



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CAMPUS DE RUSSAS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MARCOS RIDILEY ALCÂNTARA COSTA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO NAS
PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS DE AÇO PROCESSADAS
POR METALURGIA DO PÓ**

RUSSAS

2022

MARCOS RIDILEY ALCÂNTARA COSTA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS DE AÇO PROCESSADAS POR METALURGIA DO
PÓ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa
Lobo.

RUSSAS

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

C874e Costa, Marcos Ridiley Alcântara.
Estudo da influência da pressão de compactação nas propriedades físicas e mecânicas de peças de aço processadas por metalurgia do pó / Marcos Ridiley Alcântara Costa. – 2022.
58 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Russas, Curso de Engenharia Mecânica, Russas, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo.

1. Metalurgia do pó. 2. Ferro. 3. Propriedades físicas e mecânicas. I. Título.

CDD 620.1

MARCOS RIDILEY ALCÂNTARA COSTA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE COMPACTAÇÃO NAS PROPRIEDADES
FÍSICAS E MECÂNICAS DE PEÇAS DE AÇO PROCESSADAS POR METALURGIA DO
PÓ

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Ceará,
como requisito parcial à obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 04/07/2022

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Aos meus pais, Cristina e Antônio, a minha
irmã, Karine.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Cândido Jorge de Sousa Lobo, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Jorge Luiz Cardoso e Prof. Dr. Pedro Helton Magalhães Pinheiro pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao professor Dr. Lindberg Lima Gonçalves, pelo apoio durante todo o curso.

Ao professor Dr. Edvan Cordeiro de Miranda, por toda a ajuda no começo da graduação.

Aos professores Ms. Ramon Rudá Brito Medeiros e Dr. George Luiz Gomes de Oliveira pelos ensinamentos, sugestões e orientações sem as quais esse trabalho não teria saído da introdução.

Aos meus amigos e companheiros de labuta e de dividas, Orismildes Gomes de Almeida Neto pelas piadas sem graça e barulho incomensurável e Bruno de Oliveira Cunha, por todos os aconselhamentos e ensinamentos sobre a vida nesses últimos anos.

Aos meus amigos Wesley, Miguel e Allisson, pela contribuição para a manutenção da minha sanidade mental durante todo esse trabalho.

A minha amiga Rafaella Cavalcante, Samille Kricia e Claudécir Fernandes pelas dicas e orientações nesse processo.

Aos colegas Anna Flávia, Anna Kethlen e Amanda Accorsini pela ajuda durante o trabalho.

Aos novos amigos Dr Sergimar Kennedy e quase Ms João Pedro pelos ensinamentos e sugestões.

“A vida sem bebida é como um beco sem saída.” (de OLIVEIRA, 2018).

RESUMO

A metalurgia do pó não é um processo de fabricação novo, entretanto, esse método, como conhecemos hoje, só deu seus primeiros passos na década de 1920 e teve seus principais avanços durante o século XX. Atualmente a metalurgia do pó é um processo de fabricação amplamente utilizado devido a esse processo ser o mais barato na produção de algumas peças e, por vezes, por ser o único processo de fabricação viável. O presente trabalho pretende estudar os efeitos que a pressão de compactação tem nas propriedades físicas e mecânicas de peças ferrosas processadas por metalurgia do pó, objetivando otimizar o processo. Para isso, foi utilizado como material o pó de ferro por ser o mais usado na metalurgia do pó, sendo cerca de 70% dos produtos fabricados por esta técnica feitos de ligas ferrosas. Com o objetivo de analisar esse parâmetro foram selecionadas 4 pressões de compactação sendo elas: 314,8 MPa, 373,8 MPa, 432,8 MPa e 491,8 MPa. Com cada pressão de compactação foram feitos 4 corpos de prova onde foram avaliadas diversas propriedades físicas e a dureza do material. Como resultado foi possível perceber que o aumento da pressão de compactação induziu um aumento da dureza além de uma redução na porosidade.

Palavras-chave: metalurgia do pó; ferro; propriedades físicas e mecânicas.

ABSTRACT

The metal is not the new manufacturing process, however, this method as today, only its first steps in the 1920s and had major advances during the 20th century. Currently, powder manufacturing is a manufacturing process used because this process is the cheapest in the production of some parts and, sometimes, because it is the only viable manufacturing process. The present work intends to study the effects that a compaction pressure has on the physical and mechanical properties of iron parts processed by means of powder metallurgy, optimizing the metal process. For this, iron powder was used as the material for being the most used in powder metallurgy, with about 70% of the products manufactured by these techniques made of ferrous alloys. For the purpose of analysis, this parameter can be accessed by 4 33.8 MPa, 31.8 MPa and 491.8 MPa. With each of physical properties and durability of the material. As a result, it was possible to notice that the increase in compaction pressure induced an increase in durability in addition to an increase in porosity.

Keywords: powder metallurgy; iron; physical and mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Esquema básico do processo de metalurgia do pó.....	17
Figura 2	– Fluxograma do processo da metalurgia do pó.....	18
Figura 3	– Multiplicação dos pontos de contato por redução do tamanho médio de partícula.....	19
Figura 4	– Ilustração das diversas formas de partículas: a) Fibroso; b) Dendrítico; c) Poligonal; d) Arredondado; e) Esférica; f) Irregular.....	19
Figura 5	– Compactação de simples ação.....	21
Figura 6	– Compactação de simples ação–Variação de densidade.....	22
Figura 7	– Pó de Ferro.....	26
Figura 8	– Espectrômetro de emissão ótica – PDA 7000.....	27
Figura 9	– Peneiras granulométricas da marca TPL Tamis.....	27
Figura 10	– Fluxograma do estudo realizado.....	28
Figura 11	– Máquina universal de ensaios EMIC DL 300000.....	29
Figura 12	– Compactados verde – Ensaios preliminares.....	30
Figura 13	– Forno mufla modelo KK-170.....	30
Figura 14	– Durômetro de bancada analógico Rockwell – SUSSEN WOLPERT TESTOR HT1.....	31
Figura 15	– CPs sinterizados, lixados e indentados.....	31
Figura 16	– Molde cilíndrico.....	32
Figura 17	– Macho do molde cilíndrico.....	33
Figura 18	– Compactados Verde – CPs finais.....	33
Figura 19	– Paquímetro universal digital ZAAS Precision ZAAS – 01,0013.....	34
Figura 20	– Micrometro analógico Kingtools 0-25x0,01mm.....	34
Figura 21	– Balança de precisão da marca Ohaus modelo Adventurer AX523.....	35
Figura 22	– Politriz metalográfica - Arotec aropol E.D.....	35

Figura 23 – CP polido.....	36
Figura 24 – Microscópio óptico trinocular invertido - Olympus GX41 com iluminador - Olympus LG-PS2.....	37
Figura 25 – CPs Sinterizados.....	37
Figura 26 – CP sinterizado e lixado.....	38
Figura 27 – Bloco padrão Rockwell C.....	40
Figura 28 – CPs sinterizados, lixados e indentados.....	40
Figura 29 – Micrografias dos corpos de prova verdes com aumento de 50X. a) 315,8 MPa, b) 375,0 MPa, c) 434,2 MPa, d) 493,4 MPa.....	48
Figura 30 – Micrografias dos corpos de prova sinterizados com aumento de 50X. a) 315,8 MPa, b) 375,0 MPa, c) 434,2 MPa, d) 493,4 MPa.....	48
Figura 31 – Micrografias dos corpos de prova compactados com 315,8 MPa com aumento de 50X. a) Compactado Verde, b) Sinterizado.....	49
Figura 32 – Amostras vistas no microscópio antes e após serem processadas pelo ImageJ.....	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Aplicações da Metalurgia do pó.....	16
Gráfico 2 – Pressão Aplicada x Densidade Relativa.....	22
Gráfico 3 – Variação da densidade em função da temperatura de Sinterização. Curva 1: Pó amontoado; curva 2: pó compactado a 4t/cm ² ; curva 3: pó compactado a 30 t/cm ²	23
Gráfico 4 – Pressão de compactação x Densidade Relativa.....	24
Gráfico 5 – Variação de propriedades mecânicas de compactados de ferro em função da temperatura de sinterização.....	25
Gráfico 6 – Peças sinterizadas – Ensaio de dureza.....	34
Gráfico 7 – Variação Mássica.....	47
Gráfico 8 – Pressão de compactação x Densidade.....	49
Gráfico 9 – Pressão de compactação x Porosidade.....	49
Gráfico 10 – Pressão de compactação x Densidade.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Vantagens e Desvantagens da Metalurgia do Pó.....	16
Tabela 2	– Processos de Produção de Pós.....	20
Tabela 3	– Pressão de compactação e razão de compactação para diversos materiais....	22
Tabela 4	– Temperatura e tempo de sinterização.....	23
Tabela 5	– Peças sinterizadas – Ensaio de dureza.....	32
Tabela 6	– Composição química do pó metálico utilizado.....	42
Tabela 7	– Peças sinterizadas – Ensaio de dureza.....	43
Tabela 8	– Variação mássica.....	44
Tabela 9	– Variação dimensional.....	45
Tabela 10	– Variação de densidade.....	46
Tabela 11	– Porosidade média.....	50
Tabela 12	– Comparação porosidades médias.....	50
Tabela 13	– Pressão de compactação x Densidade.....	51
Tabela 14	– Dureza de várias ligas ferrosas.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira Regulamentar
UFC	Universidade Federal do Ceará
FRX	Fluorescência de Raio X
CP	Corpo de Prova

LISTA DE SÍMBOLOS

Ø	Diâmetro
%	Porcentagem
μ	Micro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo Geral	14
1.2	Objetivos Específicos	15
2	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1	Metalurgia do pó	16
2.1.1	<i>Características dos pós</i>	18
2.1.2	<i>Produção dos pós</i>	20
2.1.3	<i>Compactação</i>	20
2.1.4	<i>Sinterização</i>	23
3	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1	Materiais	26
3.1.1	<i>Caracterização do pó metálico</i>	26
3.2	Métodos	27
3.2.1	<i>Testes e ensaios preliminares</i>	28
3.2.2	<i>Compactação dos corpos de prova</i>	32
3.2.3	<i>Codificação, medição, preparação e microscopia do compactado verde</i>	33
3.2.4	<i>Sinterização dos corpos de prova</i>	37
3.2.5	<i>Medições, preparação e microscopia do corpo de prova sinterizado</i>	38
3.2.6	<i>Ensaio de dureza</i>	39
3.2.7	<i>Caracterização da física</i>	40
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1	Composição Química	42
4.2	Dureza - Testes Preliminares	42
4.3	Propriedades Físicas	43
4.3.1	<i>Variação mássica</i>	43
4.3.2	<i>Variação dimensional</i>	45
4.3.3	<i>Variação de densidade e porosidade</i>	47
4.4	Análises Microscópicas	50
4.5	Dureza	53
5	CONCLUSÃO	54
	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	55
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

No último século a metalurgia do pó tem se popularizado devido, principalmente, a seus baixos custos energéticos, alta produtividade, baixa perda de matéria prima além de bom controle dimensional e de propriedades, além de, por vezes, ser o único processo viável para a produção de algumas peças com materiais de alto ponto de fusão e geometrias complexas. Tal popularização, em muito, se deve ao crescimento da indústria automotiva, que tem, cada vez mais, substituído os processos tradicionais de fabricação pela metalurgia do pó, além da segunda grande guerra mundial e da guerra fria, que impulsionaram a pesquisa.

A metalurgia do pó é um processo de fabricação que consiste, em sua base, em compactar um pó ou mistura de pós, metálicos e/ou cerâmicos, em moldes com formato e dimensão aproximados ao da peça final, a uma certa pressão e em seguida aquecer o compactado a uma temperatura por um dado tempo e em seguida deixamos ele resfriar no forno. A esse processo de aquecimento e resfriamento, damos o nome de sinterização.

Através do controle dos pós utilizados é possível controlar a composição química com precisão e tendo em vista o fato de usarmos temperaturas inferiores ao ponto de fusão, reduzimos o gasto energético.

Apesar das inúmeras vantagens da metalurgia do pó, ela possui um grande problema, a estrutura da peça final fica com poros que podem fragilizar o produto final e a redução desses poros é um dos grandes objetivos das pesquisas em torno da metalurgia do pó.

É possível perceber diversos parâmetros que permeiam esse processo de fabricação em cada uma de suas etapas, entre eles podemos citar: tamanho e formato do pó utilizado, temperatura de sinterização, tempo de permanência nessa temperatura, entre outros. Esse trabalho tem por objetivo analisar os efeitos de um desses parâmetros: a pressão de compactação.

1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho estudou os efeitos que a pressão de compactação tem nas propriedades físicas e mecânicas de peças ferrosas processadas por metalurgia do pó, objetivando otimizar o processo.

1.2 Objetivos Específicos

Objetivando alcançar os objetivos gerais esse estudo tem como objetivos específicos:

- Determinar a melhor temperatura de sinterização para a faixa de pressão de compactação utilizada.
- Determinar a variação das propriedades físicas do material antes e após a sinterização, em cada pressão de compactação.
- Determinar a variação da dureza das amostras com cada pressão de compactação.
- Determinar a porosidade com cada pressão de compactação através de análises microscópicas.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Metalurgia do pó

De acordo com Braga *et al.* (2007) a metalurgia do pó (MP) é um processo de fabricação que visa produzir peças através de pós metálicos e/ou cerâmicos que são compactados e após isso submetidos a temperaturas abaixo do ponto de fusão do material em maior quantidade.

Processos similares à metalurgia do pó são praticados desde tempos pré-históricos, diversos artefatos produzidos utilizando tal técnica foram encontrados em Deli, no Egito e em Machu Picchu, comprovando tal fato. A metalurgia do pó moderna começou na década de 1920 com a produção de carboneto de tungstênio e de buchas de bronze auto lubrificantes. A segunda guerra mundial e a guerra fria foram grandes catalisadores para o desenvolvimento desse processo de fabricação, que vem continuamente se desenvolvendo desde então, por ser um processo econômico, rápido e, por muitas vezes, ser o único processo de fabricação viável para a produção de uma peça (UPADHYAYA, 2002).

Atualmente a metalurgia do pó tem um posto consolidado entre os processos de fabricação tendo diversas aplicações na indústria. Seu sucesso se dá tanto por razões tecnológicas quanto por motivos econômicos. A Tabela 1 mostra algumas das vantagens e desvantagens do processo (MORO; AURAS, 2007).

Tabela 1 - Vantagens e Desvantagens da Metalurgia do Pó

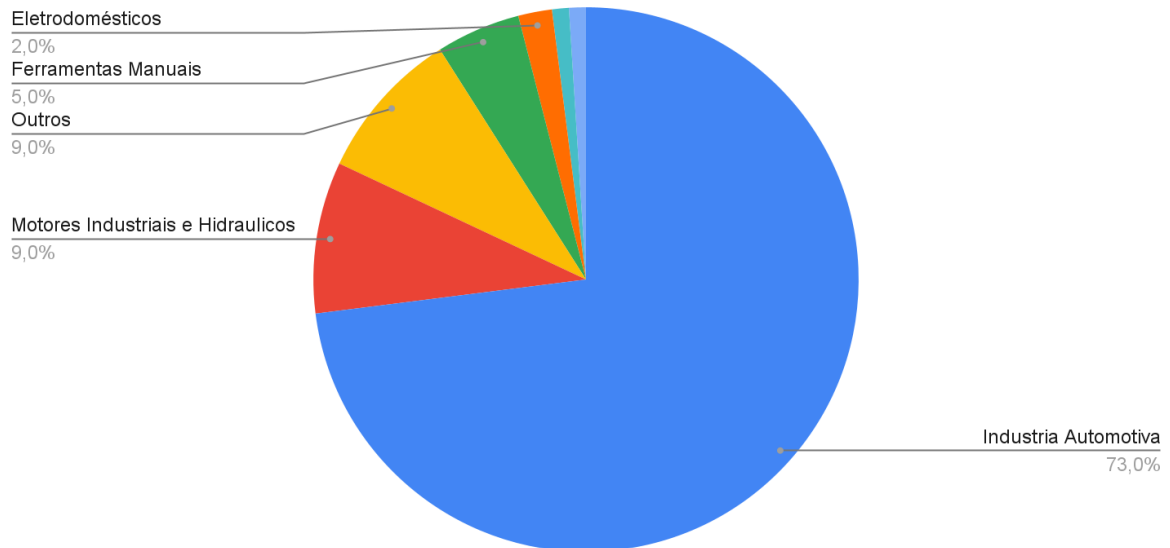
Vantagens	Desvantagens
Boa tolerância dimensional, dispensando operações posteriores de usinagem	Impede processo posterior de soldagem, devido ao comprometimento das propriedades físicas e químicas devido à porosidade da peça
Controle rigoroso da composição química	Alto custo inicial do ferramental, sendo necessária grandes produções para compensar o investimento
Perda mínima de matéria-prima	Tamanho e formato limitado das peças;
Homogeneidade estrutural e de propriedades	
Bom acabamento superficial	
Uso mais eficiente de energia	
Processo de fácil automação.	

Fonte: Adaptado de Moro e Auras (2007).

Panda, Jancik e Pandová (2016) sugerem que existem duas razões principais para o uso de tal processo de fabricação: o primeiro é a dificuldade de fabricar tais peças por outros métodos e o segundo são peças que são mais econômicas se produzidas por essa técnica.

Ainda segundo os autores, a indústria automotiva ocupa a primeira posição em aplicações da metalurgia do pó com aproximadamente 70% dos produtos ferrosos produzidos anualmente. O Gráfico 1 mostra a distribuição das peças fabricadas por metalurgia do pó.

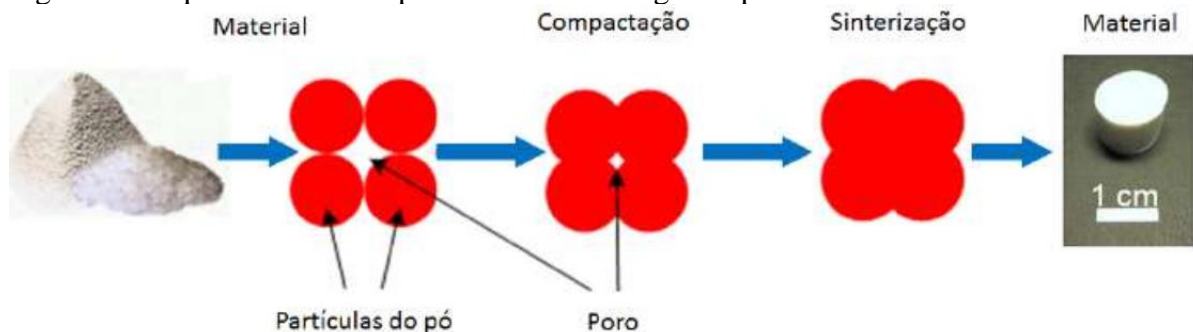
Gráfico 1 - Aplicações da Metalurgia do pó



Fonte: Adaptado de Panda, Jancik e Pandová (2016)

Brito, Medeiros e Lourenço (2007) afirmam que a metalurgia do pó é feita a partir da compactação de pós em moldes metálicos e posterior consolidação através do aquecimento controlado da peça compactada. Ao final do processo é obtida uma peça com boa precisão geométrica e dimensional, acabamento superficial adequado e com composição química e propriedades mecânicas uniformes e controladas.

Figura 1 - Esquema básico do processo de metalurgia do pó

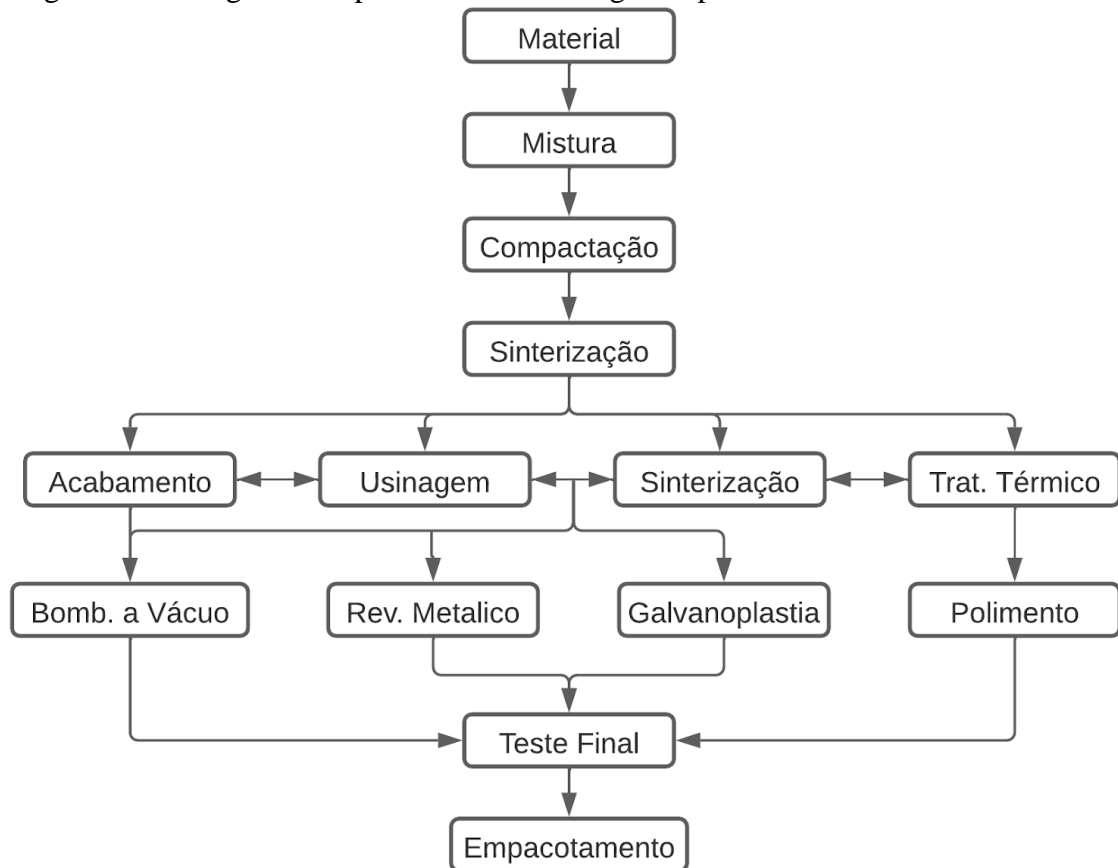


Fonte: Souza (2014).

O autor ainda especifica quatro etapas fundamentais para o processo: produção dos pós, mistura, compactação e a sinterização. Vale ressaltar que existem diversos outros

processos que podem ser aplicados durante a fabricação de peças por metalurgia do pó, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Fluxograma do processo da metalurgia do pó



Fonte: Adaptado de Panda (2016).

2.1.1 Características dos pós

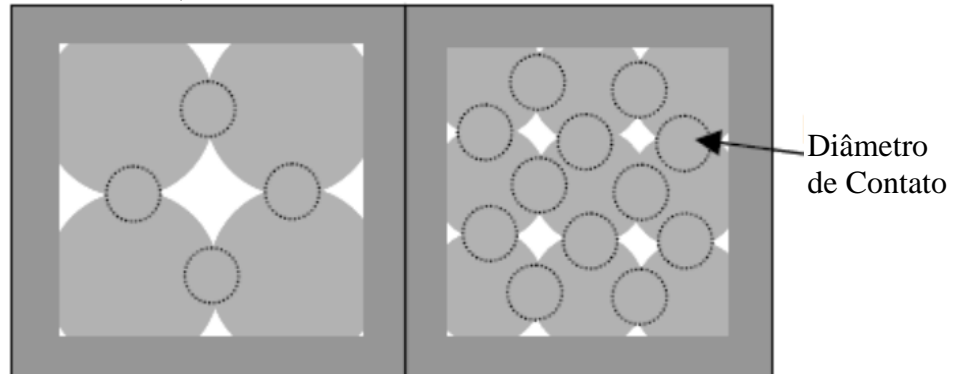
As características mais importantes dos pós são o tamanho, forma e distribuição do grão. (SCHAERER, 2006)

Segundo Lobo (2014), as partículas podem se apresentar em vários formatos e as formas mais comuns são acircular, dendrítica, fibrosa, granular, porosa, nodular, irregular e esférica. Ainda segundo o autor, maiores irregularidades no formato da partícula ocasionam uma maior área superficial específica livre para interação molecular durante a sinterização fazendo uma peça mais densa com propriedades mecânicas melhores.

O tamanho médio das partículas influencia diretamente no grau de compactação e na rugosidade superficial, partículas menores permitem uma maior compactação e acabamento superficial superior. (NUNES, 2003). O tamanho das partículas ainda tem influência sobre o excesso de energia livre do compactado, que é a força motriz do processo

de sinterização, entretanto, a maior influência do tamanho dos grãos é permitir o transporte de massa devido a menor distância entre a matéria que é o que mais influencia a cinética durante o processo de sinterização. Esse efeito é percebido na Figura 3. (GALLOTTO, 2005)

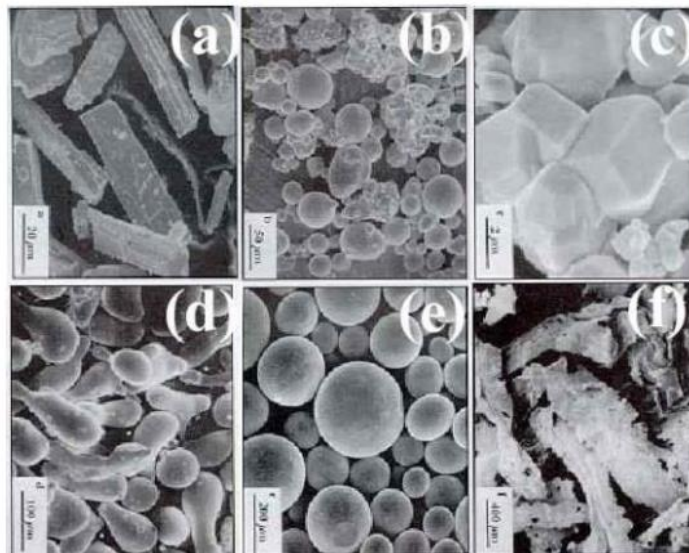
Figura 3 - Multiplicação dos pontos de contato por redução do tamanho médio de partícula. a) Partículas com diâmetro d ; b) Partículas com diâmetro $d/2$.



Fonte: Galiotto (2005).

A Figura 4 mostra alguns dos formatos dos grãos utilizados no processo da metalurgia do pó.

Figura 4 - Ilustração das diversas formas de partículas: a) Fibroso; b) Dendrítico; c) Poligonal; d) Arredondado; e) Esférica; f) Irregular



Fonte: Mourisco (2005).

2.1.2 Produção dos pós

Segundo Moro e Auras (2007), existem diversos processos de produção dos pós e cada um desses processos gera resultados diferentes dependendo do material que será transformado em pó. Dependendo do processo e material utilizados, pode-se produzir pós de diversos tamanhos e formas. Os autores ainda afirmam que os principais processos de produção de pós metálicos são: os métodos mecânicos, *cold-Stream*, atomização, processos de redução química e processo de eletrólise. A Tabela 2 evidencia detalhes sobre os processos.

Tabela 2 - Processos de Produção de Pós

Processos de Produção de Pós	
Métodos Mecânicos	Indicado para materiais frágeis ou fragilizados por algum processo anterior, consiste em fragmentar o material com o auxílio de martelos ou moinhos até um determinado tamanho de partícula. Os moinhos mais comuns são de bolas, vibratórios e de atrito.
Cold-Stream	Aumenta a fragilidade dos metais em temperaturas baixas para sua transformação em pó. O pó ainda grosseiro é arrastado por um fluxo de gás sob alta pressão, através de um tubo, alcançando uma câmara grande, que é mantida sob vácuo. Ao atingir a câmara, o gás sofre uma expansão com conseqüente diminuição brusca de temperatura. O pó em alta velocidade, colide com um alvo instalado dentro da câmara, e como encontra-se relativamente frágil por causa da baixa temperatura, partem-se em partículas menores. O pó que já apresenta um tamanho suficientemente pequeno é separado da fração gasosa, a qual é novamente reconduzida ao processo.
Atomização	Neste processo o metal fundido é vazado através de um orifício apropriado a essa operação, formando um filete líquido que é atacado por jatos de ar (processo R-Z / Roheisen-Zunder), gás (processo ASEA-STORA que utiliza o argônio e o nitrogênio, ou processo CSC/Centrifugal Shot Casting) ou água. Esses jatos provocam a pulverização do filete e seu imediato resfriamento. O pó recolhido é reduzido e peneirado, estando pronto para ser usado. O tamanho e a forma das partículas variam em função de vários parâmetros, entre os quais destacam-se: a espessura do filete, a pressão do fluido, a geometria do conjunto de pulverização e evidentemente, o tipo de atomização. A atomização a água normalmente conduz a partículas irregulares e angulosas, enquanto que a atomização ao ar produz partículas mais esferoidais.
Processos de Redução Química	Os processos de redução de compostos de metais com agentes redutores gasosos ou sólidos representam o grupo de processos mais significativos para obtenção de pós. Os agentes redutores mais utilizados são o carbono e o hidrogênio. A redução com o carbono só é utilizável para elementos metálicos que não formam carbonetos muito estáveis a não ser que deseja-se obter pó de carboneto como produto final e não o pó metálico, como no caso o carboneto de tungstênio, que pode ser reduzido e carbonetado num só tratamento. A redução com carbono é principalmente utilizada para o ferro, no caso pelo processo Höganäs.
Processo de eletrólise	Os pós produzidos por esse processo, apresentam elevada pureza, baixa densidade aparente e tem grãos de estrutura nitidamente dendrítica. Após recolhido dos tanques de eletrólise, a massa de pó sob a forma de uma lama é secada e classificada por peneiramento.

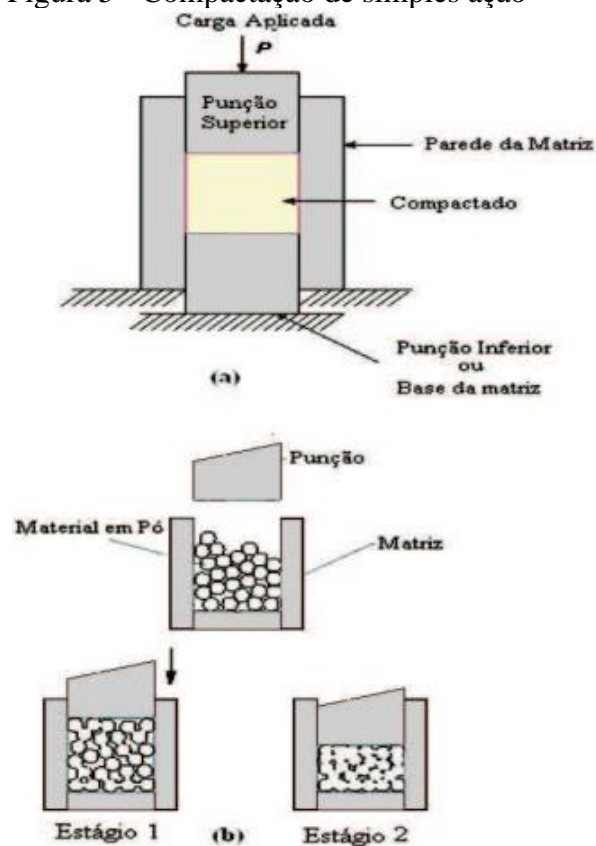
Fonte: Adaptado de Moro e Auras (2007).

2.1.3 Compactação

A etapa de compactação tem por objetivo transformar o pó em uma estrutura consolidada com geometria e dimensões próximas às finais da peça, reduzindo a porosidade do material e permitindo o manejo em operações futuras. (UPADHYAYA, 2002). Em materiais dúcteis (normalmente metálicos) ocorre ainda uma grande densificação devido a deformação plástica, já em materiais duros (geralmente cerâmicos) ocorre somente uma reorganização das partículas e a densificação ocorre principalmente durante a sinterização. (GALIOTTO, 2005)

Segundo Shaerer (2006), a compactação em matriz rígida, técnica mais utilizada para a compactação dos pós na metalurgia do pó, consiste da aplicação de um carregamento uniaxial em uma massa de pó que é inserida em um molde de geometria definida e com forma e dimensões similares à da peça final. A Figura 5 ilustra o processo.

Figura 5 - Compactação de simples ação



Fonte: Shaerer (2006).

A pressão de compactação é um parâmetro extremamente relevante durante o processo da metalurgia do pó, contribuindo no adensamento do compactado verde e reduz os efeitos das contrações que ocorrem durante o processo de sinterização. Para metais as pressões de compactação em geral são altas, variando normalmente de 450 a 600 MPa. (GALIOTTO, 2005).

De acordo com Lobo (2014), os poros da estrutura funcionam como concentradores de tensão contribuindo substancialmente para a ruptura da peça. O aumento da pressão de compactação contribui com a redução desses poros contribuindo com a melhoria das propriedades mecânicas do produto final.

A Tabela 3 traz algumas recomendações de pressões de compactação para diversos materiais e correlaciona isso com as suas razões de compactação.

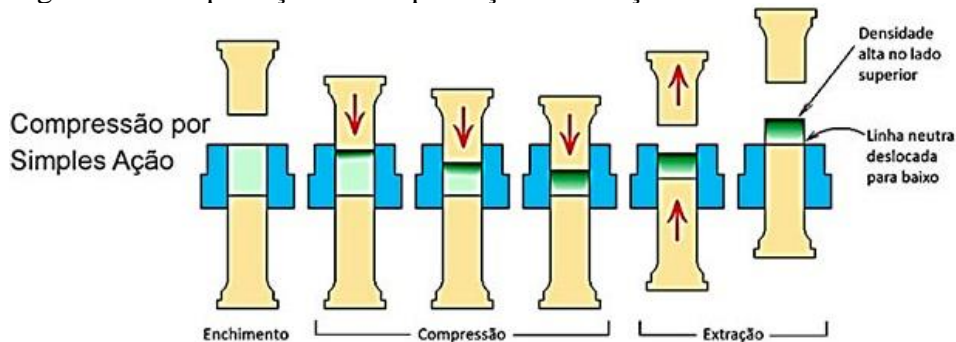
Tabela 3 - Pressão de compactação e razão de compactação para diversos materiais

Material	Pressão de Compactação		Razão de Compactação
	tsi	N/mm ²	
Aluminio	5-20	70-280	1,5 a 1,9:1
Latão	30-50	415-690	2,4 a 2,6:1
Bronze	15-20	205-230	2,5 a 2,7:1
Escovas de Cobre-Grafite	25-30	345-415	2,0 a 3,0:1
Insertos para Usinagem	10-30	140-415	2,0 a 3,0:1
Ferrites	8-12	110-165	3,0:1
Mancais de Ferro Fundido	15-25	205-345	2,2:1
Peças de Aço:			
Baixa Densidade	25-30	345-415	2,0 a 2,4:1
Média Densidade	30-40	415-550	2,1 a 2,5:1
Alta Densidade	35-60	430-825	2,4 a 2,8:1
Núcleos de Pó de Ferro	10-50	140-690	1,5 a 3,5:1
Tungstênio	5-10	70-140	2,5:1
Tântalo	5-10	70-140	2,5:1

Fonte: Adaptado de Upadhyaya (2002).

De acordo com Upadhyaya (2002), a compressão de pós não funciona da mesma forma que a dos fluidos, visto que não é possível uma distribuição homogênea do carregamento aplicado em todo o pó assim como não é possível uma distribuição homogênea do pó. Isso faz com que o adensamento do pó que está mais próximo ao punção é superior às regiões mais afastadas fazendo que não haja uma densidade uniforme nas peças finais, isso se deve, principalmente, pelo atrito que ocorre entre as partículas e entre as partículas e o molde. Ainda segundo o autor, tal problema pode ser reduzido utilizando técnicas alternativas de compactação, ferramentas específicas e uso de lubrificantes que não contaminem o material. A Figura 6 ilustra tal fenômeno.

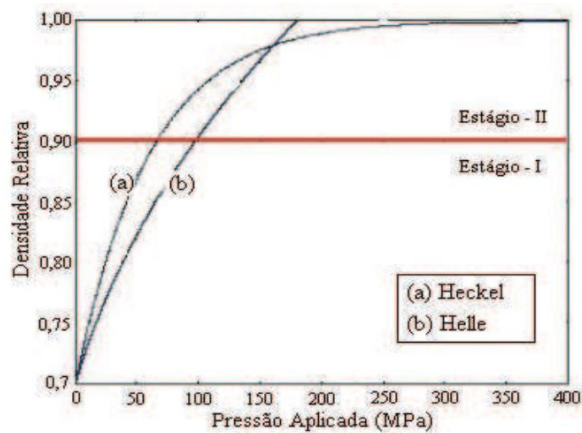
Figura 6 - Compactação de simples ação – Variação de densidade



Fonte: Shaerer (2006).

De acordo com Lippmann et al. (1997), a compactação é em geral, dividido em dois estágios um de baixa densidade relativa com densidade abaixo de 0,9 e um segundo estágio com densidade relativa a partir de 0,9. No primeiro estágio ocorre o rearranjo das partículas e o crescimento localizado dos pescoços enquanto no segundo estágio ocorre o fechamento dos canais e consequente isolamento dos poros, promovendo mais coesão ao corpo formado. O Gráfico 2 relaciona a pressão aplicada com densidade relativa. As curvas mostradas foram obtidas por Heckel(1985) e Helle *et al* (1985) e mostram o comportamento da pressão durante os dois estágios de compactação.

Gráfico 2 - Pressão Aplicada x Densidade Relativa



Fonte: Shaerer (2006).

2.1.4 Sinterização

Para Upadhyaya (2002), a sinterização pode ser considerada um processo pelo qual partículas compactadas ou simplesmente confinadas em um contêiner são aquecidas a temperaturas abaixo do ponto de fusão (em geral aproximadamente 70% da temperatura de fusão) que promovem a união química da peça. A Tabela 4 lista as faixas de temperatura de sinterização para diversos materiais assim como seus tempos de permanência no forno.

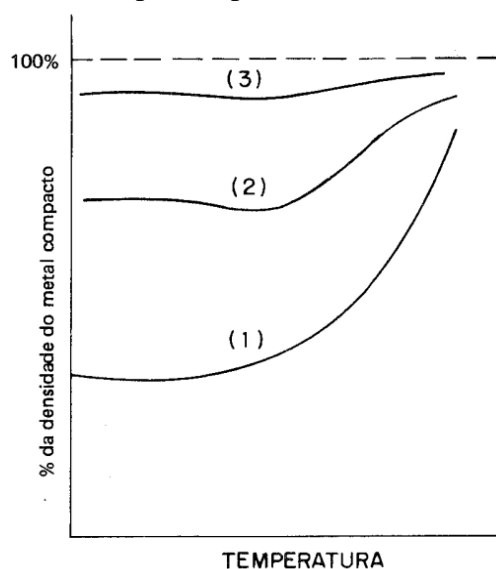
Tabela 4: Temperatura e tempo de sinterização

Material	Temperatura (°C)	Tempo (min)
Alumínio	595 – 625	10 – 30
Bronze	760 – 860	10 – 20
Cobre	840 – 900	12 – 45
Latão	840 – 900	10 – 45
Ferro / Ferro Grafita	1000 – 1150	8 – 45
Níquel	1000 – 1150	30 – 45
Aço Inox	1090 – 1290	30 – 60
Imãs Alnico	1215 – 1300	120 – 150
Metal Duro	1425 – 1480	20 – 30

Fonte: (GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009).

O Gráfico 3 representa a variação da densidade relativa da peça em relação à temperatura de sinterização.

Gráfico 3 - Variação da densidade em função da temperatura de Sinterização. Curva 1: Pó amontoado; Curva 2: pó compactado a 4t/cm²; Curva 3: pó compactado a 30 t/cm².



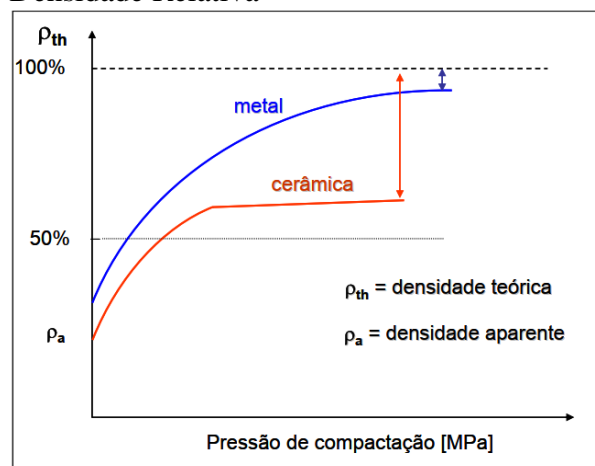
Fonte: Chiaverini (1986).

A sinterização é um tratamento térmico que, através do transporte de matéria ativado termicamente, resulta na redução da energia livre superficial do conjunto das partículas. Tal redução se deve à diminuição do volume dos poros, fazendo com que haja uma maior interação entre as partículas que compõem a peça, formando um corpo sólido e contínuo.

Segundo Brito, Medeiros e Lourenço (2007), existem basicamente dois tipos de sinterização: a sinterização por fase sólida, que ocorre com toda a mistura na fase sólida e a sinterização por fase líquida, no qual ocorre a formação de líquido na estrutura, seja pela fusão de algum componente secundário ou pela reação entre alguns desses componentes. O tipo de sinterização influencia diretamente nos fenômenos de transporte que contribuem para tal processo, alterando o produto final. Sinterização por fase sólida gera uma estrutura com porosidade controlada, enquanto sinterização por fase líquida facilita o fechamento total dos poros.

É válido ressaltar que devido a redução dos vazios durante o processo de sinterização ocorre um adensamento do material. Tal efeito se torna menos perceptível em materiais metálicos, visto que esses possuem um comportamento dúctil em geral, que permite que na fase de compactação haja um melhor adensamento das partículas devido a deformação plástica que ocorre nesse processo. Em materiais cerâmicos, por sua vez, a maior parte da densificação ocorre durante a sinterização. (GALIOTTO, 2005). O Gráfico 4 ilustra essa diferença de comportamento.

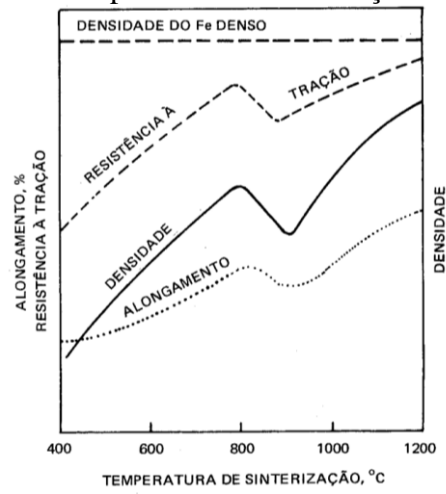
Gráfico 4 - Pressão de compactação x Densidade Relativa



Fonte: Galiotto (2005).

De acordo com Chiaverini (1986), a resistência à tração e a dureza tendem a melhorar com o aumento da temperatura de sinterização e com o tempo de permanência nessa temperatura até determinados limites. O Gráfico 5 ilustra a variação de algumas propriedades mecânicas, em compactados de ferro, em função da temperatura de sinterização.

Gráfico 5: Variação de propriedades mecânicas x temperatura de sinterização



Fonte: Chiaverini (1986).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Doravante serão detalhados os equipamentos, instrumentos e insumos utilizados na produção desse trabalho, além das técnicas, normas e processos realizados durante o estudo.

3.1 Materiais

3.1.1 Caracterização do pó metálico

O pó metálico usado nesse trabalho foi doado pela empresa Brats Indústria e Comércio de Produtos Metálicos Especiais. A Figura 7 mostra o pó utilizado nesse trabalho.

Figura 7 – Pó de Ferro



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Durante essa etapa procurou-se descobrir quais elementos e em qual concentração eles estavam presentes no pó metálico além de sua granulometria.

Para isso foi feita uma espectrometria de emissão ótica. Foi utilizado o espectrômetro de emissão ótica, modelo PDA 7000, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais do departamento de engenharia metalúrgica e de materiais da UFC campus do Pici.

A espectrometria de emissão ótica é uma técnica não destrutiva que permite a identificação quantitativa e qualitativa a composição química de uma amostra. A Figura 8

mostra o espectrômetro utilizado durante essa etapa.

Figura 8: Espectrômetro de emissão ótica – PDA 7000



Fonte: Elaborado pelo autor.

Foi feita ainda uma determinação da composição granulométrica do material através de peneiras granulométricas da marca TPL Tamis pertencentes ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos, seguindo a norma NM 248:2001, tendo sido possível determinar que o material possui granulometria inferior a $75\ \mu\text{m}$. A Figura 9 mostra as peneiras granulométricas utilizadas no ensaio.

Figura 9 – Peneiras granulométricas da marca TPL Tamis



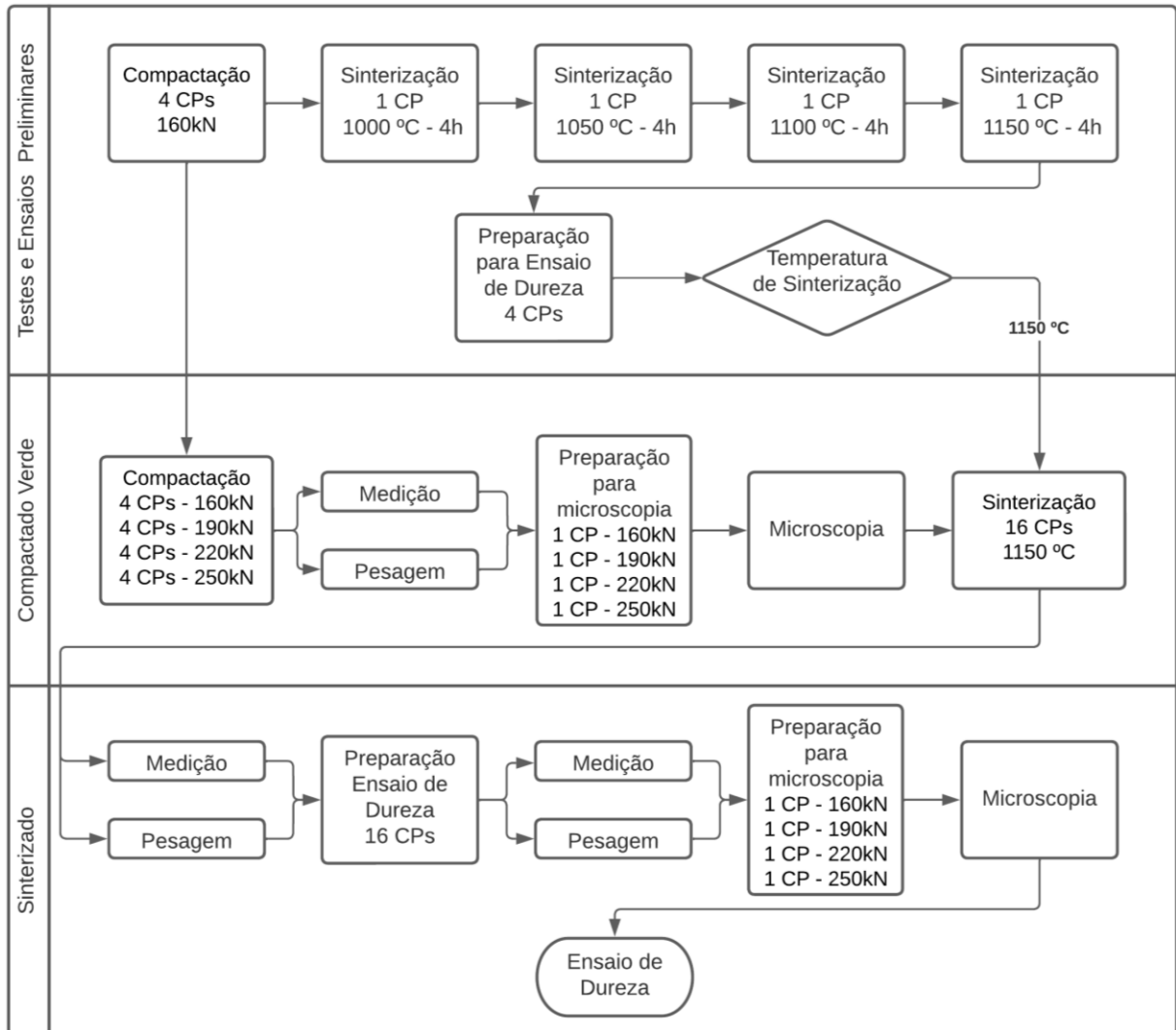
Fonte: Elaborado pelo autor.

O ensaio granulométrico baseia-se em verificar o percentual de pó que está sendo retido em cada peneira, sendo possível assim, identificar o percentual de partículas em cada faixa de tamanho.

3.2 Métodos

O método aplicado nesse trabalho está representado na Figura 10 e todas suas etapas serão descritas e explicadas nessa sessão.

Figura 10 – Fluxograma do estudo realizado



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2.1 Testes e ensaios preliminares

Com o intuito de determinar a melhor temperatura de sinterização para o material, na faixa de pressão utilizada, foram feitos quatro corpos de prova com a menor pressão de compactação do estudo. Visto que peças com menores pressões necessitarão de maiores temperaturas para que os fenômenos de transporte que ocorrem durante o processo de sinterização ocorram adequadamente e uma vez que a temperatura seja satisfatória para a

menor pressão, essa também deve ser satisfatória para as pressões superiores. Tal fenômeno pode ser percebido pelos Gráficos 3 e 5.

A compactação foi feita utilizando uma máquina universal de ensaios EMIC, modelo DL 300000 que possui carga máxima de 300kN, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais e Ensaios Mecânicos da UFC campus Russas. A Figura 11 mostra a máquina em questão

Figura 11 – Máquina universal de ensaios EMIC DL 300000



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Tal equipamento tem como função principal fazer ensaios de tração, compressão, flexão entre outros. A compactação dos CPs foi feita a partir do *script* de um ensaio de compressão adaptado, utilizando como um dos parâmetros de parada a força máxima aplicada, essa força sendo a força de compactação desejada.

Os corpos de prova foram compactados com uma força de compactação teórica de 160 kN utilizando a máquina universal de ensaios, gerando uma pressão de compactação teórica de 314,77 MPa. A compactação ocorreu a uma velocidade de 4 mm/min.

Durante a retirada da peça do molde, pôde ser medida uma força entre 19 e 23 kN que prendia a peça em questão ao molde, tal força é atribuída ao atrito da peça com a parede do molde assim como do macho do molde com a parede do mesmo. Sendo assim, não é possível determinar com acuracidade a força e pressão reais exercidas no corpo de prova.

Para a redução de tal força seria aconselhável o uso de lubrificantes orgânicos que não contaminassem a amostra, mas dado a carência de tal produto, o estudo foi feito sem a

utilização do mesmo.

Após a compactação, foram obtidos quatro compactados verdes com medidas aproximadas de $\varnothing 25,4 \times 9,5$ mm prontas para serem sinterizadas.

Figura 12 – Compactados verde – Ensaios preliminares



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Cada um dos compactados verdes foi sinterizado individualmente com uma temperatura diferente, sendo elas: 1000 °C, 1050 °C, 1100 °C e 1150 °. Tais temperaturas foram selecionadas como indicado na Tabela 4.

A etapa de sinterização foi feita através de um forno mufla fabricado pela empresa Linn Electrotherm, modelo KK-170, que possui temperatura máxima de 1340 °C e capacidade de 166 l, pertencente ao Laboratório de Soldagem da UFC campus Russas. A Figura 14 mostra o forno em questão.

Figura 13 – Forno mufla modelo KK-170



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A sinterização ocorreu colocando as peças no forno ainda em temperatura ambiente, em seguida esse forno foi aquecido até a temperatura de sinterização e foi mantido em tal temperatura durante 4 horas, esse tempo foi selecionado com o objetivo de saturar a influência do tempo no processo.

Após a sinterização, com o objetivo de realizar o ensaio de dureza, foi retirada a camada de óxido gerada durante a sinterização, a camada de óxido foi retirada através de martelamento, visto que tal camada tem um comportamento frágil. Em seguida foi feito o lixamento das peças.

O ensaio de dureza foi utilizado para determinar a melhor temperatura de sinterização, visto que peças melhores sinterizadas tendem a apresentar propriedades mecânicas melhores, em específico durezas mais elevadas.

A medição da dureza dos CPs foi realizada através de um durômetro analógico de bancada Rockwell da marca SUSSEN WOLPERT modelo TESTOR HT1 pertencente ao Laboratório de Ensaios Mecânicos do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFC campus do picí. A Figura 14 mostra o equipamento utilizado.

Figura 14: Durômetro de bancada analógico Rockwell – SUSSEN WOLPERT TESTOR HT1



Fonte: Júnior (2022).

Os durômetros tem por objetivo determinar a dureza do material. O durômetro utilizado permite a medição em diversas escalas Rockwell e Brinell.

Foram feitas 5 indentações em cada CP e foram calculados os desvios padrões e a média. A Figura 15 mostra as peças que foram ensaiadas.

Figura 15 – CPs sinterizados, lixados e indentados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2.2 Compactação dos corpos de prova

Visto que o principal objetivo desse estudo é descobrir a influência da pressão de compactação nas peças fabricadas por metalurgia do pó, foram feitos corpos de prova com 4 forças de compactação e foram feitos 4 CPs com cada uma dessas forças, totalizando 16 corpos de prova. A Tabela 5 mostra as principais informações dos corpos de prova.

Tabela 5 – Peças sinterizadas

Nº	Força (kN)	Pressão (mPa)	Ø Molde (mm)	Nº de CPs
1	160	315,8	25,4	4
2	190	375,0	25,4	4
3	220	434,2	25,4	4
4	250	493,4	25,4	4

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As forças de compactação utilizadas nesse estudo levaram em conta a carga máxima aplicável pela máquina que é de 300 kN e a Tabela 3.

A compactação dos corpos de prova foi feita utilizando um molde cilíndrico no qual eram alojados 30 g de pó de ferro, para cada corpo de prova, e em seguida essa massa de pó era compactada a uma velocidade de 4 mm/min até a força desejada para o corpo de prova. A Figura 16 mostra o molde utilizado.

Figura 16 – Molde cilíndrico



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Visto que o macho era feito em aço ABNT 1020 e que as forças que seriam utilizadas para a compactação gerariam tensões superiores a tensão de escoamento do material e que por consequência deformariam a peça permanentemente, foi feito um segundo macho feito em aço ABNT 1045 trefilado. A Figura 17 mostra parte do processo de fabricação do macho utilizado junto ao molde.

Figura 17 – Macho do molde cilíndrico



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Assim como nos testes preliminares, foram observadas forças de atrito durante a retirada que nos impede de saber com exatidão a força aplicada, tal fator foi previsto durante a preparação, entretanto devido a falta de disponibilidade de lubrificante adequado e tendo em vista que o objetivo do estudo é apenas averiguar qual a influência do aumento da pressão de compactação nas propriedades das peças feitas por metalurgia do pó, esse fator não foi considerado relevante.

Após a compactação, foram obtidos 16 compactados verdes, mostrados na Figura 18, com diâmetro aproximado de 25,4 mm e alturas que variavam de entre 8,6 mm e 9,6 mm prontas para serem sinterizadas.

Figura 18 – Compactados Verde – CPs finais



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

3.2.3 Codificação, medição, preparação e microscopia do compactado verde

Os corpos de prova fabricados foram codificados com um código na forma CPXY onde X é um número que varia de 1 a 4 e indica a força de compactação utilizada no CP tendo sido em ordem 160, 190, 220 e 250 kN, a Tabela 5 correlaciona o número a força utilizada. Já Y é o número do corpo de prova.

Após a compactação, foram feitas medições dimensionais e de massa dos CPs, cada medição foi feita 3 vezes e a média das medições foi utilizada para os cálculos de volume e densidade.

A medição do diâmetro externo dos corpos de prova foi feita através de um paquímetro universal digital da marca Zaas Precision modelo ZAAS – 01,0013, o paquímetro em questão pertence ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos. A Figura 19 mostra o equipamento utilizado.

Figura 19 – Paquímetro universal digital ZAAS Precision ZAAS – 01,0013



Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento possui curso de 200 mm resolução de 0,01mm e exatidão de $\pm 0,02$ mm.

A medição da altura dos corpos de prova foi feita através de um micrômetro analógico externo da marca Kingtools modelo KINGTOOLS-503000, o micrômetro em questão pertence ao Laboratório de Física Experimental da UFC campus Russas. A Figura 20 mostra o equipamento utilizado.

Figura 20 – Micrometro analógico Kingtools 0-25x0,01mm

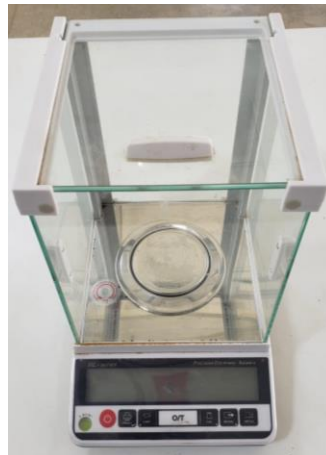


Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento possui uma faixa de medição de 0 a 25mm, resolução de 0,01mm e exatidão de $\pm 0,004$ mm.

A medição da massa dos corpos de prova foi feita através de uma balança de precisão da marca Ohaus modelo Adventurer AX523, a balança em questão pertence ao Laboratório de Materiais de Construção e Mecânica dos Solos. A Figura 21 mostra o equipamento utilizado.

Figura 21 – Balança de precisão da marca Ohaus modelo Adventurer AX523



Fonte: Elaborado pelo autor.

O instrumento possui uma faixa de medição de 0 a 520 g, resolução de 0,001g, repetibilidade: $\pm 0,001$ mm e linearidade: $\pm 0,002$ mm.

Após as medições, as peças passaram por uma preparação para posterior visualização no microscópio. Tal preparação se baseia em um lixamento usando diversas lixas com granulometrias que aumentam gradativamente, e finalização com o polimento. Esse

procedimento tem como objetivo a redução dos riscos presentes nas peças de tal forma que eles não possam ser vistos quando a peça é visualizada no microscópio.

A preparação dos CPs para a o ensaio de dureza assim como para a microscopia foi feita na politriz metalográfica modelo aropol E.D. da empresa Arotec, pertencente ao Laboratório de Caracterização de Materiais e Ensaio Mecânicos da UFC campus Russas.

Figura 22 – Politriz metalográfica - Arotec aropol E.D.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As politrizes metalográficas são compostas por motores rotativos acopladas a pratos nos quais são fixadas lixas ou panos para polimento que permitem preparar a superfície de peças metálicas para que possam ser visualizadas em microscópios.

O lixamento foi feito utilizando lixas com granulometria de 80, 220, 320, 400 e 600. Já o polimento foi feito com alumina em suspensão de 1 e 0,3 μm . Tal preparação metalográfica foi feita nos corpos de prova: CP11, CP21, CP31 e CP41. A Figura 23 mostra a amostra polida e pronta para visualização no microscópio.

Figura 23 – CP polido



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A análise microscópica tem por objetivo visualizar e quantificar os poros das amostras, em específico em averiguar como a pressão de compactação influencia no número e tamanho deles, além de comparar com os corpos de prova sinterizados. Durante essa etapa foram tiradas fotos utilizando o microscópio óptico.

Para a análise microscópica foi utilizado um microscópio óptico trinocular invertido fabricado pela empresa Olympus modelo GX41 com iluminador LG-PS2 (Figura 24) pertencente ao laboratório de microscopia da UFC campus Russas. O microscópio em questão permite ampliações de 50, 200, 500 e 1000 vezes.

Figura 24 – Microscópio óptico trinocular invertido - Olympus GX41 com iluminador - Olympus LG-PS2



Fonte: Elaborado pelo autor.

Utilizando o microscópio foram feitas 10 imagens com cada ampliação para que posteriormente a porosidade pudesse ser quantificada.

3.2.4 Sinterização dos corpos de prova

A sinterização ocorreu de maneira simultânea nessa etapa, todos os corpos de prova foram sinterizados no forno mufla em temperatura ambiente, o forno então foi aquecido até a temperatura que foi definida através dos testes, e permaneceram nele por 4h após alcançar essa temperatura.

Figura 25 – CPs Sinterizados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Após a sinterização, as amostras apresentaram uma coloração acinzentada e uma camada de material frágil que era esperada devido ao processo de oxidação que ocorre em materiais ferrosos quando expostos a altas temperaturas em ambientes ricos em oxigênio. Tal camada foi retirada através de martelamento de maneira similar ao ocorrido durante os testes preliminares.

3.2.5 Medições, preparação e microscopia do corpo de prova sinterizado

Essa etapa ocorreu de maneira similar ao tópico 3.2.3, nela os corpos de prova foram medidos e pesados após a sinterização ainda com a camada de óxido neles e também foram medidos após a retirada dessa camada.

Em seguida todos os corpos de prova foram lixados em ambas as faces com lixas 80 mesh, com o objetivo de medir a dureza das amostras. Ao final do lixamento dos 16 corpos de prova, os mesmos 4 corpos de prova que haviam sido preparados para a visualização no microscópio, foram novamente lixados e polidos utilizando o mesmo procedimento, para comparar a porosidade entre os CPs.

Figura 26 – CP sinterizado e lixado



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Novamente as peças preparadas foram levadas ao microscópio trinocular invertido para serem feitas imagens da peça de maneira similar a etapa 4, 10 imagens com cada ampliação, com o objetivo de comparar a porosidade dos CPs de diferentes pressões de compactação após a sinterização, além de verificar a diferença de porosidade das peças antes e após a sinterização.

De posse de todas as fotos das amostras, foram feitas análises utilizando o programa ImageJ com o objetivo de definir o percentual da área coberto de poros e a quantidade de poros existentes.

O *software* ImageJ divide a foto baseado nas cores da presentes nas amostras permitindo identificar o percentual de cada cor e nesse caso o percentual de poros naquela sessão transversal da peça.

Utilizando tal função, iniciou-se o processamento das imagens em com todas as ampliações, entretanto as imagens com ampliação de 500x e 1000x, por apresentarem partes excessivamente escuras mesmo em regiões sem poros, o software não conseguiu identificar corretamente o percentual de poros, portanto tais ampliações foram descartadas nessa análise.

3.2.6 Ensaio de dureza

O ensaio de dureza foi escolhido por permitir identificar de maneira fácil e ágil, apesar de não definitiva, a mudança completa nas propriedades do material visto que, em geral, materiais com maior dureza possuem maiores tensões de escoamento e ruptura, além de menores tenacidades. Dessa forma, podemos averiguar a variação das propriedades dos CPs submetidos a diferentes pressões de compactação.

Nessa etapa foi medida a dureza de cada um dos corpos de prova utilizando o durômetro da Figura 14 com a configuração para Rockwell C seguindo as diretrizes da norma NBR 6508-1.

O ensaio foi feito com um penetrador cônico de diamante com uma carga constante de 150 kgf aplicada durante 10 segundos. Antes da utilização da máquina foram feitas duas aferições de sua funcionalidade com dois blocos padrão um com uma dureza aproximada de 22,3 HRC, durante essa aferição a máquina apresentou um resultado aproximado de 22 HRC, e outro com dureza aproximada de 63 HRC, durante essa aferição a máquina apresentou um resultado aproximado de 62,5 HRC, tendo sido considerado um erro aceitável para tal equipamento.

Figura 27 – Bloco padrão Rockwell C



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Para cada amostra foram feitas 5 indentações e a partir dos resultados foram calculados as médias e os desvios padrões utilizados nas comparações posteriores.

Figura 28 – CPs sinterizados, lixados e indentados



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

3.2.7 Caracterização da física

3.2.7.1 Variação mássica

Durante o processo de sinterização é comum ocorrer uma variação na massa dos corpos de prova, seja pela eliminação de algum elemento aglutinante, lubrificante ou mesmo de umidade. Ainda é possível que, dependendo da atmosfera e do material utilizado, haja alguma reação química durante a sinterização, podendo o corpo ganhar massa. Para calcular a variação volumétrica foi utilizada a Equação 1.

$$V_m = \frac{m_f - m_i}{m_i} \times 100 \quad (1)$$

Onde V_m é a variação mássica percentual, m_f é a massa final, após a sinterização e

m_i é a massa inicial.

3.2.7.2 *Variação dimensional*

Durante a sinterização é esperado que a porosidade dos corpos de prova seja reduzida devido aos fenômenos de transporte ocorridos durante esse processo consequentemente aumentando a densidade e reduzindo o volume das peças.

A variação dimensional foi calculada através da Equação 2 a seguir

$$V_d = \frac{v_f - v_i}{v_i} \times 100 \quad (2)$$

Onde V_d é a variação dimensional percentual, v_f é o volume final, após a sinterização e v_i é o volume inicial.

3.2.7.3 *Porosidade*

Como foi dito no tópico anterior, durante a sinterização é esperado que os poros sejam reduzidos e consequentemente aumentando sua densidade. Densidade foi calculada a partir das medidas aferidas nos corpos de prova e a para calculo da porosidade será usada a Equação 3.

$$P = \frac{d_t - d_c}{d_t} \times 100 \quad (3)$$

Onde P é a porosidade percentual, d_t é a densidade teórica do material e d_c é a densidade calculada.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Composição Química

Através da espectrometria de emissão ótica foi determinado que o pó em questão tem como principal elemento o ferro, com os demais elementos identificados agindo como elementos de liga melhorando as propriedades mecânicas e químicas do material. A Tabela 6 mostra a composição química completa do material.

Tabela 6 – Composição química do pó metálico utilizado

Elemento	Porcentagem(%p)
Fe	99,16%
Mn	0,30%
Cr	0,15%
Si	0,14%
Ni	0,08%
C	0,08%
Mo	0,05%
Cu	0,02%
Al	0,02%
S	0,01%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tendo em vista que o carbono está em uma porcentagem acima de 0,008 %p essa liga ferrosa se caracteriza como aço. É possível ainda perceber que a composição dessa amostra é muito similar a do aço ABNT 1010.

4.2 Dureza - Testes Preliminares

Os testes preliminares tem por principal finalidade determinar a temperatura de sinterização através da comparação das durezas mediadas nas peças com sinterizadas em diversas temperaturas.

Os resultados obtidos no ensaio de dureza estão retratados na Tabela 7.

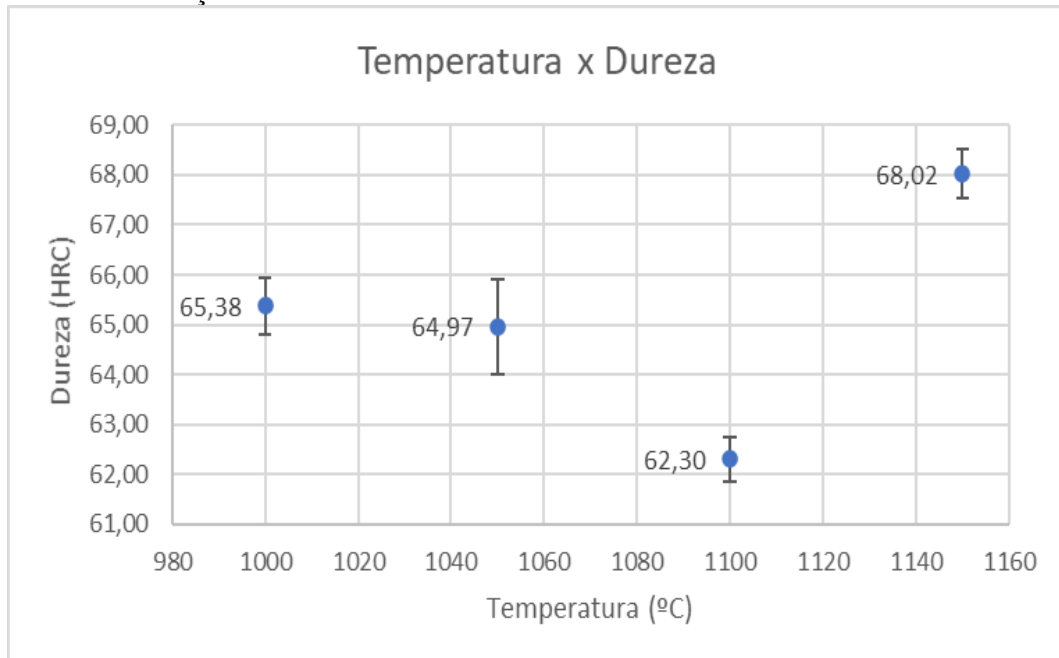
Tabela 7 – Peças sinterizadas – Ensaio de dureza

Temp. (°C)	Identações (HRC)					Média	Desvio
	1	2	3	4	5		
1000	65	65	66	64,9	66	65,4	0,567
1050	64	65,2	65,9	65,9	65	65,0	0,950
1100	62,2	62,1	62	62,1	63,1	62,3	0,453
1150	68	67,3	68,1	68,7	68	68,0	0,497

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da Tabela 7 foi plotado o Gráfico 6.

Gráfico 6 – Peças sinterizadas – Ensaio de dureza



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Percebe-se que a temperatura que produziu a maior dureza foi a de 1150 °C, sendo assim a sinterização das demais peças foi feita nessa temperatura.

4.3 Propriedades Físicas

4.3.1 Variação mássica

A Tabela 8 apresenta a variação mássica dos corpos de prova antes da sinterização e após a sinterização.

Tabela 8 – Variação mássica

Dados			Massa (g)		VM (%)	VM Média (%)	Desvio Padrão
CP	Força (kN)	Pressão(mPa)	Verde	Sinterizado			
CP11	160	314,8	29,562	34,617	17,10%	16,3%	0,5%
CP12	160	314,8	30,061	34,817	15,82%		
CP13	160	314,8	29,950	34,709	15,89%		
CP14	160	314,8	29,981	34,926	16,49%		
CP21	190	373,8	29,684	34,158	15,07%	15,4%	0,3%
CP22	190	373,8	29,856	34,417	15,28%		
CP23	190	373,8	29,922	34,664	15,85%		
CP24	190	373,8	29,902	34,534	15,49%		
CP31	220	432,8	29,159	33,310	14,24%	15,0%	0,6%
CP32	220	432,8	29,455	33,858	14,95%		
CP33	220	432,8	29,652	34,013	14,71%		
CP34	220	432,8	29,752	34,490	15,92%		
CP41	250	491,8	29,636	33,046	11,51%	13,7%	1,3%
CP42	250	491,8	29,888	34,314	14,81%		
CP43	250	491,8	29,898	34,119	14,12%		
CP44	250	491,8	29,933	34,264	14,47%		

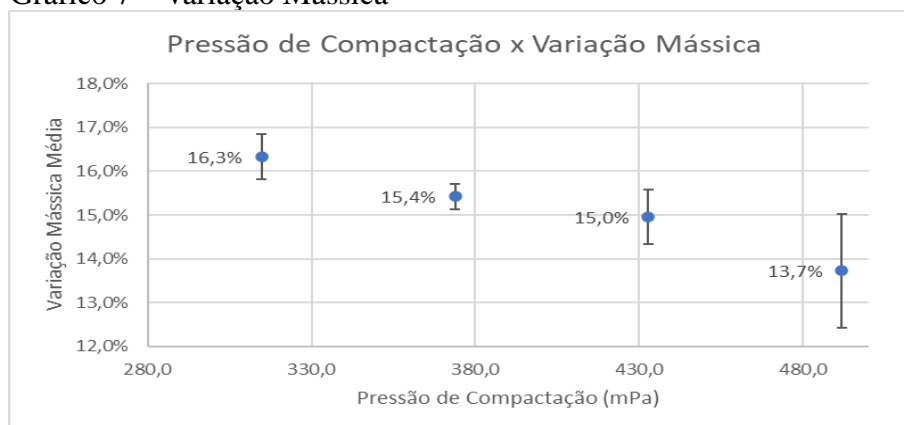
Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Os primeiros CPs de cada pressão de compactação foram lixados e polidos, apresentando assim massa inferior aos demais como pode ser percebido na Tabela, que foram apenas lixados para o ensaio de dureza.

Observa-se em todos os corpos de prova um incremento na massa dos corpos como era esperado, visto que estamos lidando com uma liga ferrosa que passou por um processo de aquecimento em ambiente rico em oxigênio, sendo assim o aumento na massa dos CPs é atribuído à oxidação do material durante o processo de sinterização.

É possível perceber ainda que a variação mássica diminui conforme aumenta-se a pressão de compactação, isso pode ser em decorrência da diminuição dos poros esperadas ao aumentar-se tal pressão. A diminuição dos poros reduz o contato do oxigênio com a peça, reduzindo a formação de óxidos. Essa tendência é representada de forma mais clara no Gráfico 7.

Gráfico 7 – Variação Mássica



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

4.3.2 Variação dimensional

Através das medições realizadas antes e depois da sinterização observou-se uma variação em todas as dimensões da peça, tal variação é mostrada na Tabela 9.

Tabela 9 – Variação dimensional

CP	Diâmetro (mm)		Altura (mm)		Volume (mm)		VD (%)	VD Média (%)	Desvio Padrão
	Verde	Sinterizado	Verde	Sinterizado	Verde	Sinterizado			
CP11	25,44	28,29	9,26	12,15	4706,901	7637,163	62,25%	58,9%	3,7%
CP12	25,44	28	9,57	12,21	4864,476	7518,334	54,56%		
CP13	25,44	27,96	9,53	12,31	4844,143	7558,268	56,03%		
CP14	25,44	27,78	9,56	13,05	4859,393	7909,789	62,77%		
CP21	25,44	28,07	9,18	12,07	4666,237	7469,336	60,07%	58,3%	2,4%
CP22	25,44	28	9,19	11,92	4671,32	7339,766	57,12%		
CP23	25,44	28,06	9,29	12,3	4722,15	7606,245	61,08%		
CP24	25,44	27,92	9,29	11,95	4722,15	7316,251	54,93%		
CP31	25,44	28,04	8,77	12,21	4457,832	7539,83	69,14%	63,7%	3,6%
CP32	25,44	27,94	8,85	11,66	4498,496	7148,933	58,92%		
CP33	25,44	28,06	8,85	11,91	4498,496	7365,072	63,72%		
CP34	25,44	28,2	9,04	11,98	4595,074	7482,469	62,84%		
CP41	25,44	27,94	8,61	11,62	4376,503	7124,408	62,79%	60,5%	1,5%
CP42	25,44	27,94	8,89	11,8	4518,828	7234,769	60,10%		
CP43	25,44	27,94	8,82	11,59	4483,247	7106,015	58,50%		
CP44	25,44	28,01	8,88	11,77	4513,745	7252,581	60,68%		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Na fase de sinterização, que não ocorrem reação química com o ambiente, é esperado que o produto final sofra uma retração volumétrica, visto que os poros do material tendem a se reduzir durante essa fase. Entretanto, visto que houve uma reação química com o ar houve um aumento substancial no volume da peça, o que era esperado, dado o material e a atmosfera do forno.

4.3.3 Variação de densidade e porosidade

Durante o processo foi calculada a densidade das amostras antes da sinterização, após a sinterização e após a remoção da camada de óxido e lixamento. Os resultados estão na Tabela 10.

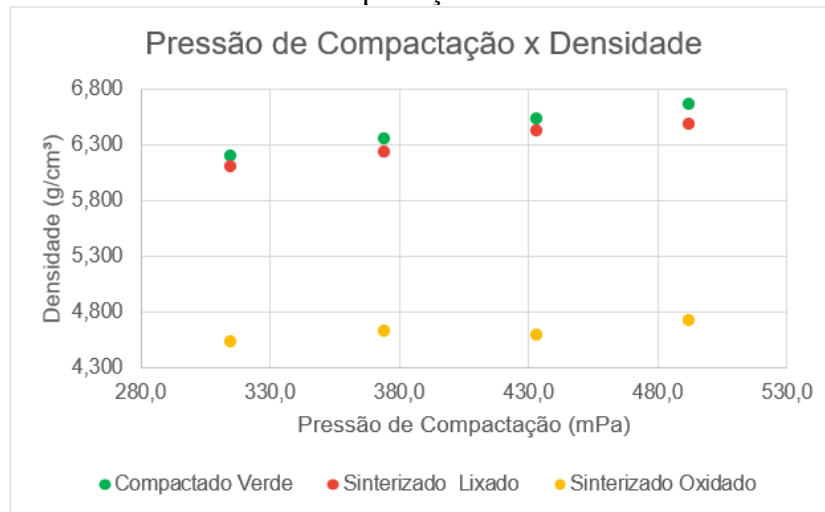
Tabela 10 – Variação de densidade

Pressão de Compactação (mPa)	Densidade Média (g/cm ³)			Porosidade (%)		
	Compactado Verde	Sinterizado Oxidado	Sinterizado Lixado	Compactado Verde	Sinterizado Oxidado	Sinterizado Lixado
314,8	6,204	4,543	6,109	20,30%	41,64%	21,52%
373,8	6,355	4,635	6,237	18,35%	40,46%	19,87%
432,8	6,539	4,595	6,427	15,99%	40,97%	17,44%
491,8	6,672	4,727	6,493	14,29%	39,28%	16,59%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

A partir da Tabela 10 é possível perceber padrões através dos quais podemos chegar a algumas conclusões. Inicialmente podemos notar que a peça sinterizada ainda com a camada de óxido possui as menores densidades e as maiores porosidades. Além disso, percebe-se que em praticamente todos os momentos, maiores forças geraram maiores densidades. Ademais é possível ainda notar que a densidade a verde é maior que a da amostra sinterizada e lixada em todas as forças utilizadas. O Gráfico 8 mostra os padrões apontados, de forma mais clara.

Gráfico 8 – Pressão de compactação x Densidade

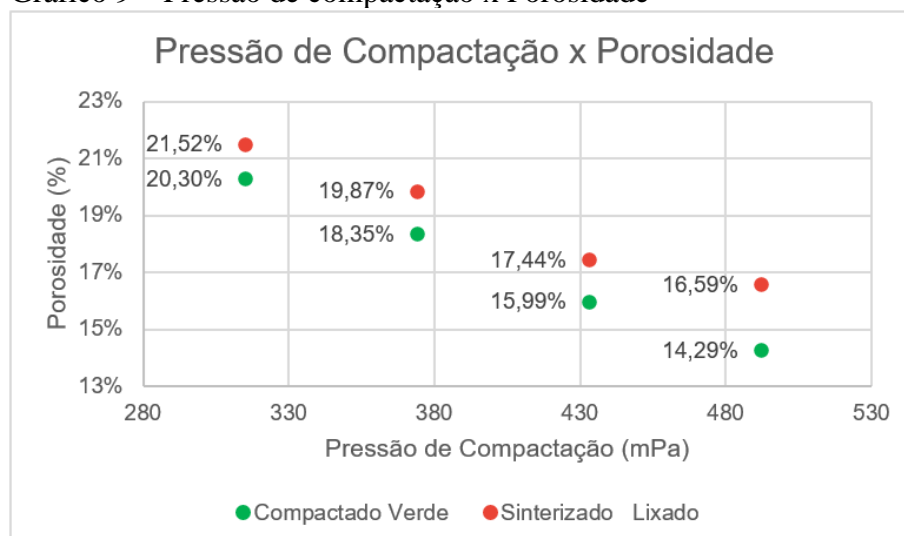


Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

O fato de as peças oxidadas possuírem as menores densidades e maiores porosidades não é estranho, visto que a densidade do óxido de ferro é inferior à do ferro puro, sendo assim uma combinação de aço e óxido de ferro deve ter densidade inferior.

Pelos dados apresentados podemos chegar à conclusão esperada, de que maiores pressões de compactação geram um melhor adensamento, permitindo que os poros sejam melhor preenchidos, gerando maiores densidades e menores porosidades. O Gráfico 9 mostra a variação da porosidade de acordo com a pressão de compactação.

Gráfico 9 – Pressão de compactação x Porosidade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

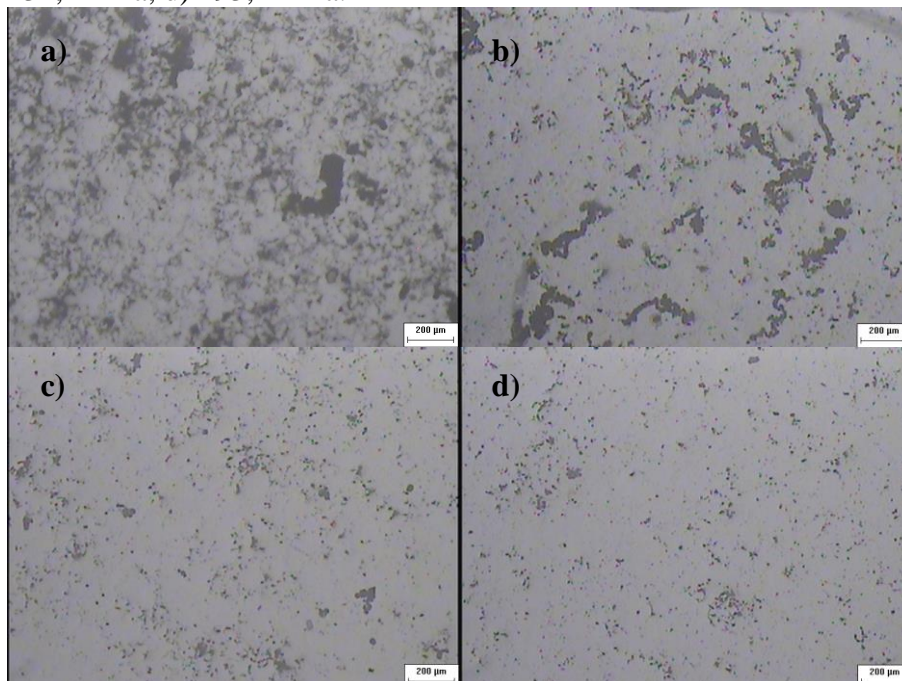
A densidade ter sido reduzida dos compactados verdes para os CPs finais

sinterizados e lixados foi uma situação inesperada, visto que, em geral, espera-se que peças sinterizadas tenham menos poros e isso ocasionaria numa maior densidade. Tal fato pode ser explicado pela presença de algum óxido na lateral das peças, que não foram lixadas resultando em uma situação similar as peças com a camada de óxido. Ainda é possível que durante a formação de óxido tenha havido um aumento na porosidade da peça.

4.4 Análises Microscópicas

Durante o estudo foi possível averiguar visualmente, nos compactados verde, a redução de porosidade que ocorre devido ao aumento da pressão de compactação através das imagens da seção transversal das amostras. A Figura 29 mostra essa redução na porosidade ao comparar quatro fotos de peças compactadas com pressões diferentes.

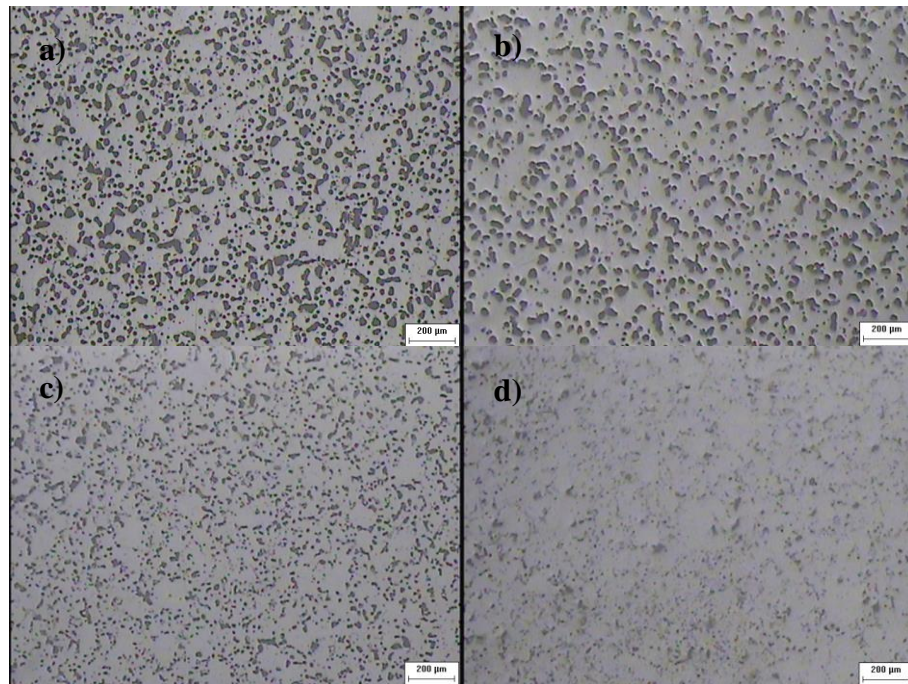
Figura 29 – Microscopia Ótica dos corpos de prova antes da sinterização com aumento de 50X. a) 315,8 MPa, b) 375,0 MPa, c) 434,2 MPa, d) 493,4 MPa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É possível perceber visualmente a redução dos poros representados na Figura 29 como espaços escuros nas amostras. De modo similar, é possível notar a redução da porosidade nas amostras após a sinterização. A Figura 30 mostra essa comparação.

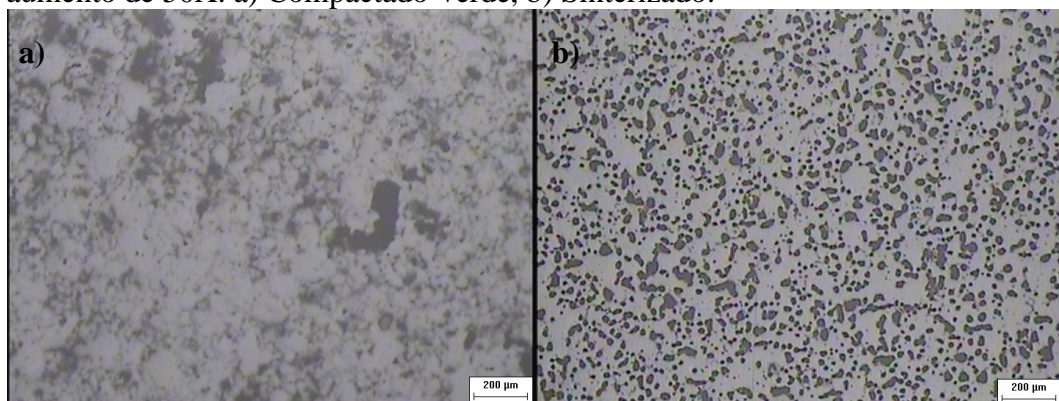
Figura 30 – Micrografias dos corpos de prova sinterizados com aumento de 50X. a) 315,8 MPa, b) 375,0 MPa, c) 434,2 MPa, d) 493,4 MPa.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É possível ainda, notar uma distribuição mais uniforme dos poros nas micrografias das peças sinterizadas se comparadas ao compactado verde. A Figura 31 evidencia isso.

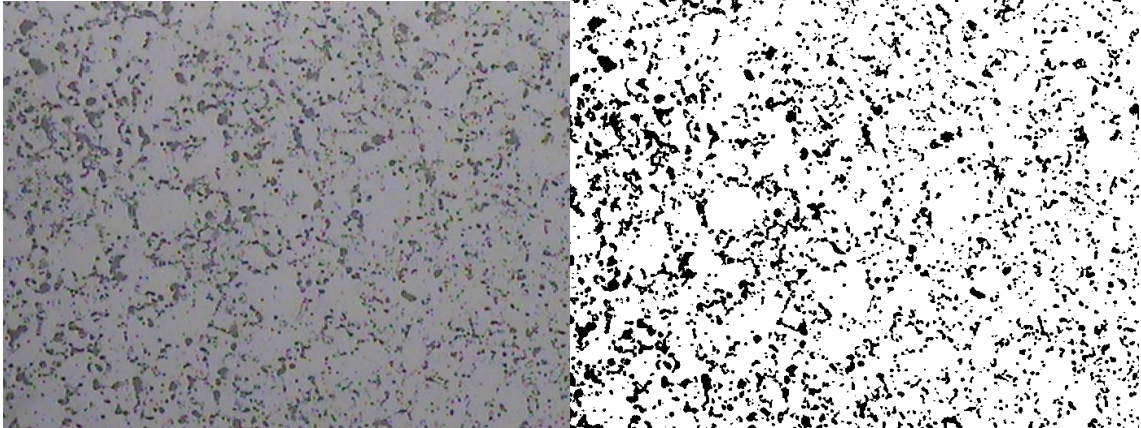
Figura 31 – Micrografias dos corpos de prova compactados com 315,8 MPa com aumento de 50X. a) Compactado Verde, b) Sinterizado.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

As imagens foram analisadas através do ImageJ pelo qual foi mensurada a porosidade percentual. A Figura 32 mostra a foto original e a mesma foto após o processamento pelo ImageJ

Figura 32 – Amostras vistas no microscópio antes e após serem processadas pelo ImageJ



Fonte: Elaborado pelo próprio autor

Na imagem à esquerda temos a foto da superfície do material tirada no microscópio ótico e a imagem da direita é a mesma foto após o processamento pelo ImageJ. Em ambas as fotos a parte escura são os poros da peça.

A Tabela 11 mostra a média das porosidades medidas observadas nas fotos com ampliações de 200X.

Tabela 11 – Porosidade média

Pressão de Compactação (mPa)		315,8	375,0	434,2	493,4
Compactado Verde	Porosidade Média (%)	28,14%	26,46%	13,73%	4,20%
Sinterizado		27,54%	24,92%	19,67%	17,03%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

Através da Tabela 11 podemos perceber a redução da porosidade com o aumento da pressão de compactação tanto nos CPs antes de sinterizados quanto neles após a sinterização. Entretanto não foi possível perceber um padrão de redução de porosidade dos CPs verdes para os sinterizados, como seria esperado. Ademais a amostra em verde, compactada a 493,4 MPa apresentou uma porosidade média muito abaixo da calculada.

A Tabela 12 mostra a porosidade calculada através da densidade e a porosidade medida através das micrografias lado a lado.

Tabela 12 – Comparação porosidades médias

Pressão de Compactação (mPa)	Verde		Sinterizado Lixado	
	Porosidade Média Calculada (%)	Porosidade Média Medida (%)	Porosidade Média Calculada (%)	Porosidade Média Medida (%)
314,8	21,22%	28,14%	21,22%	27,54%
373,8	19,29%	26,46%	19,29%	24,92%
432,8	16,95%	13,73%	16,95%	19,67%
491,8	15,27%	4,20%	15,27%	17,03%

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É possível notar que em todos os casos houve uma redução na porosidade com o aumento da pressão de compactação, entretanto os resultados, não coincidem entre si, isso pode ser atribuído a resolução e precisão dos equipamentos utilizados, bem como a falta de pós-tratamento das imagens. Vale ressaltar ainda a possibilidade da presença de óxido de ferro na peça durante as medições o que pode ocasionar erro na porosidade calculada.

4.5 Dureza

A Tabela 13 mostra o resultado dos ensaios de dureza e mostra a média e desvio padrão dos mesmos.

Tabela 13 – Pressão de compactação x Densidade

Dados		Dureza (HRC)								
CP	Pressão (mPa)	Indentação					Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
		1	2	3	4	5				
CP11	314,8	68,0	67,0	67,8	68,5	68,0	67,9	0,5	66,0	2,0
CP12		66,3	67,8	67,0	67,7	66,0	67,0	0,7		
CP13		66,0	66,6	67,0	66,9	66,0	66,5	0,4		
CP14		63,0	62,8	62,5	61,9	63,0	62,6	0,4		
CP21	373,8	70,0	70,4	69,3	70,1	70,3	70,0	0,4	69,6	1,3
CP22		69,4	70,1	71,0	70,3	75,0	71,2	2,0		
CP23		72,0	70,0	68,0	68,0	70,9	69,8	1,6		
CP24		67,0	68,4	67,0	67,7	68,0	67,6	0,6		
CP31	432,8	70,0	69,0	69,0	69,2	70,9	69,6	0,7	71,1	1,4
CP32		71,5	72,0	72,0	72,0	70,2	71,5	0,7		
CP33		71,3	72,5	73,0	74,5	74,5	73,2	1,2		
CP34		69,5	70,5	70,4	70,0	69,5	70,0	0,4		
CP41	491,8	72,0	70,3	70,9	72,0	70,2	71,1	0,8	72,6	1,7
CP42		72,0	71,0	71,0	72,5	71,0	71,5	0,6		
CP43		71,9	73,0	73,5	72,0	73,0	72,7	0,6		
CP44		76,0	73,8	74,8	76,0	76,0	75,3	0,9		

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

É notável que o procedimento permitiu que as amostras alcançassem durezas comparáveis com ligas bem mais nobres. A Tabela 14 mostra a dureza de algumas ligas para efeito de comparação.

Tabela 14 – Dureza de várias ligas ferrosas

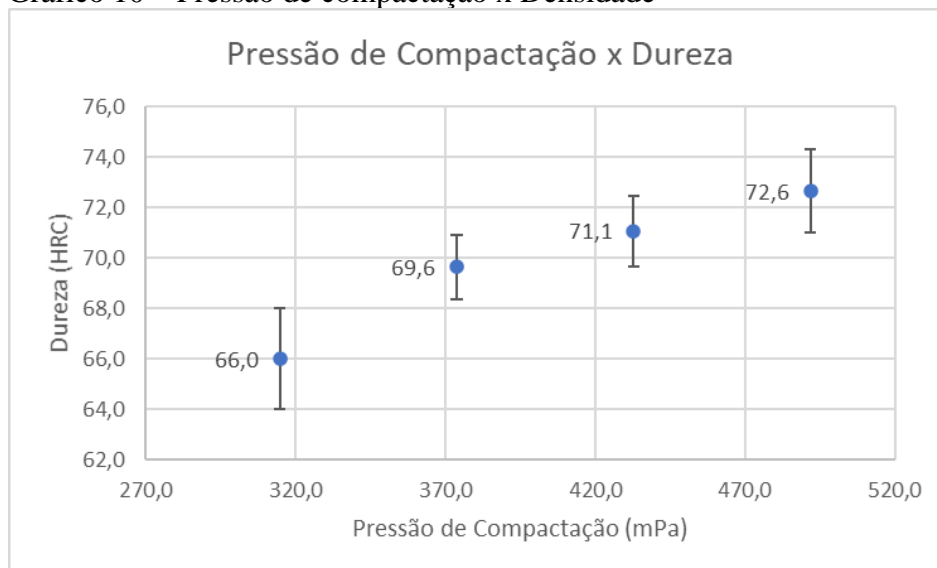
Material	Condição	Dureza (HRC)
Aço 1045	Laminado a frio	8
Aço inoxidável 304	Laminado a frio	40
Aço 1050	Temperado e Revenido a 200 °C	52
Aço inoxidável 440C	Temperado e Revenido a 300 °C	57

Fonte: Adaptado de Norton (2013).

É possível notar que os corpos de prova alcançaram durezas elevadas se comparado a ligas de ferro. Acredita-se que esse grau de dureza foi alcançado pelo trabalho a frio ao qual o material foi submetido durante a fase de compactação além da provável formação de óxido por todo o corpo que resulta num aumento da dureza.

Pode-se perceber ainda um aumento na dureza média dos corpos de prova ensaiados comprovando a melhoria das propriedades mecânicas com o aumento da pressão de compactação. O Gráfico 10 evidencia essa tendência de forma mais clara.

Gráfico 10 – Pressão de compactação x Densidade



Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

5 CONCLUSÃO

Com base nos ensaios realizados e nas análises feitas é possível concluir que a pressão de compactação é um parâmetro de extrema relevância na metalurgia do pó, contribuindo diretamente nas propriedades mecânicas do material e permitindo menores variações em propriedades físicas durante o processo de sinterização.

Especificamente, foi possível comprovar, através das medições dimensionais e mássicas e das micrografias feitas, que conforme aumentamos da pressão de compactação, no pó de aço, a porosidade da peça final é reduzida.

Ainda foi possível notar, através das pesagens, uma tendência de redução na variação mássica com o aumento da pressão de compactação.

Observou-se também, com o ensaio de dureza, que o aumento da pressão de compactação tem influência direta na dureza obtida ao final do processo.

Ainda é possível perceber um aumento desproporcional da dureza, provavelmente pela formação de óxido na peça.

É possível teorizar que a redução na variação mássica e o aumento da dureza estão ligados a redução da porosidade, visto que, com um material menos poroso, no caso em questão, teríamos menos área de contato para que as reações químicas que levam a essa variação mássica aconteçam. A redução da porosidade também pode contribuir com o aumento da dureza, tendo em vista que os poros são vazios na peça, a redução nesses poros dificulta a deformação do material aumentando a dureza do mesmo. Há de se compreender que o trabalho a frio e a formação de óxido, ocorridos durante a compactação e influenciado pela pressão de compactação, é um fator crucial no aumento da dureza, principalmente no nível de dureza que foi alcançado.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Influência da temperatura de sinterização nas propriedades mecânicas.
- Influência da pressão de compactação com uso de lubrificantes nas propriedades mecânicas.
- Influência da pressão de compactação com uso de outras propriedades mecânicas além da dureza.
- Influência da pressão de compactação em materiais cerâmicos nas propriedades mecânicas.
- Investigar as propriedades de materiais compactados em pressões inferiores a 314,8 MPa e superiores a 491,8 MPa.
- Investigar a influência da granulometria e do formato dos pós utilizados nas propriedades mecânicas do material.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Rio de Janeiro). NBR NM 248 **Agregados - Determinação da composição granulométrica**, Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Rio de Janeiro). NBR NM ISO 6508-1:2008. **Ensaio de dureza Rockwell: Parte 1: Método de ensaio**, Rio de Janeiro, 2008.
- BRAGA, Neila de Almeida *et al.* **Obtenção de Titânio Metálico Com Porosidade Controlada Por Metalurgia Do Pó**. *Quim. Nova*, [s. l.], ano 2007, v. 30, n. 2, p. 450-457.
- BRITO, F. Iran Gomes; MEDEIROS, Katarine F; LOURENÇO, Jorge Magner. **Um estudo teórico sobre a sinterização na metalurgia do pó**. *Holos*, Rio Grande do Norte, ano 23, v. 3, ed. 33, p. 204-211, 2007.
- CALLISTER, William D; RETHWISCH, David G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- CHIAVEIRINI, Vicente. **Metalurgia do Pó**. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2001.
- CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica 2**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1986. v. 2.
- GALLOTTO, Alexandre. **Estudo da Sinterabilidade de Materiais Ferrosos Contendo Elevados Teores de Sulfeto como aditivos**. 2005. 88 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A Metalurgia do Pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. 1ª edição São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009. 320 p.
- JÚNIOR, Claudécir Fernandes De Freitas Moura. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de ligas de fe-nb2o5 processadas por metalurgia do pó**. Orientador: Cândido Jorge de Sousa Lobo. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Ceará - Campus de Russas, [S. l.], 2022.
- LOBO, Cândido Jorge de Sousa. **Estudo das propriedades mecânicas de ligas Fe-Ni e Fe-Ni-Mo processadas por metalurgia do pó**. 2014. 159 p. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.
- MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de Fabricação: Metalurgia do Pó e o futuro da Indústria**. *Revista Tecnológica do Instituto Federal de Santa Catarina*, Florianópolis, p.01-28, 01 set. 2007.
- MOURISCO, Aroldo José. **Preparação e caracterização de compósito de matriz de alumínio 1100 com partículas de sic por metalurgia do pó**. 1995. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Nuclear - Materiais, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2005.

Norton, Robert L. **Projeto de máquinas: uma abordagem integrada** / Robert L. Norton ; [tradução: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos ... et al.]. – 4. ed. – Dados eletrônicos. – Porto Alegre: Bookman, 2013.

PANDA, Anton; JANČÍK, Marek; PANDOVÁ, Iveta. **Components from Powder Metallurgy**. Transfer inovácií, [s. l.], ed. 33, p. 10-11, 31 dez. 2016.

PAULA, Márcio José Torres de. **Matriz de compactação em aço d6 para obtenção de pré-forma sinterforjada em aço ABNT 1045**. Revista Ferramental, [s. l.], 11 mar. 2019. Disponível em: <https://www.revistaferramental.com.br/artigo/matriz-compactacao-aco-d6-para-obtencao-pre-forma-sinterforjada-em-aco-abnt-1045/>. Acesso em: 21 mar. 2022.

SCHAERER, Magna Maria Monteiro. **Análise numérica do comportamento de densificação de pós metálicos resultante do processo de compactação uniaxial**. 2006. 89 f. Tese (Doutor) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Coppe, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SOUZA, Marco Antônio. **Estudo do processo de sinterização de cinzas de bagaço de cana-de-açúcar por forno resistivo e de vitrificação por combustão de gás natural assistido por tocha de plasma tipo arco deslizante**. 2014. 68 p. Dissertação (Mestrado em Processamento de Materiais e Catálise) – Universidade do Vale do Paraíba, São José dos Campos, 2014.

UPADHYAYA, G. S. **Powder Metallurgy Technology**. 1. ed. Inglaterra: Cambridge International Science Publishing, 2002.