensa e ligada ao Spider 8.0 com o *software* Catman 4.0, utilizando um *notebook* para coletar a força necessária na deformação do CP e relatarem os valores da tensão e deformação para criação do gráfico, como mostra figura 51.

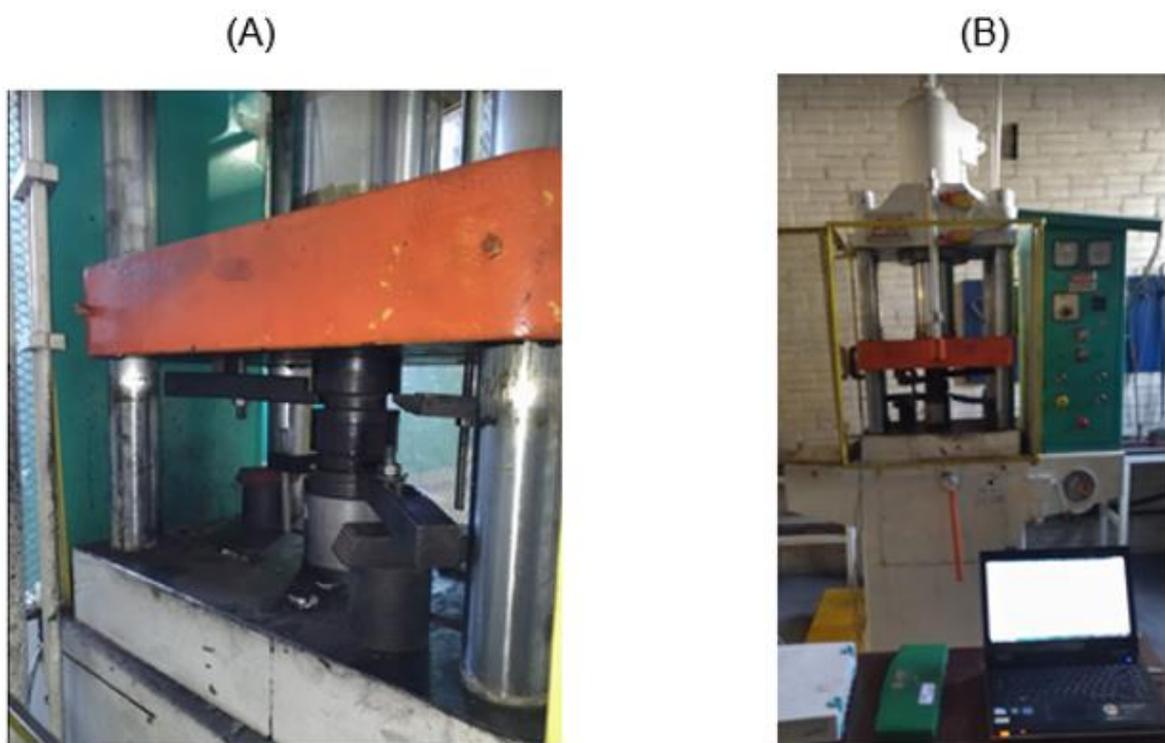


Figura 51 - Montagem e leitura com acessórios adaptados na prensa (A) e (B)

Define-se como Tensão de Escoamento (k_f), o valor da tensão necessária para deformar plasticamente o material num estado uniaxial de tensões, calculado a Tensão de Escoamento após se dar o início do escoamento plástico, pelo quociente da força (F_i) atuante pela área instantânea (A_i) do corpo de prova [30]. Utilizando as equações 1 e 2.

$$k_f = \frac{F_i}{A_i} \quad \text{Equação 1}$$

$$\varphi = \left| \ln \frac{h_i}{h_0} \right| \quad \text{Equação 2}$$

Onde " k_f " é a tensão de escoamento, e " φ " a deformação verdadeira.

3.8.5. Ensaio Microscópio Eletrônico de Varredura e Espectrômetro de Raio X por Dispersão de Energia.

Foi feito ensaio por meio de MEV, a fim de se obter uma amplitude na qualidade das imagens para análise de sua porosidade, sendo que sua resolução é maior do que no microscópio comum, também uma análise de sua composição química por meio do EDS, na figura 52 mostra a análise sendo feita.

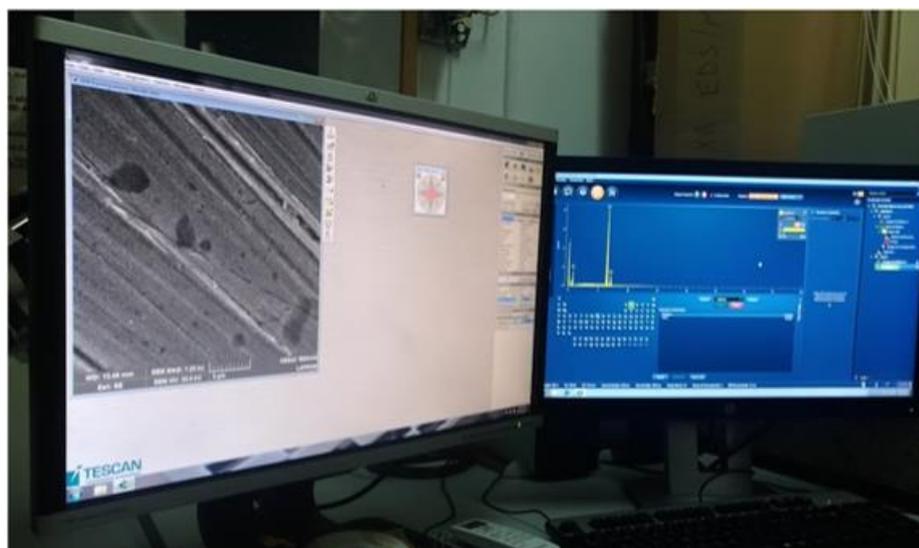


Figura 52 - Análise MEV e EDS

4. ANÁLISE EXPERIMENTAL

Neste capítulo está apresentado os resultados dos ensaios da compactação da geratriz, das densidades sinterizada e forjada, ensaio metalográfico, dureza, compressão e o ensaio MEV e EDS.

4.1. COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ

Para produzir a geratriz foram utilizados dados desenvolvidos no projeto da pré-forma da cruzeta, sendo avaliada sua massa (m), o volume (V) e a densidade (ρ), utilizando a equação 3. Sendo a massa de 126,23 g e o volume de 16,03 cm³, calculou-se a densidade:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{Equação 3}$$

$$\rho = \frac{126,23}{16,03} \quad \text{Equação 4}$$

$$\rho = 7,87 \text{g/cm}^3 \quad \text{Equação 5}$$

Com a referência da densidade de 7,67 g/cm³ para do aço ABNT 1045 no estado sinterizado forjado da tabela 4, se desenvolveu o cálculo (equações 6, 7 e 8) para a altura inicial da geratriz (h_g). Para garantir um total preenchimento da cavidade, caso houver variações se optou por colocar aproximadamente 23% a mais de matéria-prima.

$$V = 16,03 \text{ cm}^3 \quad \text{Equação 6}$$

$$\rho = 7,67 \text{ g/cm}^3 \quad \text{Equação 7}$$

$$m = 7,67 \times 16,03 = 123\text{g} + 23\% = 151,2 \text{ g} \quad \text{Equação 8}$$

Com seu volume (V) e a área (A_b) da geratriz se definiu a altura inicial da geratriz (h_g). Na figura 53 mostra detalhes das dimensões.

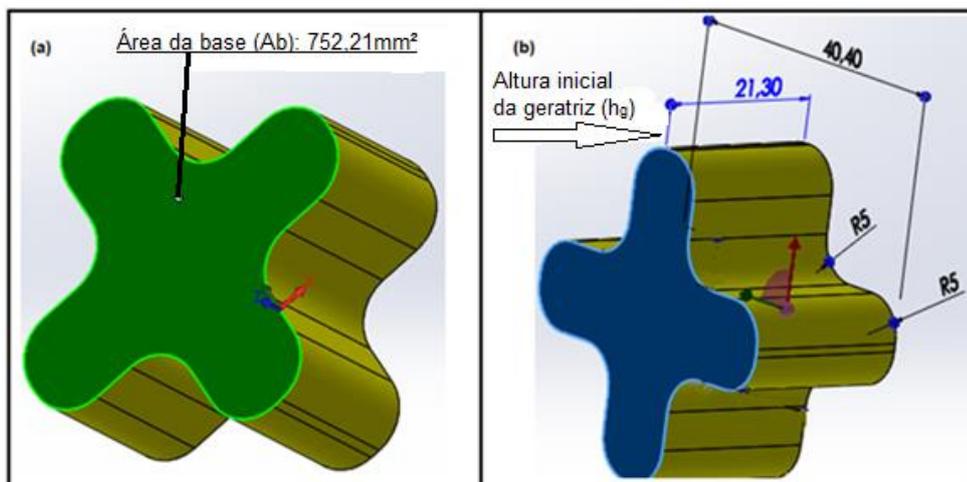


Figura 53 - O valor da área na figura (a) e na figura (b) sendo a medida “hg” calculada a altura da geratriz com 21,3 mm

O cálculo para achar a medida inicial da altura da geratriz (h_g), segue as equações 9, 10 e 11.

$$V = A_b \times h_g \quad \text{Equação 9}$$

$$h_g = \frac{16030 \text{ mm}^3}{752,21 \text{ mm}^2} \quad \text{Equação 10}$$

$$h_g = 21,3 \text{ mm} \quad \text{Equação 11}$$

4.2. DENSIDADE DA CRUZETA SINTERIZADA E FORJADA

Após a compactação das geratrizes, foram sinterizadas e analisadas as densidades e na sequência foram aquecidas novamente para o seu forjamento, logo sendo feitas as análises de densidade no estado forjado.

Na tabela 5, estão os valores das densidades das cinco peças sinterizadas e forjadas de ABNT 1045.

Tabela 5 - Comparativo entre as peças sinterizadas e sinterforjados

Peça	Densidade (g/cm³)- (ρ) Sinterizado	Densidade (g/cm³)- (ρ) Sinterforjado	Aumento da densidade (%)
1	6,67	6,88	3,15
2	6,49	7,03	8,33
3	6,58	6,93	5,32
4	6,52	7,06	8,29
5	6,65	7,01	5,42
Média	6,58	6,98	6,1

4.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CRUZETA SINTERFORJADA

Na figura 54 verifica-se a amostra sem ataque químico, sendo possível ver alguns pontos de porosidade.



Figura 54 - Porosidade sem ataque químico Nital, com aumento de 100x

Nas figura 55 e figura 56 vê-se o ensaio com ataque químico de Nital, observa-se as microestruturas de zonas claras sendo ferrita e zonas escuras perlita e o seus contornos de grão.

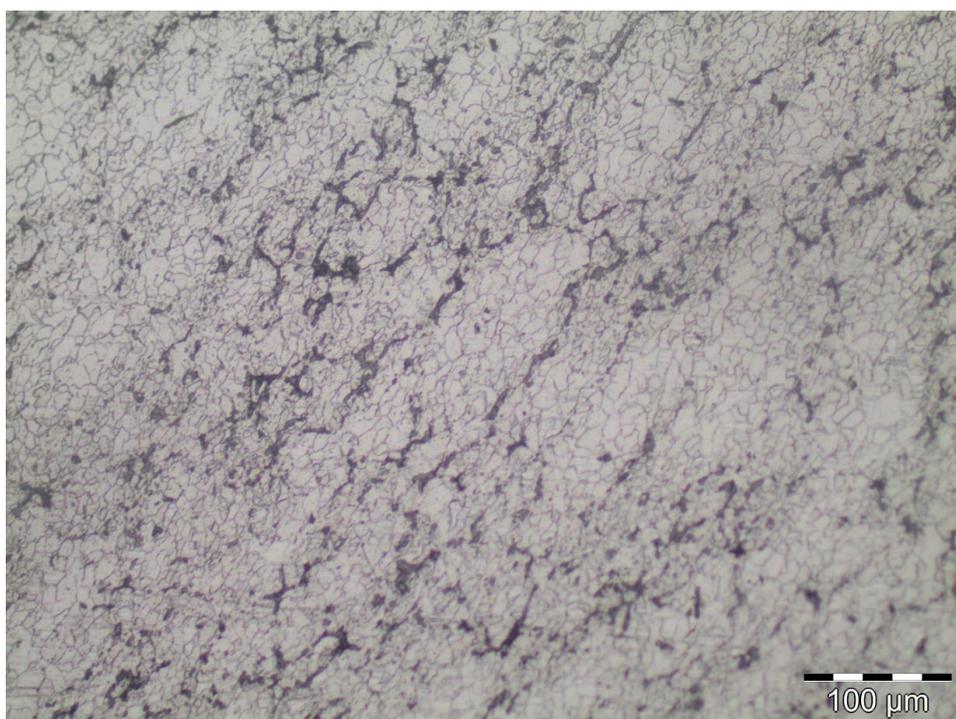


Figura 55 - Com a taque nital, visualiza-se a ferrita e perlita

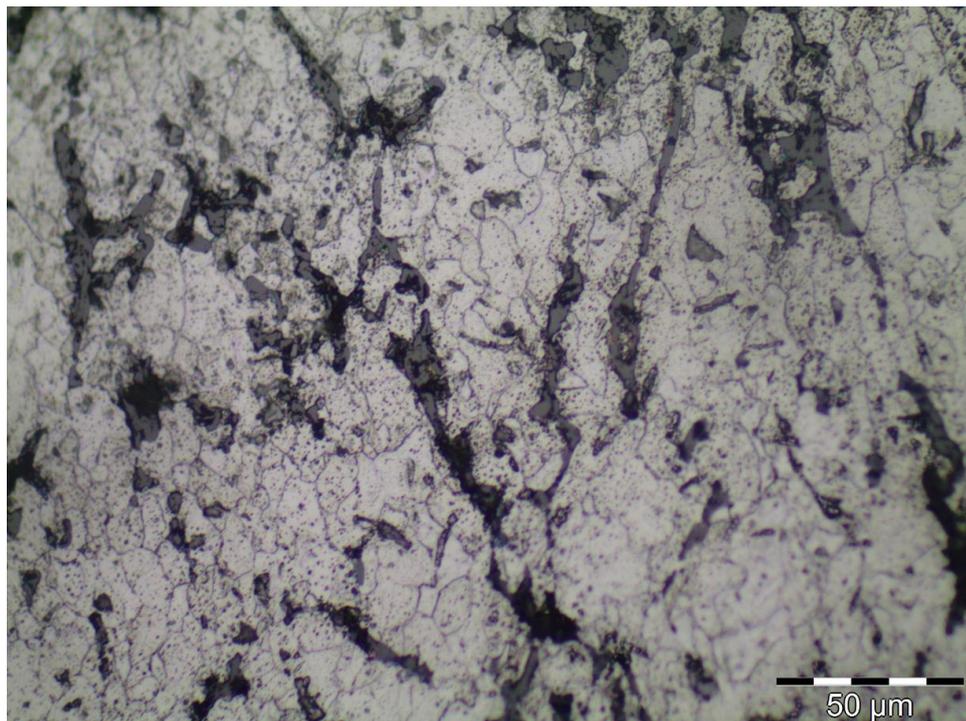


Figura 56 - Contorno e tamanho de grão da ferrita e perlita

4.4. DUREZA DA CRUZETA SINTERFORJADA

No ensaio de dureza as peças foram medidas em 5 pontos, onde se desprezou uma delas com a menor medida ou seja, cada peça foi medida a dureza em 5 posições diferentes, ficando as 4 medidas maiores para análise, como mostra os valores na tabela 6.

Tabela 6 - Média dos valores encontrados da cruzeta sinterforjada

Medições feitas na escala de Dureza Vickers - HV					
Peça	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Média
1	135	140	138	146	140
2	128	134	118	144	131
3	166	182	172	174	174
4	154	163	158	152	157
5	192	188	177	184	185

Na figura 57 mostra-se parte de uma das peças seccionada após sinterforjada, serrada, lixada a face e feito o ensaio de dureza.



Figura 57 - Na face seccionada, feito medições de dureza

4.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DA CRUZETA SINTERFORJADA

Realizado o ensaio para achar a Curva de Escoamento da peça sinterforjada onde os corpos de prova para o ensaio foram preparados com uma parte da cruzeta sinterforjada mostrada na figura 58.

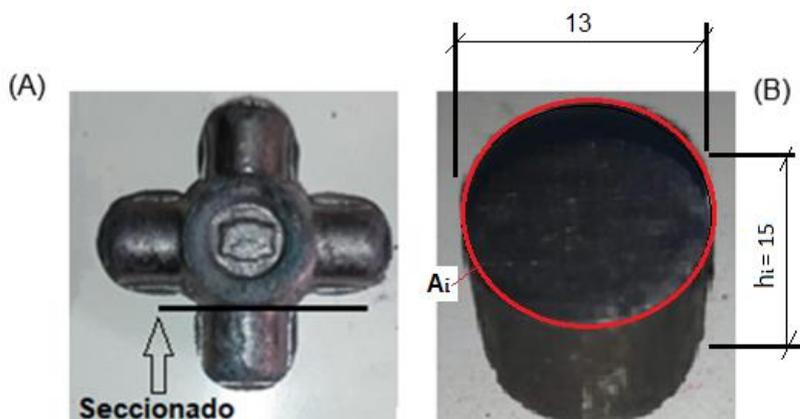


Figura 58 – Ponto onde foi seccionada parte da cruzeta (A) e a parte cortada para amostra de ensaio (B)

A figura 58-B, nas medidas para o referido ensaio tendo o diâmetro de 13 mm e altura do corpo de prova (h_i) de 15 mm, com a célula de carga adaptada na prensa foi possível coletar os dados.

Com a célula de carga adaptada na prensa foram coletados os dados como mostra a tabela 7, com a altura inicial do corpo de prova " h_i " de 15 mm e a área inicial da secção " A_i " do diâmetro de 13 mm igual a 132,67 mm², assim gerado o gráfico para visualizar a curva tensão verdadeira *versus* deformação verdadeira, como mostra a figura 59.

Tabela 7 - Valores coletados no ensaio de compressão

Força [N]	Deslocamento. [mm]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	ϕ [-]	k_f [MPa]
5476	0,00	15,00	132,67	0,0000	41
6166	0,01	14,99	132,77	0,0008	46
35000	0,13	14,87	133,84	0,0088	262
36000	0,15	14,85	133,99	0,0099	269
38741	0,16	14,84	134,13	0,0110	289
40556	0,68	14,32	139,01	0,0467	292
101252	7,69	7,31	272,31	0,7191	372

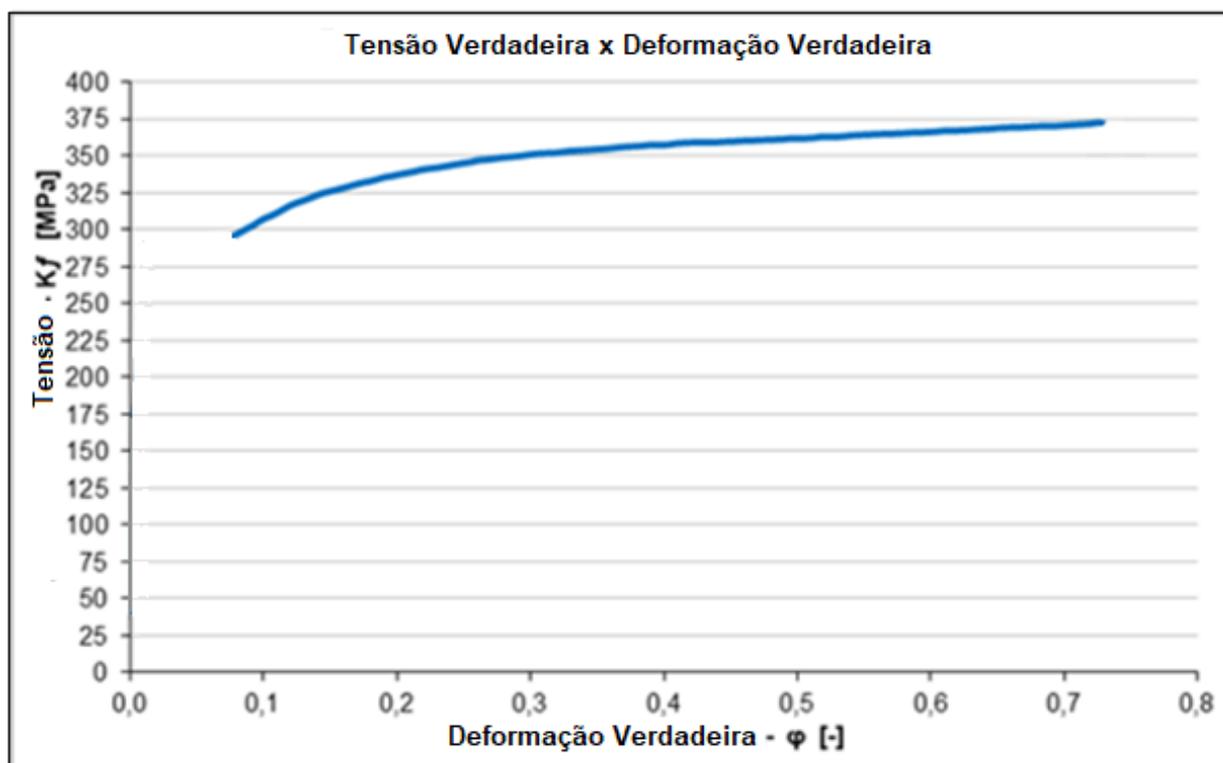


Figura 59 - Gráfico tensão verdadeira versus deformação verdadeira do corpo de prova da referida cruzeta sinterforjada

4.6. ENSAIO MEV E EDS

Foi feita uma análise no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com resolução de ampliação de 2000 vezes, onde se visualiza os pontos de porosidade, comum em peças sinterizadas (figura 60).

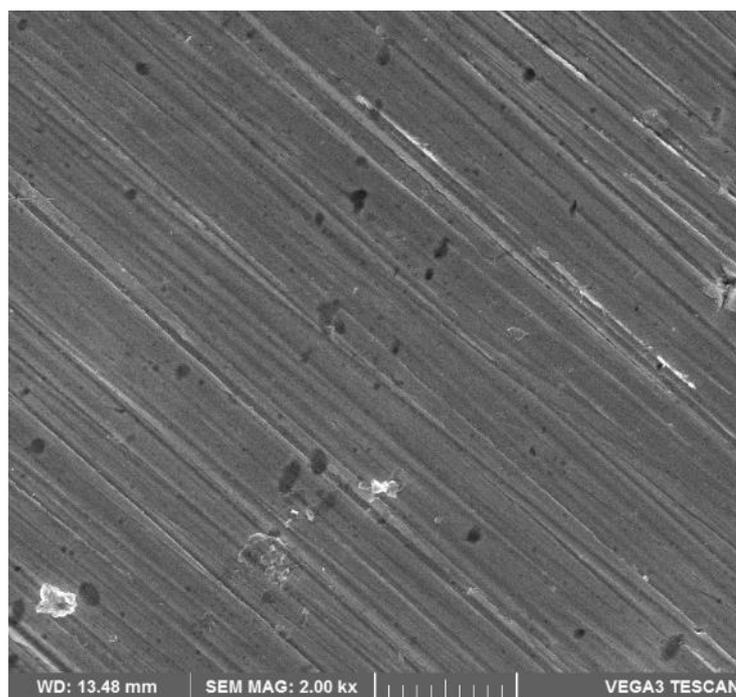


Figura 60 - Micrografia por MEV da amostra analisada

No ensaio Espectrômetro de Raio-X por Dispersão de Energia (EDS), verificou-se a presença dos elementos químicos, ferro e carbono na composição da cruzeta. A figura 61 e a tabela 8 mostram seus percentuais.

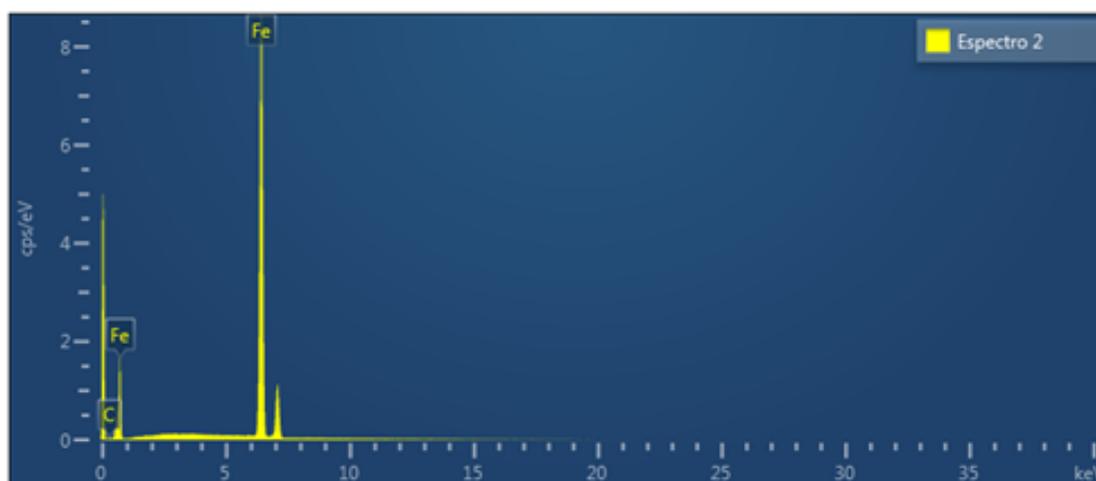


Figura 61 - A análise elementar por energia dispersiva

Tabela 8- Material e percentual na amostragem

Espectro 2		
Elemento	Peso %	% atômico
Fe	96.37	85.09
C	3.63	14.91
Total	100.00	100.00

Como resultado final se obteve as cruzetas sinterforjadas a quente, fotos logo após o sinterforjamento mostrados na figura 62, somente figura (F) geratriz no estado ainda sinterizado.

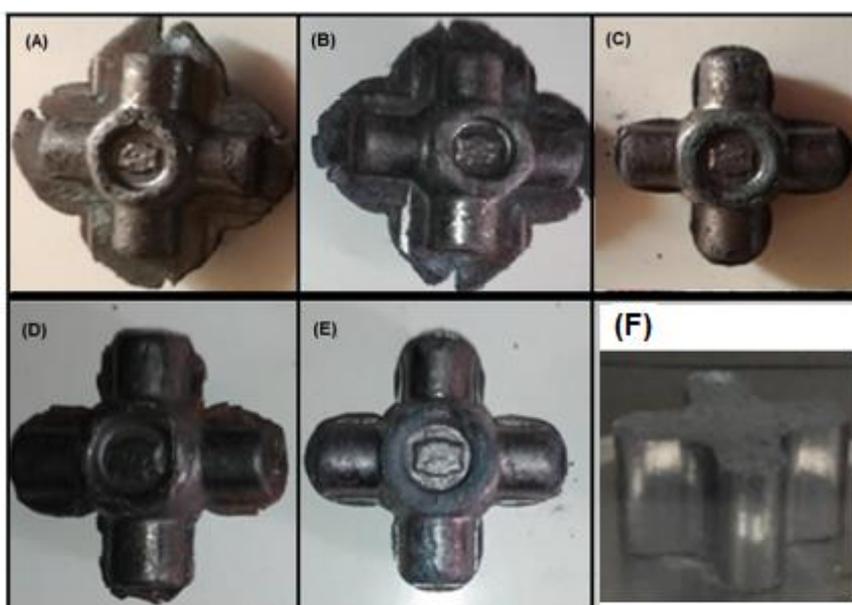


Figura 62 - Nas figuras (A) e (B) ainda com rebarbas, nas figuras (C), (D) e (E) retirado parte das rebarbas, figura(F) geratriz somente sinterizada

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. COMPACTAÇÃO DA GERATRIZ

A massa real do produto foi analisado pelo *software* de modelamento do produto, com dados de um aço ABNT 1045 onde a densidade (ρ) é de $7,87 \text{ g/cm}^3$ e sua massa (m) de 126,2 g, porém se utilizando da referência da literatura, tabela 4, calculou-se a massa para geratriz com densidade de $7,67 \text{ g/cm}^3$ para aço sinterforjado.

Colocando um percentual a mais, garantindo caso haja variações de processo e para um total preenchimento da cavidade da matriz, prevendo até um escoamento de material devido a um excesso de material no forjamento. A quantidade de 151,2 g de pó metálico na cavidade na matriz de compactar, tendo a matriz altura suficiente para a compressão das geratrizes a verde. As geratrizes das cruzetas foram compactadas com pressão de 600 MPa, a partir da curva de compressibilidade, dos dados de referência da sinterização e forjamento a morno de uma cruzeta sinterforjada [41].

5.2. DENSIDADE DA CRUZETA SINTERIZADA E SINTERFORJADA

Foram realizados os ensaios de caracterização das densidades das geratrizes sinterizadas, na sequência ela foi aquecida novamente para o forjamento. Os ensaios foram realizados por Arquimedes e determinada a média das densidades, onde a média da densidade da peça sinterizada foi de $6,58 \text{ g/cm}^3$ e depois de forjada tendo $6,98 \text{ g/cm}^3$. Conforme na revisão de literatura nas propriedades do aço ABNT 1045 na tabela 4 e na referência de INFOMET [43], a densidade (ρ) para o aço sinterizado teria uma média de $6,6 \text{ g/cm}^3$ e no estado sinterforjado de $7,67 \text{ g/cm}^3$. Logo o resultado do estudo das densidades, a cruzeta sinterizada ficou igual ao referenciado na literatura e a cruzeta sinterforjada sua densidade não atingiu exatamente o referenciado na literatura.

5.3. ANÁLISE METALOGRÁFICA DA CRUZETA SINTERFORJADA

Na metalografia, mostrada na figura 54, figura 55 e figura 56 sem ataque e com ataque químico de nital é possível observar as porosidades e os tamanhos e contornos de grão da microestrutura ferrita e perlita.

Um fator característico no sinterforjamento e também observado foi a redução

e ou fechamento dos poros, como também citado, a porosidade é moderada ou inexistente nos aços e é presente nos sinterizados, mas no forjamento a quente dos sinterizados, se consegue melhores resultados, pois promove inicialmente o fechamento dos poros, neste processo de conformação propriamente dita, onde inicia o escorregamento dos planos e seu alinhamento[44].

Compara-se a porosidade do Aço ABNT 1045 trefilado no estado normalizado na figura 2, e a redução de poros do Aço sinterforjado ABNT 1045 na figura 54.

5.4. DUREZA DA CRUZETA SINTERFORJADA

Segundo a norma para verificar a dureza em materiais sinterizados, a ISO 4499 determina-se a dureza, verificando-se cinco medidas de macrodureza e descartando a de menor valor, em seguida é calculado o valor médio aritmético das quatro medidas, obtendo assim a dureza aparente. O valor da maior dureza encontrada de 185 HV nos corpos de prova do sinterforjado e convertendo-a para Dureza Brinell (HB), corresponde a aproximadamente 176 HB, onde se obteve uma dureza superior se comparar com os dados da revisão bibliográfica na tabela 2, sendo a dureza do aço ABNT 1045 fornecido no estado recozido com 149 HB e no estado normalizado com 170 HB.

5.5. ENSAIO DE COMPRESSÃO DA CRUZETA SINTERFORJADA

No ensaio de compressão da cruzeta sinterforjada, analisando a tabela 7 e o gráfico da figura 59 os valores das tensões verdadeiras e deformações verdadeiras que o material sinterforjado apresentou foi de aproximadamente 289 MPa, até atingir o limite de escoamento máximo de 372 MPa, comparado com a revisão de literatura na tabela 4, o limite de escoamento ficou pouco abaixo onde é aproximado de 340 MPa no estado sinterforjado, mas superior quando o material somente sinterizado que é de 160 MPa. Comparando os limites de escoamento do aço ABNT 1045 no estado laminado e recozido da tabela 2 e do aço ABNT1045 da cruzeta sinterforjada na figura 59, o limite de escoamento do aço laminado e recozido são superiores, com 350 MPa.

5.6. ENSAIO MEV E EDS

No ensaio de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) da figura 60 também foi possível visualizar alguns pontos de porosidade de forma mais nítida, mas em pequenas quantidades.

No Espectrômetro de Raio-X, o ensaio (EDS), o percentual em peso dos elementos químicos encontrados na região mensurada foi o ferro com 96,37% e carbono com 3,63%, aferindo os elementos químicos dos pós em estudo, onde uma possível oxidação na sinterização devido a alta temperatura de aquecimento da pré-forma aconteça a perda de carbono.

5.7. CRUZETA SINTERFORJADA

As bacias de rebarbas foram dimensionadas com perfil definido como pequeno, provável que este grau de redução nas rebarbas em relação à espessura da peça, proporcionou as pequenas trincas nas rebarbas (figura 63). Foi possível observar também, pequenos pontos de descarbonetação, pequenas falhas nas suas extremidades, sugerindo que esta perda de carbono em sua superfície ocorreu devido à alta temperatura e o tempo de permanência dentro do forno.



Figura 63 - Trincas na rebarba

6. CONCLUSÃO

A ferramenta de compactação da geratriz confeccionada em aço D6 e ainda bipartida atendeu perfeitamente a todas as solicitações mecânicas sem nenhuma avaria. Mesmo não sendo de praxe ser bipartida, facilitou muito sua montagem e desmontagem para manutenção preventiva, onde os pinos guias garantiram o alinhamento, isto demonstrou que além dos aços classe “H” o aço D6 atendeu a aplicação na ferramenta de compactação e no forjamento a quente das cinco cruzetas [49].

A média das densidades das peças sinterizadas de $6,58 \text{ g/cm}^3$ e depois de forjadas com a pressão de 4000 kN, com a média de $6,98 \text{ g/cm}^3$ obtiveram bom resultado, somente no estado forjado ficou abaixo conforme a revisão da literatura, na tabela 4, onde se refere com $7,67 \text{ g/cm}^3$. O resultado das densidades foi satisfatória, mesmo no estado sinterforjado não chegando aos valores citados na literatura.

No processo de sinterforjamento, no caso, forjamento a quente de pré-forma sinterizada, podem conferir densidades de massa mais altas devido a eliminação ou diminuição da porosidade, com isto, tendo o aumento das propriedades mecânicas do produto também, uma sinterização secundária, por exemplo, tenderia a aumentar a resistência a tração em sinterforjados pois os poros residuais tendem a tornarem-se esféricos assim mais resistentes aos impactos [50,51]

A ferramenta de forjamento, sendo as matrizes superior e inferior, também confeccionadas em aço D6 e insertadas nas cavidades das bases com ajuste de tolerância norma ISO com interferência, figura 49, não sofreram deformações com as cinco peças forjadas, mesmo sendo indicados para ferramentas de corte e sendo de difícil usinagem e não para trabalho a quente garantiram-se as dimensões especificadas no projeto do produto, a cruzeta [52].

O ensaio EDS, certificou os elementos da estrutura da amostra com ferro e carbono do aço sinterforjado ABNT1045.

A estrutura ferrita e perlita se apresentou de forma regular e homogênea como visto nas figuras 55 e figura 56 mesmo como porosidades.

Pode-se considerar ótimo o resultado da dureza encontrada de 185 HV no sinterforjado, próximo aos valores citados na revisão de literatura e comentado na discussão de resultados.

No ensaio de compressão a frio o material sinterforjado apresentou uma

Tensão de escoamento de 289 MPa, pouco abaixo da literatura, que é de 340 MPa no estado sinterforjado, mas comprovou que uma peça sinterforjada a quente tem sua Tensão de escoamento superior a uma peça somente sinterizada, onde na mesma tabela cita 160 MPa. Porém verifica-se na tabela 2, a superioridade das tensões de um aço comercial ABNT 1045 aos sinterizados e sinterforjados.

SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho indica como sugestões para futuros trabalho os itens a seguir:

- a) estudo de viabilidade da utilização do aço D6 para ferramentas de compactação e para forjamento já que neste trabalho mesmo sendo de baixa produção obteve ótimo resultado;
- b) devido a porosidade característico da metalurgia do pó, estudar a viabilidade de desenvolver outras ligas no compósito, como exemplo ligas a base de cobre para fabricação de cruzetas;
- c) fazer análise de tratamento térmico de tempera, bem como de cementação e nitretação;
- d) fazer na ferramenta um perfil de alívio nas extremidades afim analisar o escoamento e preenchimento sem falhas nas extremidades da cruzeta;
- e) ensaios de fadiga;
- f) ensaios com simulações 3D;
- g) ensaios de compressão a quente de sinterforjados e comparar valores em uma simulação computacional;
- h) fazer um estudo comparativo de uma cruzeta sinterforjada e uma cruzeta já usada comercialmente.
- i) análise com forjamento a frio sem rebarbas.

REFERÊNCIAS

- [1] LANGE, K. Modern metal forming technology for industrial production. **Journal of materials processing technology**, v.71, p. 2-13, 1997.
- [2] ALVES, F. **O que é o aço forjado**. Artigo técnico - Indústria hoje, 2012. Disponível em: <<http://www.industriahoje.com.br/o-que-aco-forjado>>. Acesso em: 12 mar. 2017.
- [3] FORGING INDUSTRY ASSOCIATION (FIA). **Forging solution**: design engeneering information from FIA. USA, 2007. Disponível em: <<http://www.forging.org/about/forgings-where-why-how>>. Acesso em: 11 mar. 2017.
- [4] CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: técnica e produtos**. 3ª ed. São Paulo, SP: ABM, 2001.
- [5] THÜMMLER, F.; OBERACKER, R.; An introduction to powder metallurgy. Cambridge, Great Britain: The Institute of Materials. p. 1- 5, 1993.
- [6] HÖGANÄS. **Componentes sinterizados** - características e vantagens. Disponível em: <<https://www.hoganas.com/pt-br/powder-technologies/pressing-sintering/>>. Acesso em: 30 set. 2016.
- [7] DAGNESE, J. **Análise do comportamento elasto-plástico de um aço AISI 1045 em baixas deformações**. Dissertação, programa de pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/70685/000878157.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 05 set. 2019.
- [8] GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**, Ed. Metallum Eventos Técnicos E Científicos, ISBN 978-85-62404-00-9, 1ª ed., 2009.
- [9] CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Forjamento**. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6488-forjamento-introducao>. Acesso em: 16 abr. 2017.
- [10] AÇOSPORTE. Aço SAE 1045 - **Propriedades do aço SAE 1045**. Disponível em <<http://www.acosporte.com.br/aco-sae-1045>>. Acesso em: 05 ago. 2019.
- [11] 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: 06 de ago. 2019.
- [12] QUALINOX. **Aço Carbono**. Disponível em: <<http://www.qualinox.com.br/aco-carbono.htm>>. Acesso em: 06 ago. 2019.
- [13] FREITAS, B. J. M. **Estudo da influência das temperaturas de austenitização na dureza dos aços AISI D6 e SAE 1045**. Dissertação (Mestrado

em Engenharia de Materiais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Londrina, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/7314/1/LD_COEMA_2016_2_01.pdf>. Acesso em: 29 ago. 2019.

[14] GERMAN, R. M. **Sintering from empirical observations to scientific principles**. 1º ed. Oxford: Elsevier. 2014.

[15] SANDEROW, H.; **Management & Engineering Technologies. Powder Metallurgy Methods and Design**. ASM Metals Handbook - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, v.7, p. 23-24, 9ª ed. 1998.

[16] CHIAVERINI, V. **Tecnologia mecânica – Processos de fabricação e Tratamento**, 2ª ed. Makron Books do Brasil Editora Ltda, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

[17] EXNER, E. **Principles of Single Phase Sintering**, Reviews on Powder Metallurgy and Physical Ceramics, v.1, p. 1-4, 1979.

[18] TRUDEL, Y. **Introduction to Metal Powder. Production and Characterization** ASM Metals Handbook - Powder Metal Technologies and Applications. ASM International, v.7, 9ª ed, p. 83-88, 1998.

[19] BRITO, F. I. G.; MEDEIROS, K. F.; LOURENÇO, J. M. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. Holos. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte Natal, Brasil. v.3, p. 204-2011, 2007.

[20] INDUSTRIAL HEATING. **Etapas do Processo da Metalurgia do Pó** - Revista Industrial Heating. Disponível em: <<http://www.revistaih.com.br/coluna-metalurgia-do-po/a-metalurgia-do-po/2601>>. Acesso em: 12 ago. 2019.

[21] GOMES, U. U. **Tecnologia dos pós: fundamentos e aplicações**. Natal: Editora Universitária – UFRN. 1995.

[22] PAVANATI, H. C. **Processo de Fabricação – Metalurgia do pó**. Disponível em: <<http://pavanati.com.br/doc/04.pdf>>. Acesso em: 20 fev. 2018.

[23] CREMONEZI, A.; KLEIN, A.N.; RODRIGUES, D.; FILGUEIRA FILHO, D. T. A. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1º ed. Editora Metallun eventos técnicos e científicos. 2009.

[24] NEVES, M. D. M. **Sinterização de misturas de pó de ligas de ferro para aplicações automotivas**. 2005. Tese (Doutorado em Ciências de Tecnologia Nuclear – Materias) - Faculdade de Ciências de Tecnologia Nuclear - Materias, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

[25] MITSUBISHI MATERIALS. **Hardness technical information**. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/hardness.html>. Acesso em: 14 jul. 2019.

[26] LEMOS, S. et al. **The use of the radial constriction consolidation (RCC) process to obtain billets from iron powder**. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. 2010,

v.63, n.3, p. 509-516. ISSN 0370-4467. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rem/v63n3/v63n3a13.pdf>>. Acesso em: 02 set. 2019.

[27] HÖGANÄS. **Manual de Pós de Ferro e Aço para Componentes Sinterizados**, Copyright Höganäs AB, p.393 , 2004.

[28] ASM INTERNATIONAL. **Power Metal Technologies and Applications**, Handbook. Vol. 7. ASM International. p. 2631-2640, 2000.

[29] FANG, Z. Z. **Sintering of advanced materials**. Cambridge. Woodhead Publishing, 2010

[30] PAULA, M. J. T.; RAMOS, F. J. C; MARTINS, V.; SCHAFFER, L.; Revista ferramental. **Matriz de compactação em aço d6 para obtenção de pré-forma sinterforjada em aço ABNT 1045**. 2019. Disponível em: <<https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/matriz-compactacao-aco-d6-para-obtencao-pre-forma-sinterforjada-em-aco-abnt-1045/>>. Acesso em: 12 mar. 2019.

[31] MORO, N.; AURAS, A. P. **Processo de Fabricação – Metalurgia do pó e o Futuro do Industria**. Notas de aula.

[32] WHITE, D. G. Challenges for the 21st Century. Int. **Journal of Powder Metallurgy**, v.33, n.5, p.45, 1997.

[33] PALLINI, M. A. T.; CARVALHO, M. A. T. **Cost reduction in the Automotive Industry through Sintering / A Redução de custo na indústria automotiva através do sinterizado**. Society of Automotive Engineers, 2006-01-2585, p. 1-6, 2006.

[34] DOMINGOS, T. A. F. F. **Dureza de corpos sinterizados**. Disponível em: <<http://www.bsmetalurgica.com.br/ws/files/dureza-de-corpos-sinterizados.pdf>>. Acesso em: 17 mai. 2019.

[35] SUTRADHAR, G.; JHA, A. K.; KUMAR, S. **Production of sinter-forged components**. Journal of Materials Processing Technology, v.41, n.2, p. 143-169, 1994.

[36] SINGH, S.; JHA, A. K.; KUMAR, S. **Dynamic effects during sinter forging of axi-symmetric hollow disc preforms**. International Journal of Machine Tools and Manufacture. v.47, n.7–8, p. 1101-1113, 2007.

[37] CORREA, E. O. **Tecnologia da fabricação – Metalurgia do pó**. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1242773>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

[38] ROUESSAC V.; DESGARDIN G.; GOMINA M. **Influence of the sinter-forging conditions on the mechanical properties of textured bulk (Bi, Pb) -2223 ceramics**. p. 282-287: 2573-2574, 1997.

- [39] COSTA, L. L.; TAVAES, A. C.; CORRÊA, 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, p. 9294-9307. In: *69º Congresso Anual da ABM - Internacional*, São Paulo - Brasil, 2014. ISSN: 2594-5327, DOI 10.5151/1516-392X-25211.
- [40] RATHORE, S. S.; SALVE, M. M.; DABHADE, V. V. **Effect of molybdenum addition on the mechanical properties of sinter-forged Fe–Cu–C alloys**. *Journal of Alloys and Compounds*, v.649, p. 988-995, 2015.
- [41] 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**. ISSN 1516-392X. 2015. Disponível em: <<https://abmproceedings.com.br/ptbr/article/download-pdf/desenvolvimento-do-processo-de-sinterforjamento-a-morno-de-uma-cruzeta-de-aco-abnt-1045>>. Acesso em: 16 mai. 2019.
- [42] SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre-RS: Imprensa Livre, 2004.
- [43] INFOMET. **Produção de peças sinterizadas de ferro e aço**. Disponível em: <<http://www.infomet.com.br/site/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?codConteudo=130>>. Acesso em: 08 ago. 2019.
- [44] NOUDEM J.G.; GUILMEAU E.; CHATEIGNER D.; OULADDIAF B.; BOURGAULT D. **Performance of hot stacked-sinterforged Bi2223 ceramics**. *Physica C*. p. 408-410:862-863, 2004.
- [45] BERG, S. **Growth of PM through material and process developments for high performance components**. PM2 TEC2005, Montreal-Canada, Junho, 2005
- [46] BUENO, A. F.; COSER, M. S.; SOUZA, J.; SCHAEFFER, L. **Use of Inserts of Tool Steel with Solid Lubricant Aggregated made by Powder Metallurgy**, *International Journal of Scientific & Engineering Research*, v.4, n.10, p. 42-50, 2016.
- [47] LIMA, D. R. S. **Desenvolvimento de Tecnologia de Forjamento de aço AISI 8640 destinado à produção de brocas de perfuração**. Dissertação para obtenção do título de mestre. Área de concentração: Processos de Fabricação. Pós-graduação em engenharia Metalúrgica, Minas e de Materiais. Porto Alegre RS, Brasil. 2007.
- [48] GGD METALS. **Aço construção mecânica – Propriedades dos aços 1045**. Disponível em: <<http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/ABNT-1045/>>. Acesso em: 15 fev. 2017.
- [49] SCANDIFFIO, I.; DINIZ, A.; SOUZA, A. **Evaluating surface roughness, tool life, and machining force when milling free-form shapes on hardened AISI D6 steel**. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v.82(9), p. 2075-2086, 2016.

- [50] JONES, P. K. **The Technical and Economic Advantages of Powder-Forged Products.** In: **New Perspectives in Powder Metallurgy**, NJ: MPIF, v.6, p.19, 1973.
- [51] WANIKAWA, S. **The Effect of Sintering Conditions on the Characteristics of Sinter-Forged Low Alloy Steel Containing Cr.** Journal of the Japan Society of Powder and Powder Metallurgy, v.27, n.7, p. 240 -246, Sept. 1980.
- [52] NAYAK, M.; SEHGAL,R. **Effect of Tool Material Properties and Cutting Conditions on Machinability of AISI D6 Steel During Hard Turning.** Arabian Journal for Science and Engineering, v.40(4), p. 1151-1164, 2015.

APÉNDICE

APÊNDICE A- Tabela completa dos valores coletados no ensaio de compressão.

Força [N]	Deslocamento. [mm]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	φ [-]	k_f [MPa]
5476	0,00	15,00	132,67	0,0000	41
6166	0,01	14,99	132,77	0,0008	46
35000	0,13	14,87	133,84	0,0088	262
36000	0,15	14,85	133,99	0,0099	269
38741	0,16	14,84	134,13	0,0110	289
39519	0,42	14,58	136,45	0,0281	290
39778	0,49	14,51	137,15	0,0332	290
40037	0,56	14,44	137,80	0,0379	291
40556	0,68	14,32	139,01	0,0467	292
41074	0,81	14,19	140,21	0,0553	293
41334	0,86	14,14	140,77	0,0592	294
42111	1,05	13,95	142,67	0,0726	295
42371	1,11	13,89	143,26	0,0768	296
42863	1,18	13,82	143,95	0,0816	298
43460	1,25	13,75	144,68	0,0867	300
44034	1,32	13,68	145,43	0,0919	303
62137	3,79	11,21	177,56	0,2914	350
62652	3,86	11,14	178,65	0,2976	351
64143	4,08	10,92	182,24	0,3175	352
64648	4,15	10,85	183,33	0,3234	353
65680	4,29	10,71	185,73	0,3364	354
67762	4,56	10,44	190,65	0,3626	355
68306	4,63	10,37	191,83	0,3688	356
68840	4,70	10,30	193,16	0,3756	356
69390	4,77	10,23	194,48	0,3825	357
71008	4,98	10,02	198,53	0,4031	358
72134	5,10	9,90	201,01	0,4155	359
73302	5,25	9,75	204,14	0,4309	359

Força [N]	Deslocamento. [mm]	h_i [mm]	A_i [mm ²]	φ [-]	k_f [MPa]
73864	5,32	9,68	205,63	0,4382	359
74426	5,38	9,62	206,96	0,4447	360
75043	5,46	9,54	208,54	0,4523	360
75657	5,52	9,48	209,99	0,4592	360
76236	5,59	9,41	211,50	0,4664	360
76857	5,66	9,34	213,03	0,4736	361
77500	5,73	9,27	214,68	0,4813	361
78126	5,80	9,20	216,25	0,4886	361
78774	5,86	9,14	217,66	0,4951	362
79442	5,94	9,06	219,58	0,5039	362
80110	6,00	9,00	221,22	0,5113	362
80785	6,06	8,94	222,58	0,5174	363
82853	6,26	8,74	227,68	0,5401	364
84290	6,39	8,61	231,23	0,5555	365
86502	6,59	8,41	236,72	0,5790	365
87271	6,66	8,34	238,55	0,5867	366
89637	6,85	8,15	244,25	0,6103	367
92115	7,05	7,95	250,32	0,6349	368
93792	7,17	7,83	254,24	0,6504	369
94687	7,24	7,76	256,39	0,6588	369
96477	7,37	7,63	260,81	0,6759	370
100184	7,62	7,38	269,83	0,7099	371
101252	7,69	7,31	272,31	0,7191	372