

**Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais
e Processos Industriais**

VITOR HUGO MACHADO DA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS
MACIOS POR MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO
APLICADOS A NÚCLEOS DE AEROGERADORES**

**Novo Hamburgo
2017**

Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos
Industriais

VITOR HUGO MACHADO DA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS POR MOLDAGEM
DE PÓS POR INJEÇÃO APLICADOS A NÚCLEOS DE AEROGERADORES**

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Orientador: Moisés de Mattos Dias

Novo Hamburgo
2017

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)

Silveira, Vitor Hugo Machado da.

Desenvolvimento de materiais magnéticos macios por moldagem de pós por injeção aplicados a núcleos de aerogeradores / Vitor Hugo Machado da Silveira. – 2017.

106 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais) – Feevale, Novo Hamburgo-RS, 2017.

Inclui bibliografia e apêndice.

“Orientador: Moisés de Mattos Dias”.

1. Metalurgia do pó. 2. Engenharia de materiais. 3. Materiais magnéticos. I. Título.

CDU 621.762

Bibliotecária responsável: Tatiane de Oliveira Bourscheidt – CRB 10/2012

Universidade Feevale
Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos
Industriais

VITOR HUGO MACHADO DA SILVEIRA

**DESENVOLVIMENTO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS POR MOLDAGEM
DE PÓS POR INJEÇÃO APLICADOS A NÚCLEOS DE AEROGERADORES**

Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora em 24 de fevereiro de 2017, conferindo ao autor o título de Mestre em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais.

Componentes da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias
Universidade Feevale

Prof. Dr. Eng. Vinicius Martins
Instituto Federal Sul-rio-grandense

Prof. Dr. Eng. José Lesina César
Universidade Luterana do Brasil

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Moisés de Mattos Dias, pela orientação extremamente dedicada e pela ajuda obstinada nos momentos mais críticos, pela paciência ímpar com a qual conduziu este.

Aos meus pais, pelo apoio em condicional, que sempre me incentivaram a buscar o melhor para mim, mesmo diante das adversidades.

Ao professor Lírio Schaeffer e ao Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS, pelo apoio à esta pesquisa.

Aos senhores Diego Pacheco Wermuth e André Carvalho Tavares (LdTM – UFRGS), pelo auxílio prestado seja em experimentos como em análises e sugestões.

Ao professor José Carlos Krause de Verney (ULBRA), pelo auxílio com os ensaios nos corpos de prova (metalografia, densidade, dureza e microdureza).

Ao senhor Lucas Ariel Ferreira (Engenharia Eletrônica da Feevale), pelo apoio na realização das curvas magnéticas e nos ensaios de resistividade elétrica.

Ao senhor Eduardo Correa Braga (Engenharia Eletrônica da Feevale), pelo apoio para com as simulações numéricas da máquina elétrica.

A FAPERGS e SDECT-RS, pelo apoio na pesquisa.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo o estudo de materiais magnéticos macios obtidos a partir do processo de Moldagem de Pós Metálicos por Injeção (MIM), possíveis de serem aplicados em núcleos de máquinas elétricas rotativas, utilizados em Aerogeradores. A pesquisa propõe a obtenção de corpos de prova nas seguintes geometrias: forma de gravata para análise de tensão de escoamento; forma de anel para obtenção de propriedades magnéticas (curvas de histerese), propriedades elétricas (resistividade elétrica) e mecânicas (análise metalográfica e dureza). A partir destas propriedades citadas é possível avaliar se um determinado material ou processo pode ser utilizado para construção de núcleos de rotor e estator de geradores trifásicos, possíveis de serem utilizados em aerogeradores de pequeno porte. A obtenção dos corpos de prova compreende a preparação da carga a partir de ligas Fe-1%P e Fe-1%Si, injeção e extração dos ligantes (química e térmica) e sinterização para avaliação das propriedades físicas de interesse (elétricas, magnéticas e mecânicas). Mensurou-se após a sinterização, a densidade, a microdureza e a contração, que ficaram em 6,02 g/cm³, 38,8 % e 180 HV, respectivamente. As propriedades magnéticas obtidas foram: retentividade de 0,6 T; coercitividade de 570 A/m, e Indução de Saturação de 0,828 T. Finalmente foi simulada uma geometria proposta de máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes, idêntica a uma máquina síncrona convencional já existente no mercado. Os dados de propriedades físicas bem como os de simulação, também foram comparados aos mesmos materiais, contudo obtidos a partir da M/P (Metalurgia do Pó). Nesta simulação obteve-se para a liga Fe-1%Si injetada, uma densidade de fluxo de 0,52 T e um torque de 0,305 N.m.

Palavras chave: *Maquinas Síncronas com Ímãs Permanentes, Moldagem de Pós por Injeção, Extração, Carga injetável, Aerogeradores.*

ABSTRACT

This work had the goal of the study of soft magnetic materials obtained from the process of Powder Injection Molding (PIM), and if they might applied to cores of rotating electrical machines, used in wind turbines. The research proposes to obtain specimens in the following geometries: tie-shaped for analysis of yield strength; a ring to obtain magnetic properties (hysteresis curves) and electrical properties (resistivity), metallographic analysis and hardness test. From these mentioned properties, it is possible to evaluate whether a particular material or process might be used for construction of three-phase generator cores, able to be used in small wind turbines. For obtain the specimens, it was performed the feedstock preparation from Fe-1%P and Fe-1%Si alloys, injection and debinding (solvent and thermal) and sintering for evaluation of all interesting physical properties (electric, magnetic and mechanical). It was measured after sintering, density, micro hardness and contraction, which were 6.02 g / cm³, 38.8% and 180 HV, respectively. As magnetic properties obtained were: remanence of 0.6 T; coercivity of 570 A / m, and Saturation flux density of 0.828 T. Finally, it has been simulated a geometry proposed three-phase synchronous machine with permanent magnets, similar to an existing conventional synchronous machine in market. The results are analyzed compared to conventional electrical machines cores, ie, from laminated steel sheets. Data of physical properties well with simulation has been compared to the same materials however obtained by Powder Metallurgy. In this simulation, a flux density of 0.52 T and a torque of 0.305 N.m. was obtained for the injected Fe-1% Si alloy.

Keywords: Synchronous machine with permanent magnets, Powder injection molding, Debinding, Feedstock, Wind turbines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de moldagem por injeção de pós	21
Figura 2: Esquema do processo de atomização por água	22
Figura 3: Esquema do ciclo de injeção.....	27
Figura 4: Esquema de um molde	28
Figura 5: Evolução da microestrutura durante as etapas de extração	30
Figura 6: Evolução das etapas de sinterização	31
Figura 7: Curva de histerese para um material ferromagnético.....	35
Figura 8: Curvas de histerese para materiais magnéticos macios e duros	36
Figura 9: Curva de magnetização de um Ferro comercial.....	37
Figura 10: Evolução do alinhamento dos domínios magnéticos durante a magnetização.....	37
Figura 11: Modelo construtivo de um motor elétrico.....	40
Figura 12: Modelos de rotores para motores síncronos com excitatriz estática	41
Figura 13: Diagrama de blocos para o trabalho com foco na liga Fe-1%Si.....	50
Figura 14: Amostras na forma de anel – (a) matriz – (b) corpo de prova	51
Figura 15: Amostras na forma de cilindro – (a) matriz – (b) corpo de prova	51
Figura 16: Corpos de prova na forma de barra: (a) desenho esquemático – (b) matriz para injeção.....	53
Figura 17: Corpos de prova na forma de anel: (a) desenho esquemático – (b) matriz	53
Figura 18: Corpos de prova na forma de gravatinha: (a) desenho esquemático – (b) matriz	53
Figura 19: Misturador para preparação da carga: (a) vista externa – (b) vista interna	55
Figura 20: Equipamento de análise térmica simultânea da marca Thermal Analysis modelo Q600 SDT.....	56
Figura 21: Injetora: (a) visão geral - (b) canhão	56
Figura 22: Injetora: (a) visualização em perspectiva – (b) matriz na forma de anel montada na injetora.....	57
Figura 23: Dispositivo utilizado para extração química	58
Figura 24: Corpos de prova e com extração química a partir da liga Fe-1%Si na forma de: (a) gravatinha – (b) barra – (c) anel.....	58

Figura 25: Forno utilizado na Extração térmica	59
Figura 26: Primeira Sinterização – (a) forno – (b) gravatinha – (c) anel.....	60
Figura 27: Segunda sinterização – (a) forno – (b) peça injetada e sinterizada.....	61
Figura 28: Microscópio eletrônico de varredura modelo: JSM-6510LV marca: JEOL	62
Figura 29: Reômetro de torque: (a) vista geral - (b) vista ampliada da câmara interna	63
Figura 30: Gravatinha gerada por carga via reômetro de torque– (a) injetada – (b) sinterizada	63
Figura 31: Injetora Arburg Allrouder 170 S.....	64
Figura 32: (a) Matriz para injeção de corpos de prova – (b) dimensões do corpo de prova na forma de anel toroidal.....	64
Figura 33: Traçador de curva de histerese modelo TLMP-TCH-14.....	67
Figura 34: Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário	67
Figura 35: Motor de indução trifásico de 10 CV - (a) vista lateral - (b) parcialmente desmontado.....	70
Figura 36: Esquema das chapas do estator da máquina	70
Figura 37: Topologia dos rotores estudados – (a) polos salientes com ímãs na superfície das saliências – (b) polos lisos com ímãs na superfície do rotor – (c) ímãs embutidos no interior do rotor.....	71
Figura 38: Projeto do rotor – (a) desenho dimensional – (b) vista em perspectiva....	71
Figura 39: Curvas DSC e TGA para a carga injetável da liga Fe-1%Si.....	73
Figura 40: Segmentos gravatinha - à esquerda sinterizada em forno de esteira – à direita sinterizada em forno tipo mufla.....	74
Figura 41: Microestrutura da amostra 1 – (a) áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Aumento: 400x. – (b) áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Áreas cinza: binder. Aumento: 400x	75
Figura 42: Microestrutura da amostra 2: áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Aumento: 400x	76
Figura 43: Anel segmentado conectado a uma fonte e multímetro para determinação da resistividade elétrica	77
Figura 44: Croqui da amostra apresentando as regiões de análise 1 e 2	78

Figura 45: Microestrutura da área 1 com presença de poros e trincas resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x.	79
Figura 46: Microestrutura da área 1 com presença menor de poros e uma distribuição mais homogênea, resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x.	80
Figura 47: Microestrutura da área 2 com uma menor presença de poros em uma distribuição homogênea, resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 400x.	80
Figura 48: Anel – (a) injetado – (b) sinterizado.....	81
Figura 49 - Microestrutura da amostra 1 com presença de poros e trincas resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x. (a) região central – (b) região mais próxima da extremidade	82
Figura 50: Microestrutura da amostra 2 com uma menor presença de poros em uma distribuição homogênea, região escura. Sem ataque. (a) Aumento 200x – (b) Aumento 500x.	82
Figura 51: Micrografia do corpo de prova injetado, região clara: sistema ligante, região escura: pós constituintes. Aumento: 2000x. Escala: 10µm.	83
Figura 52: Micrografia do corpo de prova injetado, região clara: sistema ligante, região escura: pós constituintes. Aumento: 1000x. Escala: 10µm. (a) centro da amostra – (b) extremidade da amostra.....	84
Figura 53: Curva magnética de histerese para liga Fe-1%Si	85
Figura 54: Curva de magnetização para liga Fe-1%Si.....	86
Figura 55: Simulação da máquina com rotor a partir de chapas aço M15 – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina	88
Figura 56: Simulação da máquina com rotor a partir da liga Fe-1%Si injetada – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina	88
Figura 57: Simulação da máquina com rotor a partir da liga Fe-1%Si sinterizada – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina	89
Figura 58: Corpos de prova injetados da liga Fe-1%P na forma de barras	100
Figura 59: Corpos de prova injetados da liga Fe-1%P na forma de anel	101
Figura 60: Barra da liga Fe-1%P obtida após extração térmica	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparativo entre as diferentes técnicas de produção de pós	23
Tabela 2: Características para um ligante ideal para MPI	24
Tabela 3: Exemplos de composição de sistema ligante para materiais magnéticos .	25
Tabela 4: Temperatura de extração térmica de alguns polímeros em sistemas ligantes	30
Tabela 5: Exemplo de ciclos de sinterização	31
Tabela 6: Materiais magnéticos duros e suas propriedades magnéticas	43
Tabela 7: Percentuais em volume dos constituintes do sistema ligante da liga Fe-1%P	54
Tabela 8: Parâmetros de processo para injeção	57
Tabela 9 - Parâmetros de processo para injeção dos anéis	57
Tabela 10: Parâmetros de processo utilizados na injetora Arburg	65
Tabela 11: Valores referenciais de resistividade elétrica	77
Tabela 12: Valores medidos de microdureza para amostra	79
Tabela 13: Tabela com as dimensões e densidade obtidas com o corpo de prova anel via injetora Arburg	81
Tabela 14: Medidas de microdureza para o anel	84
Tabela 15: Simulação de torque e densidade de fluxo de entreferro para núcleo de rotor da liga Fe-1%Si injetada, e sinterizada e de chapas de aço M15	89
Tabela 16 : Valores médios para as características das barras injetadas de Fe-1%P	100
Tabela 17: Valores médios para as características dos anéis injetados de Fe-1%P	101

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Lei de Ampère genérica	32
Equação 2: Equação da indução magnética B	33
Equação 3: Equação do fluxo magnético	33
Equação 4: Equação da permeabilidade magnética relativa	34
Equação 5: Equação da indução magnética B em função da magnetização	36
Equação 6: Equação da força magneto-motriz	38
Equação 7: Lei de Ohm	68
Equação 8: Lei de Ohm aplicada ao corpo de prova preliminar em Fe-1%Si	77
Equação 9: Lei de Ohm aplicada ao corpo de prova definitivo em Fe-1%Si	87

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A** – Ampére, unidade de corrente elétrica
- A** – Área em metros quadrados
- A/m** – Unidade de Campo magnético
- A/m²** – Unidade de densidade de corrente elétrica
- A/Wb** – Unidade de relutância
- B** – Indução magnética
- B_r** – Retentividade
- °C** – Unidade de temperatura em Celsius
- °C/min** – Unidade de taxa de aquecimento em Celsius por minuto
- CA** – Corrente alternada
- CC** – Corrente contínua
- Cosθ** – Cosseno do ângulo entre a indução magnética e a área
- CV** – Unidade de potência mecânica
- D** – Diâmetro (tamanho da partícula de pó)
- dl** – Comprimento infinitesimal em metros
- ds** – Equivalente infinitesimal para área em metros quadrados
- dT/dt** – Taxa de aquecimento (diferencial)
- H** – Campo magnético
- H_c** – Coercitividade
- H/m** – Unidade para permeabilidade magnética, Henri por metro
- i** – Corrente elétrica com unidade em Amperes
- J** – Densidade de corrente elétrica com unidade A/m²
- l** – Comprimento da barra (ou segmento de um anel) em metros
- LdTM** – Laboratório de Transformação Mecânica
- LMPMM** – Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos

M – Magnetização

min – Unidade de tempo em minutos

M/P – Metalurgia do Pó

MPI – Moldagem de Pós por Injeção

MIM - Moldagem de Pós Metálicos por Injeção

PEAD – Polietileno de alta densidade

PP – Polipropileno

PS – Poliestireno

R – Resistência elétrica

R_M – Relutância com unidade em A/Wb

S – Saturação de magnetização

SMC – Materiais encapsulados

T – Temperatura

t – Tempo

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

V – Tensão elétrica aplicada em Volts

ρ – Resistividade elétrica

η – Força magneto-motriz (f.m.m.) com unidade Ampère por espira

μ – Permeabilidade magnética no meio ou no material

μm – Unidade de medida de comprimento em micrometros

μ_r – Permeabilidade relativa

μ₀ – Permeabilidade no vácuo

∫ – Símbolo para integração

Φ – Fluxo magnético com unidade Weber

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2 REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1 METALURGIA DO PÓ	20
2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE PÓS	21
2.2.1 Obtenção dos pós.....	22
2.2.2 Preparação da Carga Injetável (<i>feedstock</i>).....	24
2.2.3 Injeção	26
2.2.4 Extração química	28
2.2.5 Extração térmica	29
2.2.6 Sinterização	30
2.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS.....	32
2.3.1 Campo magnético, indução e fluxo magnético	32
2.3.2 Permeabilidade Magnética Relativa.....	33
2.3.3 Curva de Histerese	34
2.3.4 Magnetização.....	36
2.3.5 Relutância e Força magneto-motriz	38
2.4 MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS.....	38
2.4.1 Generalidades sobre máquinas elétricas.....	38
2.4.2 Máquinas elétricas trifásicas	40
2.4.3 Fatores que determinam o desempenho de máquinas elétricas.....	41
2.4.4 Ímãs Permanentes e sua aplicação em Máquinas Elétricas.....	42
2.5 MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS INJETADOS	44

2.5.1 Características dos Materiais Magnéticos Macios Injetados.....	44
2.5.2 Aplicações dos Materiais Magnéticos Macios Injetados	44
2.5.3 Principais Ligas de Materiais Magnéticos Macios Injetados	45
2.5.3.1 Ligas Fe-Si	45
2.5.3.2 Ligas Fe-Ni	46
2.5.3.3 Ligas Fe-Si-Al	47
2.5.3.4 Ligas Fe-Co	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 INTRODUÇÃO	49
3.2 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS.....	51
3.3 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS PRELIMINARES	52
3.3.1 Geometria dos corpos de prova.....	52
3.3.2 Preparação da carga injetável (<i>feedstock</i>).....	54
3.3.3 Injeção dos corpos de prova	56
3.3.4 Extração química	58
3.3.5 Extração térmica	59
3.3.6 Sinterização	59
3.3.7 Dados de densidade	61
3.3.8 Microestrutura metalográfica	61
3.4 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS DEFINITIVOS	62
3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS (CORPOS DE PROVA)	65
3.5.1 Propriedades magnéticas - Curvas de histerese	66
3.5.2 Propriedade Elétrica - Resistividade Elétrica	68
3.5.3 Propriedades mecânicas	68
3.6 ESPECIFICAÇÕES E SIMULAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA.....	69
3.6.1 Especificações da máquina	69

3.6.2 Simulação da máquina	72
4 ANÁLISE DOS RESULTADOS	73
4.1 ANÁLISE DA CARGA PREPARADA	73
4.2 CORPOS DE PROVA PRELIMINARES	74
4.2.1 Densidade e Microestrutura	74
4.2.2 Resistividade Elétrica.....	76
4.3 CORPOS DE PROVA DEFINITIVOS	78
4.3.1 Corpo de prova de gravatinha injetado na mini injetora	78
4.3.2 Densidade, microestrutura e microdureza	80
4.3.3 Curvas magnéticas	85
4.3.4 Resistividade Elétrica.....	87
4.4 SIMULAÇÕES	88
5 CONCLUSÕES.....	91
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	93
REFERENCIAS.....	94
APÊNDICE 1 - OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS – LIGA FE-1%P.....	99
APÊNDICE 2 – DESENHO DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA BARRA	104
APÊNDICE 3 – DESENHO DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA ANEL	105
APÊNDICE 4 – DESENHO DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA ANEL TOROIDAL.....	106

1 INTRODUÇÃO

O apelo por energias renováveis tem sido uma máxima nos dias de hoje, onde se tem mais notícias sobre o fim das reservas de combustíveis fósseis.

O Brasil tem seguido esta tendência e cada vez mais tem investido na ampliação do percentual de participação das energias renováveis dentro de sua matriz energética, dentre as quais se pode destacar a energia eólica.

A expansão da participação dessa energia está limitada pelo custo-benefício desta tecnologia quando relacionada aos meios mais tradicionais de geração de energia no país. Entretanto, tem-se visto um aumento substancial nos investimentos para desenvolvimento dessa tecnologia.

Considerando que a energia eólica pode ser representada pelos aerogeradores, dispositivos capazes de captar a energia cinética dos ventos, converter em energia mecânica e por sua vez em energia elétrica, ou seja, avançar nas tecnologias associadas pode levar à melhora no seu custo-benefício. Dentre os pontos mais problemáticos estão os perfis aerodinâmicos das asas, o controle eletrônico e as máquinas elétricas.

As máquinas elétricas rotativas podem assumir comportamento de motor ou gerador e são constituídos de duas partes: núcleo do estator e rotor. Hoje, estes núcleos são fabricados a partir de lâminas de aço baixo carbono – espessura menor que um milímetro – agrupados em pacotes. Existem geradores que utilizam chapas de aço-silício, com conteúdo aproximado de 3% de silício.

A fabricação destes núcleos é formatada da seguinte maneira: laminação das chapas, estampagem, isolamento elétrico, empacotamento e fixação. Vale salientar que a isolamento das chapas é realizada através de um tratamento térmico em forno que confere uma camada de óxido de ferro que forma o isolante (FITZGERALD *et al*, 2006).

Sabe-se que a forma e o acionamento de máquinas elétricas encontram-se bem aprimorados, mas já o desenvolvimento na fabricação dos núcleos é que oferece as melhores oportunidades, contudo nos materiais.

Entretanto, processos como Metalurgia do Pó convencional (M/P), Materiais encapsulados (SMC) e Moldagem de Pós Metálicos por Injeção (MIM) permitem a

construção de núcleos maciços com melhores propriedades, tais como resistividade elétrica e permeabilidade magnética. A aplicação das técnicas supracitadas está limitada para casos de geometrias complexas que não priorizam o rendimento das máquinas elétricas. Contudo, alguns estudos estão realizados para verificar a real aplicação destas técnicas para fabricação de motores e geradores (HAMLER *et al.*, 2006; MITROVIĆ *et al.*, 2012; NARASIMHAN *et al.*, 1992).

1.1 OBJETIVO GERAL

Assim, este trabalho tem por objetivo o estudo e testes de materiais magnéticos macios obtidos a partir de pó de ferro e sua aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas com alimentação de corrente trifásica de armadura, em substituição os tradicionais pacotes de chapas de aço laminada pelo processo de Moldagem por Injeção de Pós Metálicos, com enfoque no uso em aerogeradores. O controle de parâmetros no processo de moldagem permite a obtenção de diferentes componentes com melhores propriedades eletromagnéticas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir uma carga injetável a partir de ferro (Fe) e silício (Si), e todos os parâmetros associados a obtenção de peças, como composição da carga, parâmetros de mistura, injeção, extração química e térmica e sinterização.
- Determinar a dureza e as microestruturas dos corpos de prova em cilindro;
- Obter as curvas de histerese e as resistividades elétricas a partir dos corpos de prova em forma de anel;
- Simular uma máquina síncrona trifásica com ímãs permanentes semelhantes a um modelo convencional de mercado possível de ser utilizada em aerogerador;

- Comparar as propriedades obtidas com outras ligas semelhantes produzidas por M/P convencional.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 METALURGIA DO PÓ

A Metalurgia do Pó é vista como um processo metalúrgico que se difere dos demais por cinco motivos básicos: uso de pós (metálicos ou não) como insumo principal; ausência de fase líquida (ou parcial); produção de peças que atendam tolerâncias apertadas; conferir propriedades físicas às peças quando da impossibilidade de outros processos; e possibilidade de produção em massa de forma competitiva (CHIAVERINI, 1992).

Uma vez de posse dos pós – matéria-prima – o processo ocorre em duas etapas: compactação e sinterização. Na compactação, se aplica pressão mecânica nos pós em temperatura ambiente no interior das matrizes. Já na sinterização, levam-se os produtos da fase anterior a uma temperatura abaixo do ponto de fusão da liga, em ambiente com pressão e temperatura controlados por um determinado tempo. É nesta etapa, que são conferidas as propriedades físicas, como por exemplo, a resistência mecânica, a dureza (CHIAVERINI, 1992).

A Metalurgia do pó (M/P) tem como vantagens, a conformação de metais de difícil execução pelos processos convencionais como os metais duros, obtenção de características estruturais ímpares como a porosidade controlada, fabricação de materiais compósitos, controle rígido de qualidade e praticamente eliminação da rebarba. Entretanto, possui limitações como o lote econômico de produção para fazê-lo competitivo perante aos demais e a dimensão das peças a serem produzidas (CHIAVERINI, 1992).

Além da M/P convencional, têm-se processos alternativos como: a compactação a quente, a compactação isostática a quente, e mais comumente, a *Moldagem de Pós Metálicos por Injeção (MIM)* (DIRSCHNABEL; ARAÚJO, 2014; HEANEY, 2012; LIBERATI, 2001).

A MPI combina a metalurgia do pó convencional com a injeção termoplástica. Consiste na mistura de pós metálicos com um aglomerante normalmente polimérico. Essa mistura é injetada dentro de um molde no qual adquire a forma da cavidade. Na

sequência, as peças têm seu aglomerante removido quimicamente e termicamente (MITROVIĆ *et al.*, 2012).

2.2 MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE PÓS

A Moldagem de Pós Metálicos por Injeção – ou MIM - é um processo de fabricação bem estabelecido e com custo competitivo para produção de peças de tamanho pequeno a moderado (NYBERG *et al.*, 2005).

A mesma deriva da Moldagem por Injeção de Plásticos, tendo basicamente quatro etapas: (1) mistura do pó metálico com um ligante polimérico para formar a carga injetável; (2) a injeção desta carga em um molde – como a injeção de plásticos; (3) remoção do ligante e (4) a sinterização. A Figura 1 mostra de maneira simplificada o processo de MPI (NYBERG *et al.*, 2005).

Figura 1: Processo de moldagem por injeção de pós



Fonte: Adaptado de Kim *et al.*, 2013.

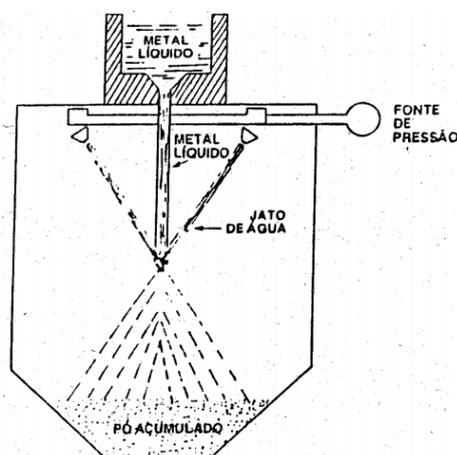
2.2.1 Obtenção dos pós

Para obtenção dos pós – metálicos ou não – para matéria-prima, podem ser utilizados diversos processos que serão designados de acordo com as características requeridas na aplicação bem como as propriedades exigidas, como por exemplo, a resistência mecânica. Um mesmo pó pode ser obtido por diferentes métodos. Dentro da gama de processos para obtenção de pós pode-se destacar quatro principais como a seguir (CHIAVERINI, 1992):

1 – Métodos mecânicos: normalmente são por quebra ou moagem. Usados para materiais frágeis ou fragilizados de outro processo prévio. Caracteriza-se por utilizar martelos ou moinhos para reduzir o tamanho de partícula a um determinado tamanho (CHIAVERINI, 1992).

2 – Atomização: aqui o metal fundido (matéria-prima) é projetado através de um furo adequado de maneira a formar um filete de material ainda líquido que sofre o ataque de jatos fluidos, podendo estes serem de ar, água ou gases, como por exemplo, o argônio. Quando estes jatos atingem o metal provocam a pulverização bem como o resfriamento do mesmo, conforme esquematicamente é mostrado na figura 2. O pó resultante desta operação é reduzido e peneirado para o uso. O controle da granulometria do pó varia de acordo com as variáveis do processo, como a espessura do filete de material fundido, a pressão do fluido, entre outras. Analogamente, quando se usa água como fluido se obtém partículas anguladas, já com jatos de ar tende-se a obter partículas esferoidais (MORO; AURAS, 2007).

Figura 2: Esquema do processo de atomização por água



Fonte: Chiaverini, 1992.

3 – Redução química: este tipo de processo emprega reações químicas de redução de compostos metálicos com agentes redutores gasosos ou sólidos, normalmente carbono e hidrogênio. Usa-se frequentemente também o carbono, entretanto este é aplicável a carbonetos relativamente instáveis, como no caso o carboneto de tungstênio e o ferro. O caso mais relevante para esta técnica é o da produção do pó de ferro. Este por sua vez é obtido da formulação de minério de magnetita pura seca e moída misturada com coque e calcário que é levada a fornos que realizam a decomposição do calcário que reage com o coque, que por sua vez reage com os óxidos de ferro, gerando partículas de ferro metálico que se agrupam como blocos. Estes blocos são submetidos a processos mecânicos para obtenção de granulometria desejada (CHIAVERINI, 1992; MORO; AURAS, 2007).

4 – Eletrólise: basicamente, colocam-se os metais desejados em solução aquosa (normalmente ácida) submetidos a uma corrente elétrica. Tal solução agirá para atacar o ânodo (o metal a ser corroído) que formará sais, estes por sua vez de acordo com a corrente migrarão para o cátodo. Os depósitos no cátodo podem ser de duas maneiras: um esponjoso de baixa aderência ou uma camada densa, mas macia. Este processo gera pós com elevada pureza, baixa densidade e pós normalmente dendríticos. Uma vez recolhidos da eletrólise estes pós são peneirados e secados (CHIAVERINI, 1992).

Entretanto a escolha do mais adequado ocorre em virtude de características como distribuição do tamanho de partícula, compressibilidade, densidade aparente, e que influenciam diretamente no produto final, como por exemplo a pureza e a composição final. A Tabela 1 apresenta comparativo entre as técnicas de produção de pós metálicos (BARBOZA, 2009).

Tabela 1: Comparativo entre as diferentes técnicas de produção de pós

Técnica	Tamanho (µm)	Forma	Material
Atomização a gás	5-40	Esférica	Ligas
Atomização a água	6-40	Arredondada	Ligas
Atomização centrífuga	25-60	Esférica	Ligas
Atomização a plasma	2-40	Esférica	Ligas
Carbonyl	0,2-10	Esférica	Elementos
Oxi-redução	1-10	Poligonal	Elementos
Precipitação	0,1-3	Poligonal	Compostos
Moagem	0,1-400	Irregular	Materiais frágeis

Fonte: Bonaldi e Schaeffer, 2008.

De acordo com a Tabela 1, tem-se que os processos de atomização fornecem pós de geométrica esférica, que é aparentemente mais favorável para o processo de compactação num processo de MP convencional, bem como dimensões mais próximas. Os demais processos tendem a gerar pós com formatos mais irregulares, que podem favorecer nas propriedades desejadas após a sinterização (CHIAVERINI, 1992).

2.2.2 Preparação da Carga Injetável (*feedstock*)

A obtenção da carga injetável ocorre pela mistura dos pós – obtidos de acordo com os processos supracitados na Tabela 1 – com o ligante, que normalmente é um material baseado em composto poliméricos. A literatura normalmente utiliza um termo em inglês para ligante, '*binder*'. A mistura destes componentes é realizada em temperaturas nas quais o ligante está em estado líquido e o binário pó-ligante forma um fluido viscoso com a consistência de uma massa (BOSE, 1995).

As funções básicas do *binder* são: auxiliar na formação do componente durante a injeção e conferir a resistência ao componente gerado. Isso acontece por conta da moldabilidade do polímero e da capacidade de manter coeso o particulado até a etapa de sinterização. Para que isso seja possível também se adicionam aditivos ao ligante, tais como dispersantes, estabilizantes. Na Tabela 2 é possível visualizar as características importantes para o ligante (KATE *et al.*, 2014).

Tabela 2: Características para um ligante ideal para MPI

Critério	Características desejadas
Interação com o pó	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo ângulo de contato • Boa adesão ao pó • Atração capilar das partículas • Quimicamente passivo em relação ao pó
Características de escoamento	<ul style="list-style-type: none"> • Baixa viscosidade na temperatura de moldagem • Baixa alteração de viscosidade durante a moldagem • Aumento de viscosidade no resfriamento • Pequena molécula para caber entre as partículas
Extração do ligante	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de degradação abaixo da temperatura de mistura e da temperatura de moldagem • Baixo carbono residual após queima • Produtos atóxicos e não-corrosivos após queima

Continua

Continuação

Processamento	<ul style="list-style-type: none"> • Barato e disponível facilmente • Validade longa • Seguro e ambientalmente aceitável • Não degradável em ciclos térmicos • Alta resistência • Alta condução térmica • Baixo coeficiente de expansão térmica • Solúvel nos solventes mais comuns • Alta lubricidade • Pequeno comprimento de cadeia e sem orientação
---------------	---

Fonte: Adaptado de Kate *et al.*, 2014.

Os quatro critérios apresentados na Tabela 2 são levados em conta considerando que mesmo após a injeção do sistema ligante, o *binder* confira forma a peças com qualidade e que sejam passíveis as demais etapas de processo, como extração térmica e sinterização, por exemplo.

Existem muitas formulações possíveis, mas a escolha da carga injetável, ocorre devido ao tipo de equipamento de injeção, ao molde e principalmente às características relacionadas anteriormente. Na Tabela 3, é possível verificar alguns exemplos de cargas já realizadas para injeção de metais com o objetivo de serem obtidas propriedades magnéticas.

Tabela 3: Exemplos de composição de sistema ligante para materiais magnéticos

Metal	Composição do sistema ligante (%)	Referência
Fe-5,5%Si	Parafina - 69%; Polipropileno - 20%; Cera de carnaúba - 10%; Ácido esteárico - 1%	Heaney, 2012.
Fe-9,5Si-5,5Al	Parafina - 69%; Polipropileno - 20%; Cera de carnaúba - 10%; Ácido esteárico - 1%	Heaney, 2012.
Fe-50Ni	Parafina - 69%; Polipropileno - 20%; Cera de carnaúba - 10%; Ácido esteárico - 1%	Heaney, 2012.
Fe-50Ni	Parafina - 60%; Polietileno de alta densidade - 15%; Polipropileno - 10%; PS - 10%; Ácido esteárico - 5%	Ma <i>et al.</i> , 2013.
Ferrita de Estrôncio	Polipropileno - 30%; Polietilenoglicol - 70%	Lee e Jeung, 2001.
Fe-Co	Parafina; Polipropileno	Silva <i>et al.</i> , 2008.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Observa-se que a parafina (cera) é o normalmente o principal componente nos *binders* relacionados com a produção de materiais com propriedades magnéticas, de acordo com a Tabela 3, seguido do PP e do PE, sendo estes principalmente responsáveis por conferir a fluidez para a injeção do sistema ligante. Nota-se a presença também do ácido esteárico que também age no sentido de aumentar o índice de fluidez dos *binders*. Salienta-se que os percentuais apresentados variam de acordo com os experimentos realizados pelas referências da Tabela 3.

2.2.3 Injeção

O processo de injeção em MPI é similar a moldagem de plásticos, e segue os seguintes passos, conforme Figura 3:

1 – Início de ciclo: o material já foi abastecido e aquecido à temperatura de processo, deixando a carga em estado fundido. Então o ciclo inicia-se com o fechamento do molde e a aproximação do bico de injeção no canal de injeção do molde (BEISS *et al.*, 2003; BOSE, 1995).

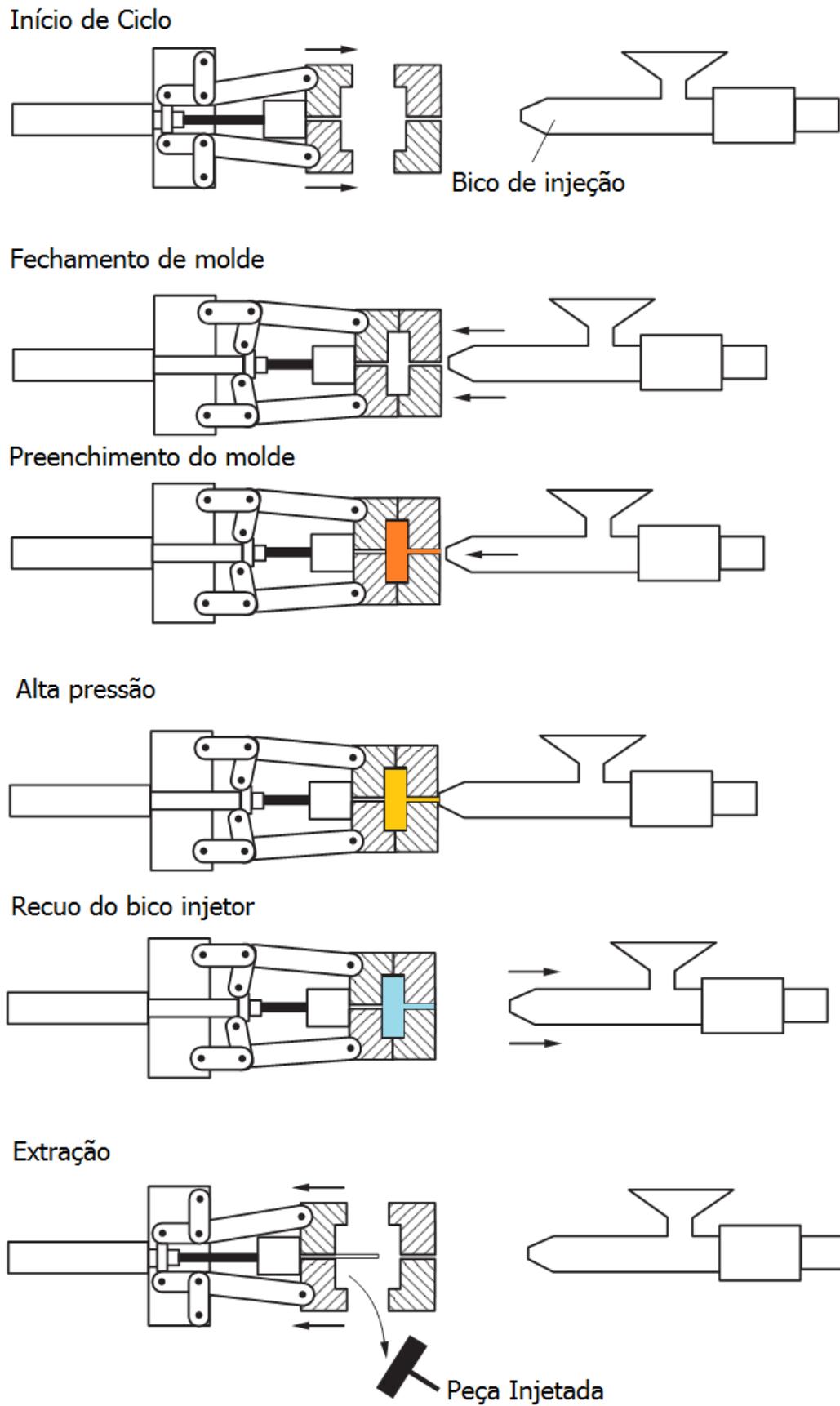
2 – Preenchimento do molde: o material é forçado em sentido às cavidades do molde através do bico injetor, devido ao movimento da rosca. Inicialmente o molde é completamente preenchido pelo movimento de translação da rosca, após o material continua sendo enviado para dentro do molde para que se atinja o equilíbrio hidrostático através de um incremento de pressão. Por fim, essa pressão é mantida para finalizar a formação da peça (BEISS *et al.*, 2003; BOSE, 1995).

3 – Resfriamento: o bico é recolhido sem movimentar a rosca e a peça é resfriada no próprio molde (BEISS *et al.*, 2003; BOSE, 1995).

4 – Extração: atingido o tempo de resfriamento, a parte móvel do molde se recolhe e a peça pode ser extraída – manualmente ou automaticamente (BEISS *et al.*, 2003; BOSE, 1995).

Quando para equipamento para MPI, seguem-se também os mesmos modelos de máquinas injetoras utilizadas na moldagem de plásticos por injeção. Entretanto as maiores diferenças são perceptíveis nos moldes (BOSE, 1995).

Figura 3: Esquema do ciclo de injeção

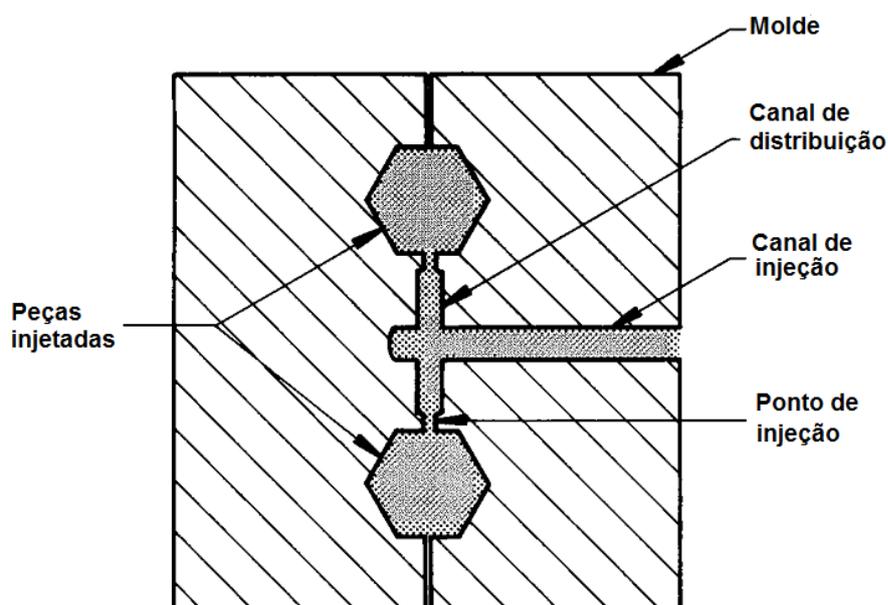


Fonte: Adaptado de Beiss *et al.*, 2003.

Os moldes normalmente são fabricados em aço ferramenta ou aço tratável, como aço inoxidável e aço de baixo carbono. Em casos de prototipagem ou desenvolvimento, utilizam-se ligas de alumínio devido a fácil usinagem. Em termos de configuração têm-se moldes com duas ou três placas, sendo que ao menos uma é fixa. Seu projeto leva em conta todo o caminho que o material deve realizar, e isto inclui o canal de injeção (*'sprue'*), os canais de distribuição (*'runners'*) e os pontos de injeção (*'gates'*), como pode ser visto na Figura 4 (BOSE, 1995).

Normalmente, os moldes para MPI levam em consideração o fato do encolhimento dimensional da peça injetada em relação ao processo de extração, que pode chegar aos 25% (BOSE, 1995).

Figura 4: Esquema de um molde



Fonte: Adaptado de Bose, 1995.

2.2.4 Extração química

Uma vez injetada e extraída, a peça deve passar por um processo de extração dos ligantes. Normalmente se inicia pela extração química, também chamada em inglês de *'solvent debinding'*. Quando se trata de um sistema com muitos ligantes, se utiliza essa técnica para remover o componente primário do sistema, ou quando o componente é um óleo. Cita-se que os sistemas mais usuais são baseados em um

óleo (ou cera) e um ou dois polímeros que não são solúveis no solvente químico (BOSE, 1995).

O princípio de funcionamento é remover um grande volume de ligante, resultando em uma grande quantidade de poros abertos, restando ainda polímero agregado a forma mais rígida da peça, que são retirados com a extração térmica (normalmente polímeros como o PP e o PE). Para que se realize esta remoção, peças são imersas no solvente químico desejado por um determinado tempo e temperatura para que seja suficiente para remover dessa fração primária. Os compostos químicos mais utilizados são: acetona; tetracloreto de carbono; hexano; etanol e tricloroetileno (BOSE, 1995).

O mecanismo é composto de quatro estágios: (1) difusão do solvente no sistema ligante; (2) interdifusão do solvente com ligante, formando um gel inchado; (3) dissolução do polímero; (4) por fim, a solução solvente-ligante se difunde em sentido à superfície da peça (WESTCOT *et al*, 2002).

2.2.5 Extração térmica

É um processo complexo porque envolve mecanismos físico-químicos, mas com método e equipamento simples. Os mecanismos químicos envolvidos se dão pela degradação térmica do polímero devido à pirólise, já os mecanismos físicos envolvem a difusão de compostos voláteis na superfície da peça injetada bem como as alterações da distribuição do polímero na peça verde. Adiciona-se como complicador que o aquecimento da peça depende da transferência de calor e das entalpias de reação envolvidas na pirólise (HEANEY, 2012).

Durante a extração térmica, a resistência do componente decai devido primeiramente ao enfraquecimento térmico do polímero e depois devido à perda do mesmo. Junto a estes efeitos tem-se a ação de tensões (térmicas, e/ou gravitacionais; e/ou residuais) que podem levar a trincas ou distorção, tanto em nível macroscópico como em nível microscópico. Com o intuito de prevenir estes defeitos, é comum o uso de ciclos de aquecimento muito lentos, ou em mais de uma etapa até atingir a temperatura desejada para a que se evapore o polímero. Na Tabela 4 tem-se alguns polímeros e a temperatura de extração química (HEANEY, 2012).

Tabela 4: Temperatura de extração térmica de alguns polímeros em sistemas ligantes

Polímero	Temperatura de extração térmica (°C)
PP	450–500
PE	500–600
Poliacetal	300–450

Fonte: Adaptado de Heaney, 2012.

A Figura 5 mostra a evolução da microestrutura da peça durante a extração térmica. Considerando que a peça verde é imediatamente após a extração do molde, o estágio inicial se deve à extração química (supracitada) e o estágio final se dá devida a extração térmica. A ocorrência de defeitos está associada as tensões devido aos gases aprisionados formados na microestrutura devido à queima do polímero (ENNETI *et al.*, 2012).

Figura 5: Evolução da microestrutura durante as etapas de extração

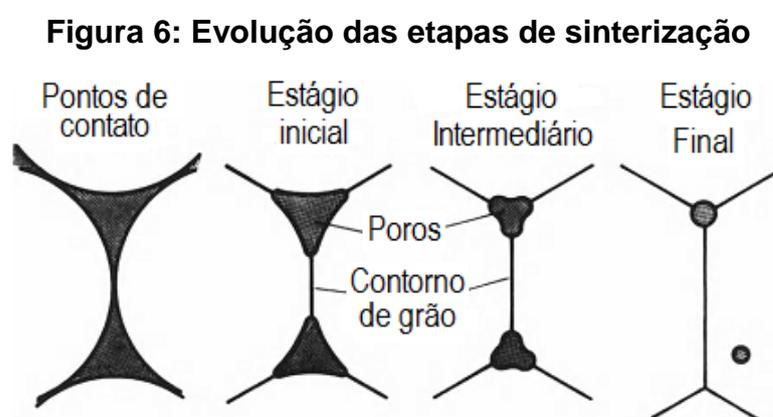


Fonte: Adaptado de Enneti *et al.*, 2012.

2.2.6 Sinterização

A sinterização visa remover os ligantes residuais e converter a massa de pós em uma peça coesa sem perder a forma de quando foi injetada. Por definição, é um tratamento térmico para ligar as partículas de forma coesa na forma de uma estrutura sólida via transporte de massa devido ao aquecimento a uma temperatura abaixo do ponto de fusão do principal componente. São estas ligações que aumentam a resistência. Na realidade, a sinterização reduz a energia superficial da massa de pó pela formação de ligações entre as partículas que reduzem a área superficial.

Esse processo ocorre em quatro etapas, como pode ser observado na Figura 6: (1) primeiro ocorre a adesão e o rearranjo que se dá devido a forças de van der Waals fracas; (2) acontece um crescimento dos pontos de contatos da etapa anterior que leva a um estágio inicial de *'necking'* (contato estreito, como se fosse um istmo), aqui não ocorre um densificação da peça via de regra; (3) o estágio intermediário é onde ocorre o aumento da densidade, o *'necking'* perde a identidade, os poros se arredondam mas mantem-se conectados; (4) no estágio final, os poros que estavam conectados fecham, isolando-se, ocorrendo crescimento do grão. Esta etapa é mais longa que as demais e leva a densidade a patamares de 95% (BOSE, 1995; HEANEY, 2012).



Fonte: Adaptado de Bose, 1995.

Este é um processo que tem muitas variações quando se fala de ciclos. Isto leva a uma infinidade de microestruturas, mudanças dimensionais e propriedades finais. A Tabela 5 mostra exemplos de ciclos de sinterização para algumas ligas de ferro que tem como uso pretendido, fins magnéticos (BEISS *et al.*, 2003).

Tabela 5: Exemplo de ciclos de sinterização

Material	D [μm]	dT/dt [$^{\circ}\text{C}/\text{min}$]	T [$^{\circ}\text{C}$]	t [min]	Atmosfera
Fe	5	10	1200	60	Vácuo
Fe-2Ni	5	15	1250	60	Hidrogênio
Fe-50Ni	5	10	1250	60	Hidrogênio-nitrogênio
Fe-3Si	8	10	1350	180	Hidrogênio

Fonte: Adaptado de Beiss *et al.*, 2003.

Observa-se na Tabela 3 que para o Ferro puro e ligas de ferro com possíveis propriedades magnéticas, o tamanho de partícula é de 5 a 8 μm , com rampas de temperatura (dT/dt em $^{\circ}\text{C}/\text{min}$) semelhantes na casa de 10 graus, bem como a temperatura de sinterização desejada (referido por 'T'). Sendo que 't' é o tempo de manutenção no patamar de temperatura referido anteriormente, e a coluna 'Atmosfera' referente à atmosfera utilizada no forno de sinterização, como o hidrogênio sendo um gás mais comumente utilizado (BEISS *et al.*, 2003).

2.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

Para um adequado entendimento do comportamento dos materiais produzidos por MPI para aplicação em núcleos de aerogeradores é essencial o entendimento das grandezas físicas relacionadas ao comportamento magnético destes materiais. Assim foram abordados conhecimentos como campo magnético, indução magnética, fluxo magnético, permeabilidade magnética, magnetização, por exemplo. Ainda se versou sobre a curva de histerese, cujo formato pode diferenciar dois padrões de materiais magnéticos, macios e duros, como também fornece importantes propriedades.

2.3.1 Campo magnético, indução e fluxo magnético

O campo magnético será sempre produzido quando houver corrente elétrica em movimento, mas também por um ímã permanente. Neste caso não se fala em corrente elétrica, mas sim nos movimentos orbital e spin dos elétrons. Sendo assim, fica definido por \mathbf{H} (JILES, 1991; REITZ *et al.*, 1982).

Como o campo é gerada em função deste movimento, pode ser definido pela Lei de Ampère genérica (1):

$$\oint \overline{H \cdot dl} = \int J \cdot ds = i \quad (1)$$

Na qual \mathbf{H} é o campo magnético com unidade A/m, $d\mathbf{l}$ é comprimento infinitesimal em metros, \mathbf{J} é a densidade de corrente elétrica com unidade A/m², $d\mathbf{s}$ é o equivalente infinitesimal para área em metros quadrados e, por fim, i é a corrente elétrica em A (JILES, 1991; REITZ *et al.*, 1982).

Uma vez que este campo magnético é gerado, o meio responde através da indução magnética \mathbf{B} , também chamada de densidade de fluxo. Estas duas grandezas magnéticas, se relacionem através de outra propriedade, a permeabilidade do meio, ou do material. Por definição é tida como a força de uma carga elétrica em movimento. Conforme a Equação 2 tem-se:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \quad (2)$$

Na qual \mathbf{B} é indução magnética com unidade de medida em Tesla, \mathbf{H} é o campo magnético e μ é permeabilidade do meio físico, cuja unidade é Henry por metro.

Quando a indução magnética \mathbf{B} – que também pode ser chamada de campo magnético induzido - é orientada através de uma superfície qualquer, forma-se o chamado fluxo magnético. Conforme a Equação 3, trata-se da integral do campo pela área da superfície, entretanto caso a superfície seja plana e perpendicular ao campo magnético induzido. Salientar ainda que se a superfície for fechada, seu fluxo será nulo, porque todas as linhas de campo que entram em um lado saem do outro (JILES, 1991; REITZ *et al.*, 1982).

$$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{A} \cdot \cos \theta \quad (3)$$

Na qual Φ é o fluxo magnético com unidade Weber, \mathbf{B} é a indução magnética em A/m, \mathbf{A} é área da superfície em metros quadrados e $\cos\theta$ é o cosseno do ângulo entre a indução magnética e a área (JILES, 1991).

2.3.2 Permeabilidade Magnética Relativa

Considerando a Equação 2, percebe-se a existência da permeabilidade que é uma propriedade específica de cada meio. Sua dimensão – ou unidade – é Henri por metro (H/m).

Contudo para designar a permeabilidade de materiais sólidos se utiliza a razão entre a permeabilidade no meio e a permeabilidade no vácuo, conforme Equação 4. Essa é a permeabilidade relativa (CALLISTER; RETHWISCH, 2009):

$$\mu_r = \mu / \mu_0 \quad (4)$$

Na qual μ_r é a permeabilidade relativa e adimensional, μ é permeabilidade no meio e μ_0 é a permeabilidade no vácuo, cujo valor é de $4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Conceitualmente a permeabilidade relativa é indicador de quanto o material pode ser magnetizado, ou quanto pode ser induzido magneticamente na presença de um campo magnético.

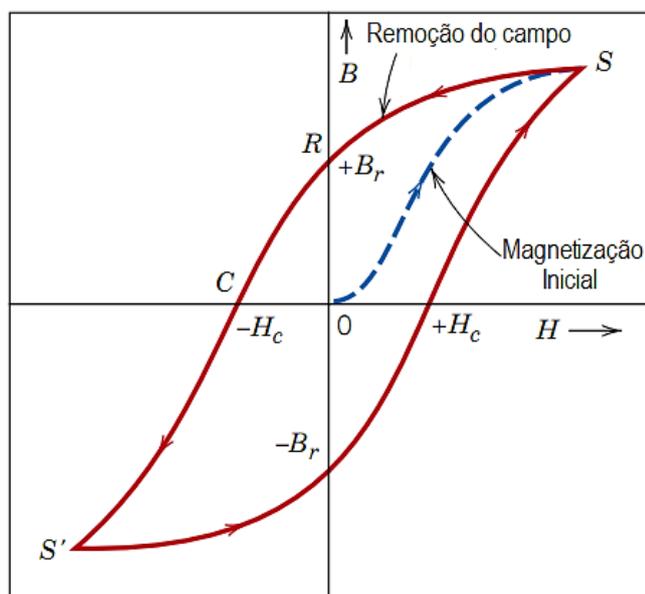
Através da permeabilidade relativa é possível classificar os materiais em: (i) diamagnéticos, cujo permeabilidade é levemente menor que 1, como por exemplo, o bismuto e a prata; (ii) paramagnéticos, com permeabilidade pouco superior a 1, como o ar e o alumínio; (iii) ferromagnéticos, com permeabilidade superior a 1, como o cobalto, o níquel e o próprio ferro (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

2.3.3 Curva de Histerese

Considerando-se os materiais ferromagnéticos, a maneira mais simples de representar suas propriedades magnéticas é através da curva de histerese, que nada mais é que um gráfico que relaciona a indução magnética \mathbf{B} e o campo magnético \mathbf{H} . Para estes materiais a relação $\mathbf{B} \times \mathbf{H}$ não é linear, haja vista que inicialmente o material não está magnetizado, com o aumento de \mathbf{H} , o campo magnético cresce a uma taxa menor, e então depois cresce a uma taxa maior até deixar de ser dependente de \mathbf{H} . Quando \mathbf{B} e \mathbf{H} encontram o ponto máximo, está estabelecida a saturação. Após esse ponto, \mathbf{H} é reduzido a zero por um caminho reverso e diferente do original. Aqui é definida a retentividade – cujo símbolo é \mathbf{B}_r – que representa material se mantém magnetizado mesmo com a retirada do campo \mathbf{H} (CALLISTER; RETHWISCH, 2009; JILES, 1991).

Já quando o campo \mathbf{B} é igual a zero, ele representa o campo magnético necessário para que se desmagnetize o material. E quando este valor tem seu máximo, chama-se de coercitividade, simbolizada por \mathbf{H}_c , conforme pode ser visualizado na Figura 7 (CALLISTER; RETHWISCH, 2009; JILES, 1991).

Figura 7: Curva de histerese para um material ferromagnético



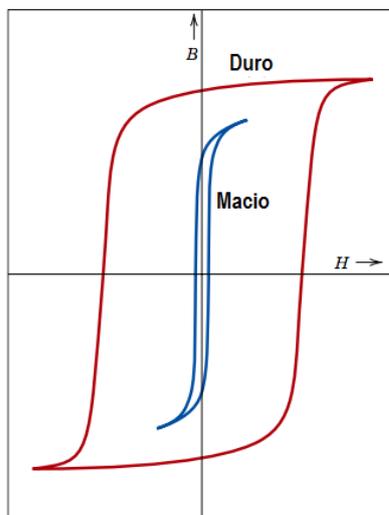
Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2009.

Os materiais ferromagnéticos são normalmente divididos em dois grupos de acordo com seus comportamentos em histerese: materiais magnéticos macios e materiais magnéticos duros (CALLISTER; RETHWISCH, 2009; JILES, 1991).

Os materiais magnéticos macios são usados em aplicações sujeitas a campos magnéticos alternantes e a perda energética deve ser baixa. Por esta razão a curva de histerese é fina e estreita, conforme a Figura 8 através da curva interna. Sendo assim a permeabilidade inicial é alta e a coercitividade é baixa. Assim, estes materiais são facilmente magnetizados e desmagnetizados (CALLISTER; RETHWISCH, 2009; JILES, 1991).

Já os materiais magnéticos duros são aplicáveis em ímãs permanentes, o que exige uma alta resistência à desmagnetização. Logo em histerese, os mesmos apresentam alta coercitividade, alta retentividade e baixa permeabilidade inicial, conforme mostrado na curva mais externa na Figura 8 (CALLISTER; RETHWISCH, 2009; JILES, 1991).

Figura 8: Curvas de histerese para materiais magnéticos macios e duros



Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2009.

2.3.4 Magnetização

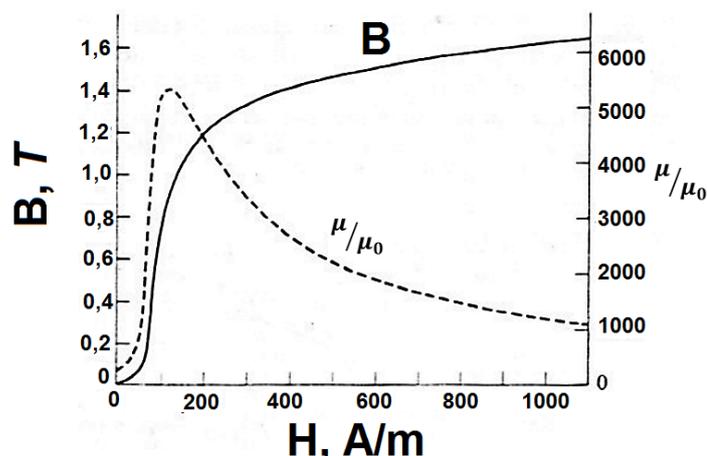
Com base no que fora escrito anteriormente, a magnetização é a capacidade do material em criar um campo magnético próprio uma vez que esteja sujeito a um campo magnético excitante. Genericamente, esta propriedade é diretamente proporcional ao campo magnético **B** mas inversamente proporcional a permeabilidade no vácuo (μ_0). Não obstante, a magnetização (símbolo **M**) também se relaciona com a indução magnética de acordo com a Equação 5 (REITZ *et al.*, 1982).

$$\mathbf{B} = \mu_0 \cdot (\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

Onde os símbolos B, H, M e μ_0 já foram escritos nos itens anteriores.

A definição anterior de magnetização é geral para casos de campo magnético gerado por corrente ou por ímã permanente. Mas esse fenômeno tem uma limitação física, a chamada saturação de magnetização, que pode ser visto na Figura 7, com a representação do símbolo **S**. A Figura 9 representa uma curva de magnetização de um material e a permeabilidade relativa (REITZ *et al.*, 1982).

Figura 9: Curva de magnetização de um Ferro comercial

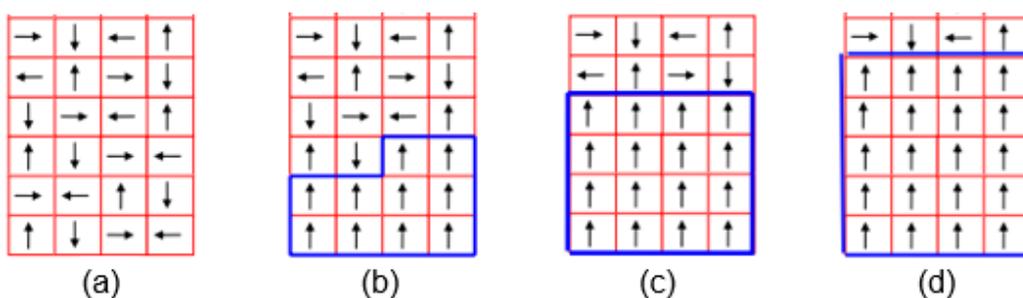


Fonte: Adaptado de Reitz *et al.*, 1982.

Para entender intrinsecamente a magnetização é preciso entender a ‘teoria dos domínios magnéticos’. Define-se domínio como uma porção do material no qual todos os átomos têm o mesmo alinhamento magnético, como se fossem ímãs muito pequenos (AQUINO; JUNIOR, 2016).

Normalmente, os domínios de um material magnético estão dispostos de forma randômica, de maneira a que a resultante destes seja nula, como pode ser visto na Figura 10 (a). Uma vez excitado o material com a presença de um campo magnético externo, os domínios começam a se alinhar na direção do campo externo, visualizado nos estágios (b) e (c) da Figura 10. Inicialmente esse direcionamento é mais fácil, o que pode ser evidenciado com o crescimento da curva de magnetização representada na Figura 9. Após esse início, o alinhamento torna-se mais difícil, levando ao fim à saturação do material, como visto na Figura 10 (d) (AQUINO; JUNIOR, 2016).

Figura 10: Evolução do alinhamento dos domínios magnéticos durante a magnetização



Fonte: Aquino e Junior, 2016.

2.3.5 Relutância e Força magneto-motriz

Considera-se a força magneto-motriz como o análogo para a lei de Ohm, sendo uma relação direta entre o fluxo magnético Φ (referido no item 2.3.1) e a força magneto-motriz η como pode ser visto na Equação 6 (JILES, 1991):

$$\eta = \Phi \cdot R_M \quad (6)$$

Na qual R_M é a relutância em AWb, que por sua vez é o equivalente a resistência elétrica em circuitos elétricos (JILES, 1991).

A relutância conceitualmente nada mais é que a oposição que o material oferece ao estabelecimento de um campo magnético induzido (H). Assim pode-se afirmar que materiais ferromagnéticos possuem uma relutância baixa e permeabilidade magnética alta, por exemplo (JILES, 1991).

2.4 MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Neste tópico visou tratar sobre as generalidades das máquinas elétricas, bem como seus modelos construtivos de acordo com a corrente elétrica de operação, as partes constituintes, rotor e estator. Abordaram-se os fatores determinantes para o correto desempenho considerando as propriedades magnéticas citadas no subcapítulo anterior, e também a aplicação dos ímãs permanentes.

2.4.1 Generalidades sobre máquinas elétricas

Máquinas elétricas basicamente são dispositivos capazes de transformar energia recebida de uma fonte na forma de energia mecânica ou trabalho em energia elétrica. Dentre as máquinas elétricas tem-se basicamente dois tipos: os *geradores* e os *motores elétricos*. Os geradores convertem energia mecânica em elétrica,

enquanto os motores realizam o processo de maneira reversa. Mas ambos são caracterizados pela ocorrência de movimento (FITZGERALD *et al*, 2006).

Os motores elétricos podem ser separados em dois grandes grupos devido a corrente elétrica de alimentação: *corrente contínua (CC)*, que são motores de custo elevado, e necessitam de uma fonte de corrente contínua e normalmente são aplicados em casos especiais, como em que se precisa variação de velocidade; e *corrente alternada (CA)*, que são mais comuns devido ao fato de o fornecimento de energia elétrica convencional vir com corrente alternada. Também se subdivide os motores elétricos de corrente alternada de acordo com o sistema de tensão fornecido: monofásico – alimentação em apenas uma fase, como nas tomadas das residências - ou trifásico, sendo este último o mais comum devido ao sistema. Existe ainda um terceiro grupo que são os motores alimentados com corrente pulsada – motores de passo (FITZGERALD *et al*, 2006).

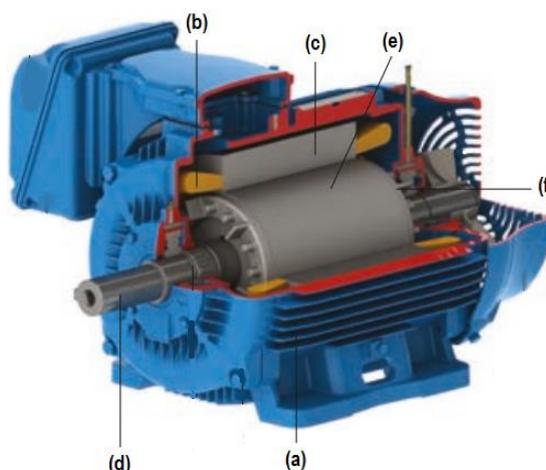
Outro aspecto relevante sobre motores elétricos é o modelo construtivo. Normalmente são duas partes: **estator e rotor** (FITZGERALD *et al*, 2006; WEG, 2015; WEG MÁQUINAS, 2015).

O estator é a parte fixa do motor, sendo constituído pela: (a) carcaça, que é estrutura base normalmente produzida em aço ou ferro fundido, tendo rigidez estrutural e é capaz de absorver baixas vibrações; (b) o enrolamento do estator, que é o conjunto de bobinas; e (c) pacote de chapas, normalmente produzidas a partir de aço magnético, prensadas. Estes dois últimos operam com a alimentação proveniente da corrente para gerar o campo magnético girante (FITZGERALD *et al*, 2006; WEG, 2015; WEG MÁQUINAS, 2015).

Já o rotor consiste em: (d) eixo, que transmite a energia mecânica gerada; (e) pacote de chapas, semelhantes tais quais ao referido no estator e (f) barras de curto-circuito. A definição acima é descrição mais precisa de um motor de indução com rotor do tipo gaiola. No caso de outros tipos de motores, as topologias construtivas são semelhantes, mas com diferenças sutis (FITZGERALD *et al*, 2006; WEG, 2015; WEG MÁQUINAS, 2015).

A Figura 11 mostra as partes supracitadas de (a) à (e), para o caso de um motor elétrico trifásico, conforme o direcionamento desta dissertação (FITZGERALD *et al*, 2006; WEG, 2015; WEG MÁQUINAS, 2015).

Figura 11: Modelo construtivo de um motor elétrico



Fonte: Adaptado de WEG, 2015.

2.4.2 Máquinas elétricas trifásicas

Quando se fala em máquinas elétricas trifásicas, normalmente pode se subdividir as mesmas em: **síncronas**, que operam com velocidade constante independente das variações na carga, mais utilizado em altas potências, e **assíncronas**, também chamadas de 'motores de indução', que operam com velocidade variável, de acordo com a carga aplicada no eixo do rotor, com ampla aplicação devido a sua simplicidade construtiva (FITZGERALD *et al*, 2006).

Quando se fala em motores assíncronos, tem-se duas opções: o de rotor de gaiola e o de rotor bobinado (ou enrolado). Estes motores são denominados como de motores de indução devido a indução de correntes alternadas no rotor pelo campo magnético girante produzido no estator. Construtivamente, o modelo de estator destes motores é semelhante ao supracitado. A diferenciação se dá no rotor, que normalmente é um cilindro de aço laminado com ranhuras, para que nelas sejam alojados os enrolamentos (FITZGERALD *et al*, 2006).

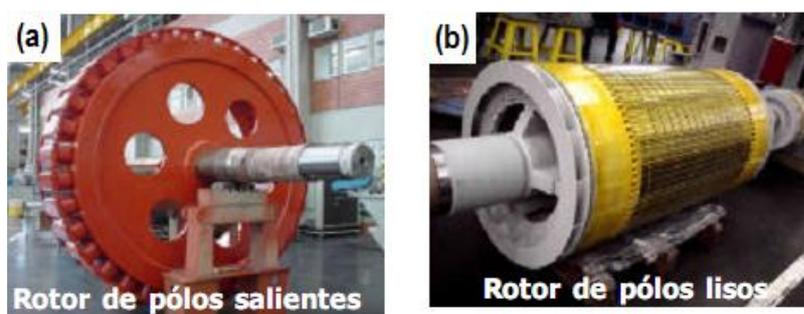
Já em termos de motores síncronos tem-se 3 tipos básicos: com excitatriz estática; com excitatriz sem escovas e com ímãs permanentes. O modelo **com excitatriz estática** se caracteriza por ter um conjunto de anéis coletores e escovam que alimentam de corrente os polos do rotor através de contato deslizante. Entretanto este modelo tem o inconveniente de precisar de uma fonte externa de corrente

contínua. São admissíveis dois modelos de rotores para este tipo de motor: polos salientes (a) e de polos lisos (b), conforme a Figura 12 (FITZGERALD *et al*, 2006).

Já quanto aos **motores com excitatriz sem escovas**, tratam-se de um modelo no qual a excitatriz é girante e acondicionada na traseira do motor, funcionando como um gerador de corrente alternada. Devido ao fato de não possuir escovas, estes motores tendem a ter custos de manutenção menores (FITZGERALD *et al*, 2006).

Os motores com ímãs permanentes se diferenciam dos demais motores síncronos pelo fato de se substituírem os enrolamentos por ímãs permanentes. O funcionamento é igual aos demais modelos supracitados. Às vezes os mesmos também são chamados de motores sem escovas (FITZGERALD *et al*, 2006).

Figura 12: Modelos de rotores para motores síncronos com excitatriz estática



Fonte: WEG Máquinas.

2.4.3 Fatores que determinam o desempenho de máquinas elétricas

Em um contexto direcionado para máquinas elétricas, a importância dos materiais magnéticos empregados é notória e de duplo efeito. Sendo possível trabalhar com fluxos magnéticos elevados e baixos nível de força magnetizante, além de direcionar e delimitar os campos magnéticos, a fim de gerar a potência de saída. Assim materiais ferromagnéticos são mais utilizados devido a diversas razões (SANTOS, 1999; FITZGERALD *et al*, 2006; CALLISTER; RETHWISCH, 2009):

- Facilidade em aumentar a densidade de fluxo (indução magnética) quando da presença de campo magnético **B**;
- Permeabilidade efetiva elevada em comparação a permeabilidade no vácuo, ou seja, permeabilidade relativa alta;
- Baixa coercitividade;

- Alta resistividades;
- Facilidade em atingir a saturação de indução (**S**) em baixos valores de campo magnético **B**;

Os núcleos das máquinas elétricas convencionais normalmente são fabricados de aço baixo-carbono, ou mais comumente, aço-silício (somente em motores de alto rendimento ou geradores), com teores que variam de 1% a 3% em Silício. A seleção desse elemento de liga é favorecida pelo fato de o mesmo aumentar a resistividade do aço, proporcionando melhoria nas características magnéticas, haja vista que o acréscimo de Si ao aço visa aumentar a resistividade dos núcleos e reduzir as correntes parasitas. Pode-se afirmar que o mesmo facilita o processamento do aço, haja vista que foca na entrega das propriedades supracitadas e não uma composição química final como os demais aços (SANTOS, 1999; FITZGERALD *et al.*, 2006; CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

2.4.4 Ímãs Permanentes e sua aplicação em Máquinas Elétricas

Quando se direciona o uso de ímãs permanentes em máquinas elétricas, como opção aos aços elétricos convencionais, tal ação se deve ao fato destes materiais terem uma alta resistência a de desmagnetizarem. Ou se tratando de curva de histerese, fala-se em alta coercitividade e alta relação **B-H** (grandezas citadas no item 2.3.1) (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Estes ímãs também são comumente chamados de materiais magnéticos duros, sendo assim também os ímãs podem ser divididos em dois grupos: (i) os convencionais e (ii) os de alta energia. Os materiais magnéticos duros convencionais apresentam um valor de B-H entre 2 e 80 kJ/m³. São normalmente ligas do tipo: aços ferromagnéticos (com adições de tungstênio ou cromo); 'CuNiFe' (cobre-níquel-ferro); 'AlNiCo' (alumínio-níquel-cobalto); e ferritas hexagonais como a ferrita de Bário (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Já os materiais magnéticos duros de alta energia são normalmente dois: os ímãs de Samário-Cobalto e os ímãs de Neodímio-Ferro-Boro. Os primeiros são um grupo de ligas derivadas da combinação de cobalto e ferro com elementos de terras-raras leves. A produção normalmente destas ligas é a partir da M/P convencional com o uso de um campo magnético externo aliado a compressão dos pós constituintes de

forma a pré-alinhar os campos magnéticos elementares. O grupo do Neodímio-Ferro-Boro tem a vantagem de ter matéria-prima mais acessível que os anteriores e duas opções de processo de produção: M/P e solidificação rápida. A escolha entre essas duas opções reflete na microestrutura e nas propriedades finais (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

As máquinas elétricas, ou motores, normalmente possuem no interior dois núcleos, um relativo ao rotor e outro ao estator, mas ambos possuem enrolamentos. De acordo com a corrente aplicada, define-se dois tipos de enrolamento: o de campo e o de armadura. Quando as máquinas são CC, os enrolamentos de campo estão no estator e os enrolamentos de armadura estão no rotor. Já nas máquinas CA, ocorre justamente o contrário (FITZGERALD *et al.*, 2006).

Assim materiais magnéticos duros são aplicáveis no caso de motores devido ao desempenho superior quando sujeitos a campos magnéticos continuamente mantidos se compararmos a eletroímãs por exemplo. Acrescenta-se o fato de esses materiais não gerarem calor durante a operação (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Na Tabela 6 tem-se alguns exemplos alguns materiais magnéticos duros e suas propriedades:

Tabela 6: Materiais magnéticos duros e suas propriedades magnéticas

Material	Composição	Retentividade	Coercitividade	Relação B-H
Aço Tungstênio	92,8%Fe,6%W, 0,5%Cr, 0,7%C	0,95	5.900	2,6
CuNiFe	20%Fe, 20%Ni, 60% Cu	0,54	44.000	12
Ferrita de Bário sinterizada	BaO-6Fe ₂ O ₃	0,32	240.000	450
Cobalto terra-rara	SmCo ₅	0,92	720.000	725
Neodímio-Ferro-Boro sinterizado	Nd ₂ Fe ₁₄ B	1,16	848.000	255

Fonte: Adaptado de Callister e Rethwisch, 2009.

2.5 MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS INJETADOS

2.5.1 Características dos Materiais Magnéticos Macios Injetados

No que tange aos materiais magnéticos macios por MPI, as características são semelhantes as mesmas desejadas para o caso de obtenção via M/P. Estas são influenciadas por vários fatores. As perdas por histerese são condicionadas a presença de defeitos – tais como impurezas, porosidade, contorno de grão - na microestrutura, haja vista que os defeitos impedem os movimentos de alinhamento dos domínios magnéticos. A indução de saturação também é uma propriedade afetada por estes possíveis defeitos, considerando que a mesma é função da densidade, que por sua vez é reduzida na presença de poros ou impurezas (BAS *et al.*, 2003).

Quando se fala de coercitividade (H_c), outra importante propriedade desejável aos materiais magnéticos macios, a mesma tende a aumentar com a presença de defeitos, principalmente microtensões internas, impurezas e poros, resultantes normalmente da obtenção dos pós. Em termos de saturação de magnetização (S), a microestrutura não afeta essa propriedade, mas sim a composição química. A saturação aumenta de acordo com o refino do pó quando da sua obtenção. Esse refino resulta em menor tamanhos de grão elementar, o que facilita a orientação dos domínios magnéticos de acordo com a aplicação de um campo magnético (SHOKROLLAHI, 2009).

2.5.2 Aplicações dos Materiais Magnéticos Macios Injetados

Os materiais magnéticos macios são materiais normalmente direcionados para aplicações que envolvam eletromagnetismo, como os já referidos motores, sensores, devido principalmente a sua alta indução magnética com pequenos campos magnéticos. Atualmente, as aplicações têm sido maiores em peças com tamanho reduzido com alto desempenho (HEANEY, 2012).

Alia-se o fato de que com o processo de MPI é possível produzir peças com geometria complexa e com alta produtividade se comparado ao processo de M/P convencional (HEANEY, 2012).

Dentre as aplicações práticas destes materiais tem-se: sensores; peças de controle dos freios ABS (*anti-lock break system*); sensores de ângulo para bombas; cabeçotes de impressoras (BAS *et al.*, 2003).

2.5.3 Principais Ligas de Materiais Magnéticos Macios Injetados

2.5.3.1 Ligas Fe-Si

Segundo Heaney (2012), a liga Fe-6,5%Si foi estudada a fim de verificar suas propriedades magnéticas. Os pós constituintes utilizados para tal foram obtidos de duas maneiras: atomização por água e por gás. Estes foram misturados a um sistema ligante composto de 69% de parafina, 20% de polipropileno, 10% de cera de carnaúba e 1% de ácido esteárico, a uma temperatura de 150 °C por 60 minutos (HEANEY, 2012).

A fim de investigar estas propriedades foram injetadas peças na forma de toróides, com 45 mm de diâmetro externo, 30 mm de diâmetro interno e 5,6 mm de espessura. As peças verdes passaram por extração química em atmosfera de heptano por 5 horas em temperatura de 75 °C, seguido de extração térmica em atmosfera de hidrogênio. Já a sinterização foi realizada à 1150-1350 °C em atmosfera de hidrogênio por uma a 3 horas em fornos elétricos (HEANEY, 2012).

Esta liga apresentou valores de indução magnética **B** entre 1,2 a 1,6 T, permeabilidade máxima (μ_{MAX}) entre 5.000 e 15.000 e coercitividade (**H_c**) abaixo de 95,7 A/m, sendo que os valores extremos são relacionados aquelas amostras com maior densidade relativa (HEANEY, 2012).

Outra liga que foi recentemente estudada é a liga com 3% de Silício pronta para injeção, tal estudo utilizou pó de Fe-Si comercial com tamanho médio de partícula entre 2 e 7 μ m, injetados com uma blenda com 60% de pós e 40% de sistema ligante. As propriedades magnéticas para tal liga foram: coercitividade (**H_c**) de 256 A/m; retentividade (**B_r**) de 0,078 T; permeabilidade máxima (μ_{MAX}) de 223; e intensidade máxima do campo magnético (**H**) em 503 A/m (MARTINS, 2015).

2.5.3.2 Ligas Fe-Ni

Algumas pesquisas relatam desenvolvimentos de ligas de ferro-níquel com intuito de desenvolver esta liga como um material magnético macio.

A primeira referência fala sobre a liga Fe-50Ni, que foi realizada por duas maneiras: (i) pó pré-ligado através de atomização à gás; e (ii) provém da mistura de pó de ferro com pó de níquel atomizado em uma proporção de 50 para 50. O sistema ligante era composto por 69% de parafina, 20% de polipropileno, 10% de cera de carnaúba, 1% de ácido esteárico. A relação 60/40 foi estabelecida para pós constituintes e sistema ligante, que foram misturados em uma temperatura de 145 °C por 5 horas (HEANEY, 2012).

As amostras injetadas tinham forma de disco (diâmetro de 30 mm e altura de 8,3 mm), após sofreram extração química. A extração térmica e a posterior sinterização foram realizadas com atmosfera de hidrogênio. Após mensuradas as densidades relativas, as amostras foram usinadas para que fossem obtidos corpos de prova na forma de anéis (com diâmetro externo de 23 mm, diâmetro interno de 13 mm, e espessura de 6,5mm) para que se pudesse obter as propriedades magnéticas. Uma vez obtidas estas amostras, as mesmas sofreram um recozimento por duas horas a fim de remover tensões residuais (HEANEY, 2012).

Ao fim observou-se que havia uma diferença sensível entre as amostras de pó pré-ligado para o pó elementar misturado (50/50) em termos de permeabilidade máxima μ_{MAX} , enquanto o primeiro atingia 27.000 o segundo atingia no máximo 19.500. Quando se fala de coercitividade (H_c) os valores variaram de 20,7 a 15,9 A/m, e o fluxo de densidade (B) variando de 1,56 a 1,37 T (HEANEY, 2012).

A segunda referência trata sobre uma mistura 1/1 de pós de ferro e níquel com tamanho médio em torno de 4,5 μm . O sistema ligante utilizado representa 40% do volume do *feedstock*, com constituição de: 60% parafina, 15% polietileno de alta densidade, 10% polipropileno, 10% poliestireno e 5% de ácido esteárico. A mistura pós mais sistema ligante foi realizada em uma temperatura de 140-150 °C por 60-90 minutos (MA *et al.*, 2013).

Amostras em forma de anel foram injetadas em uma temperatura em torno de 155 °C, após sofreram extração química em tricloroetileno em temperatura ambiente por 6 horas. A extração térmica foi realizada em temperatura máxima de 800 °C com

tempo total de 15 horas. Por fim, executou-se a sinterização com temperatura de 1300-1380 °C em atmosfera de hidrogênio por diversos tempos (MA *et al.*, 2013).

De acordo com os tempos de sinterização foram obtidas as seguintes propriedades magnéticas: (a) indução de saturação **B** variando entre 1,40 e 1,47 T; (b) permeabilidade máxima μ_{MAX} de 20.000 a 40.000; e (c) coercitividade **H_c** entre 10 a 8 A/m. Os valores de tempo de sinterização foram de 2 a 14 horas, onde o primeiro valor de propriedade citado é relativo a 2 horas e o segundo a 14 horas de sinterização (MA *et al.*, 2013).

2.5.3.3 Ligas Fe-Si-Al

Neste estudo utilizou-se dois tipos de pós oriundos de atomização ao gás e à água, ambos com tamanho médio de partícula em torno de 12,7 μm , e cujo balanço de massa referia para teor médio de 9,5% de Silício e 5,5% de Alumínio, conferindo uma denominação de liga Fe-9,5Si-5,5Al. Os mesmos pós foram misturados a mesmo sistema ligante constituído de parafina (69%), polipropileno (20%), cera de carnaúba (10%) e ácido esteárico (1%), em temperatura de 150 °C por uma hora (HEANEY, 2012).

Após injetadas, as peças passaram por extração térmica em hexano por 5 horas a uma temperatura de 75 °C. A extração térmica foi realizada em ambiente de hidrogênio com temperatura de 830 °C, e a sinterização foi realizada por uma hora em um delta de temperaturas entre 1200 e 1270 °C, variando entre atmosfera de hidrogênio e vácuo (HEANEY, 2012).

Estas amostras após sinterizadas foram usinadas na forma de toróides com diâmetro externo de 9 mm, diâmetro interno de 6mm e espessura de 3 mm, passando por subsequente recozimento à 900 °C por 6 horas no vácuo para eliminar as tensões residuais da usinagem (HEANEY, 2012).

Obteve-se assim um valor de indução magnética **B** de 0,83 T para caso de pó atomizado ao gás e 0,89 T para pó atomizado à água. Já em termos de retentividade **B_r**. Houve diferença sensível de 0,078 T para o caso gás e 0,56 T para caso água, e a coercitividade **H_c** ficou 5,58 A/m e 25,5 A/m, para pó atomizado ao gás e para o pó atomizado por água, respectivamente (HEANEY, 2012).

2.5.3.4 Ligas Fe-Co

Dentre as ligas de matérias magnéticas macios, ainda se pode falar sobre ligas que correlacionam percentuais de ferro e cobalto. O referido estudo, utilizou-se de pós elementares de Ferro e Cobalto, bem como pós pré-ligados de Ferro-Cobalto com adição de Vanádio, em torno de 2%. Foram determinadas como ligas de estudo: (a) Fe-50Co; e (b) Fe-Co-2V (SILVA, 2008).

O sistema ligante utilizado consistia em parafina, polipropileno, amida graxa, acetato de vinil etila e antioxidante. A mistura de pós mais sistema ligante foi misturada a uma temperatura de 180 °C por 60 minutos, sendo que o percentual de massa de pós foi em torno de 90 %. As peças foram injetadas na forma de anel para avaliação das propriedades magnéticas. A extração química foi realizada em duas etapas, uma de imersão em vapor de hexano por uma hora e outra de 16 horas no líquido saturado de hexano, ambas a 65 °C (SILVA, 2008).

Foram realizadas duas rotas de extração térmica e sinterização: (a) extração térmica por 42 horas em temperatura de 980 °C em atmosfera de hidrogênio, como modificação de atmosfera após atingir a temperatura acima, e após uma sinterização de 8 horas em ambiente com argônio e hidrogênio até uma temperatura de 1330 °C; (b) a outra rota de extração foi realizada em atmosfera oxidante por 60 horas em temperatura de 500 °C, após ocorreu sinterização por 30 horas com 1250 °C com manutenção deste patamar por 3 horas (SILVA, 2008).

Para a liga Fe-50Co obteve-se um valor de indução magnética **B** variando de 1,88 a 2,02 T; permeabilidade máxima μ_{MAX} de 2375 a 3161; e a coercitividade **H_c** ficou 110 a 260 A/m (SILVA, 2008).

Já a liga Fe-Co-2V teve indução magnética **B** variando de 1,87 a 2,13 T; permeabilidade máxima μ_{MAX} de 5546 a 5635; e a coercitividade **H_c** ficou 158 a 180 A/m (SILVA, 2008).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INTRODUÇÃO

Os materiais estudados neste trabalho compreendem as ligas Fe-1%P e Fe-1%Si através do processo de Moldagem por Injeção de Pós (MPI), possíveis de serem utilizados no núcleo do rotor de uma máquina elétrica síncrona rotativa – neste caso em específico um Gerador Trifásico aplicado em aerogeradores - bem como a comparação com materiais obtidos a partir dos processos convencionais de Metalurgia do Pó.

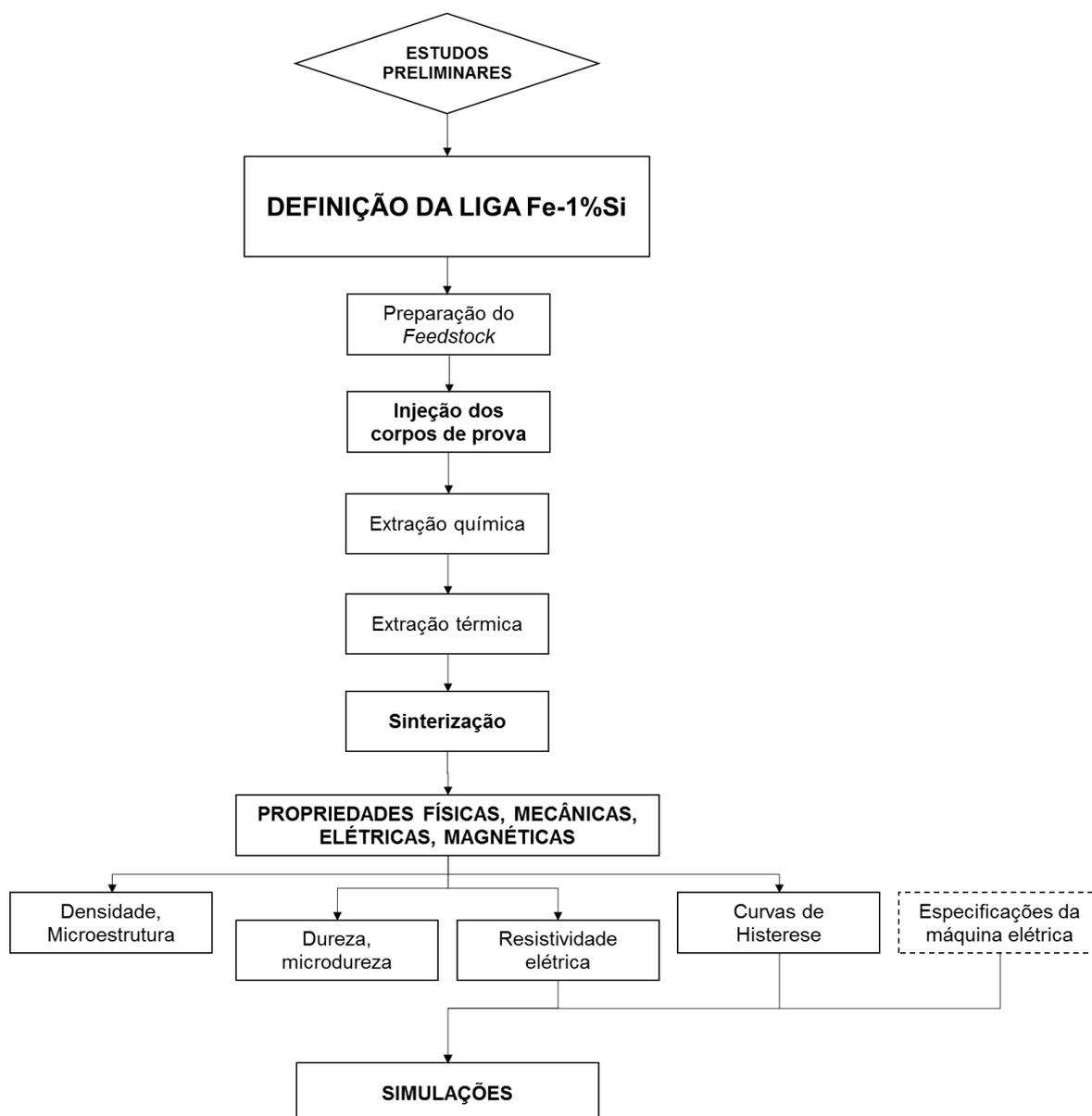
Inicialmente estudaram-se o Ferro puro e as ligas Fe-1%P e Fe-1%Si obtidas por M/P convencional através de suas propriedades físicas de interesse (propriedades magnéticas, propriedades elétricas e propriedades mecânicas). A seguir foi estudada a liga Fe-1%P por MPI, no qual foram obtidas peças na forma de barra e de anel. Neste estudo, preparou-se a liga metálica e seguiu-se a carga, misturando a liga com polímeros e ceras, e posteriormente injetadas. Após a injeção, foram então realizadas a extração química, o qual resultou em peças dentro das especificações, contudo, na extração térmica, somente uma peça obteve consistência, as demais ficaram muito frágeis, impossível de serem colocadas para sinterização.

Após extensos estudos, conclui-se que a complexidade da obtenção de peças de liga Fe-1%P injetadas e com qualidade para obtenção das propriedades físicas, comprometeria a exequibilidade deste estudo. Os desenvolvimentos referentes a liga Fe-1%P encontram-se no Anexo I.

Por este motivo, decidiu-se partir para o estudo da liga Fe-1%Si, no qual foram injetadas peças preliminares na forma de barra, anel e *gravatinha*. Após, foram obtidas as propriedades de densidade, dureza microdureza e resistividade elétrica, análise metalográfica, bem como as características para obtenção das peças como composição da carga de injeção e temperatura e parâmetros para extração térmica, extração química e sinterização. A seguir foram obtidos corpos de prova definitivos na forma de anel, uma vez que se constatou que todas as características importantes para este trabalho, poderiam ser obtidas a partir de corpos de prova nesta geometria.

Finalmente foram realizadas simulações de uma máquina elétrica síncrona rotativa de 10 CV com ímãs permanentes de Nd-Fe-B, com rotor construído a partir das ligas estudadas, tanto por M/P quanto por MPI, e estator a partir de chapas M15, na qual foram comparados fluxo de entreferro e torque na ponta de eixo. Os dados de simulação das ligas estudadas também foram comparados à simulação de uma máquina convencional, ou seja, rotor e estator de chapas laminadas. A Figura 13 demonstra o fluxo metodológico básico utilizado após a decisão de focar-se na liga Fe-1%Si.

Figura 13: Diagrama de blocos para o trabalho com foco na liga Fe-1%Si



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.2 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA SINTERIZADOS

Para efeito de comparação de propriedades físicas e resultados de simulação, pesquisou-se o Ferro Puro, Fe-1%P e Fe-1%Si a partir da Metalurgia do Pó convencional. Os corpos de prova foram obtidos, no LdTM/UFRGS (Laboratório de Transformação Mecânica da UFRGS) e no LMPMM/Feevale (Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos da Oficina Tecnológica da Feevale).

Para análise das propriedades magnéticas e da propriedade elétrica (resistividade elétrica), utilizou-se a matriz da Figura 14 (a), para a qual foram obtidos corpos de prova na forma de anéis (Figura 14-b).

Figura 14: Amostras na forma de anel – (a) matriz – (b) corpo de prova



Fonte: Jacoby, 2015.

Para análise das propriedades mecânicas (dureza e tensão de escoamento) das ligas estudadas utilizou-se a matriz da Figura 15(a), obtendo-se corpos de prova na forma de cilindros (Figura 15-b).

Figura 15: Amostras na forma de cilindro – (a) matriz – (b) corpo de prova



Fonte: Jacoby, 2015.

Os pós de ferro misturados a fósforo e silício foram adquiridos junto à *Höganäs Brasil Ltda.* Conforme certificado do fabricante, o pó de ferro utilizado foi o ASC100.29, com 99,4% da granulometria entre 45 μm e 150 μm . O pó Fe₃P (84% de Fe, 16% de P) apresentou 90% de sua dimensão abaixo de 14,58 μm .

Por sua vez, a análise granulométrica do pó Fe-Si 45 (55% de Fe e 45% de Si) indicou 87% de seu conteúdo entre 45 μm e 250 μm . O pó de ferro foi misturado com 1% de fósforo e 1% de silício em um misturador duplo cone, com rotação de 60 RPM durante 20 minutos, para dispersão dos constituintes. Também foi adicionado às misturas 1% de lubrificante sólido à base de estearato de zinco.

A pressão de compactação dos corpos de prova foi de 600 MPa, seguindo-se orientação de dados da literatura. A sinterização dos corpos de prova foi realizada em forno tubular tipo mufla, com atmosfera controlada de pressão atmosférica e mistura de 5% de hidrogênio e o restante de nitrogênio.

Utilizou-se uma taxa de aquecimento de 10°C por minuto, até a temperatura de 500 graus, permanecendo as peças nesta temperatura durante 30 minutos para retirada do lubrificante sólido (estearato de zinco). A seguir, a temperatura foi elevada para 1.150°C, ocorrendo a sinterização, com um novo patamar isotérmico nesta temperatura por 60 minutos. Após, as peças permaneceram no forno para resfriamento lento até a temperatura ambiente (GERMAN, 1984).

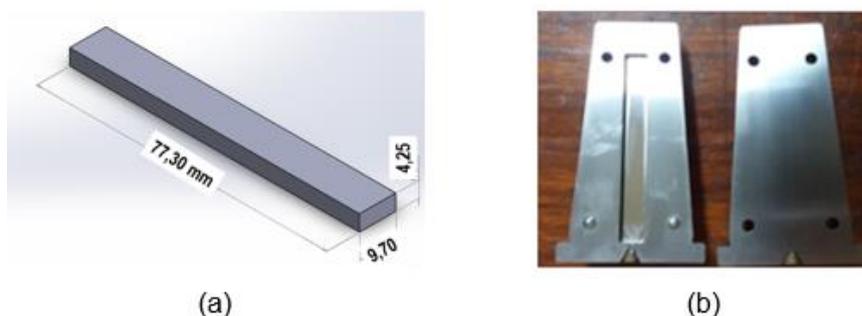
3.3 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS PRELIMINARES

Inicialmente, foram injetados corpos de prova na forma de barra para avaliação dos parâmetros de processo, tais como patamares de injeção, extração química e térmica e sinterização-anel para avaliação das propriedades magnéticas e elétricas e *gravatinha* para propriedades mecânicas.

3.3.1 Geometria dos corpos de prova

A Figura 16-a mostra o desenho dos corpos de prova na forma de barra (vide apêndice 2) e a Figura 16-b a matriz utilizada para a injeção dos corpos de prova.

Figura 16: Corpos de prova na forma de barra: (a) desenho esquemático – (b) matriz para injeção



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 17-a mostra o desenho dos corpos de prova na forma de anel (vide apêndice 2), bem como a Figura 17-b a matriz utilizada.

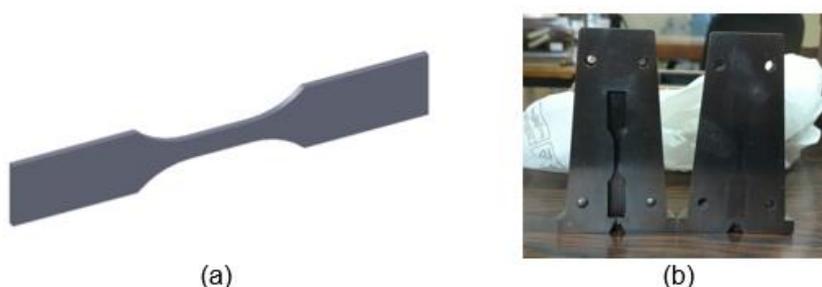
Figura 17: Corpos de prova na forma de anel: (a) desenho esquemático – (b) matriz



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 18-a mostra o desenho dos corpos de prova na forma de *gravatinha* (corpo de prova padrão do ensaio de tração) e a Figura 18-b, a matriz utilizada.

Figura 18: Corpos de prova na forma de gravatinha: (a) desenho esquemático – (b) matriz



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3.2 Preparação da carga injetável (*feedstock*)

A carga para injeção da liga Fe-1%Si foi baseada em algumas referências bibliográficas nas quais verificou-se a injeção de cargas metálicas a partir de ferro puro e Fe-3%Si, com êxito (GERMAN, 1984; HEANEY, 2012; MARTINS, 2015).

Para a liga Fe-1%Si utilizou-se pó de ferro da empresa TCK com as seguintes especificações: pureza de 99,5% e tamanho de partícula de 9 µm. Já o pó de silício empresa Vetec Química fina LTDA, com as seguintes especificações: pureza de 99% com tamanho de partícula entre 10 a 20µm. Os pós foram colocados em um misturador duplo cone, por 20 minutos e rotação de 50 RPM para dispersão dos constituintes.

Considerando Martins (2015), a carga foi designada com 60% do volume em pós metálicos e os demais 40% sendo o sistema ligante. A Tabela 7 relaciona os percentuais em volume de cada constituinte do sistema ligante.

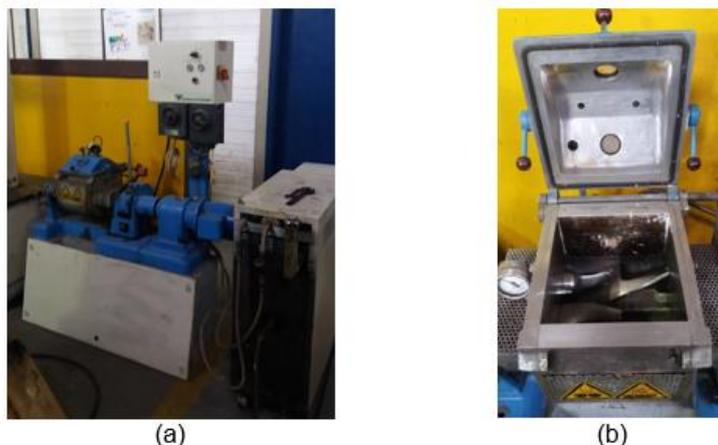
Tabela 7: Percentuais em volume dos constituintes do sistema ligante da liga Fe-1%P

Constituinte	% em Volume
PEAD	50 %
Parafina	25 %
Cera de carnaúba	24 %
Ácido esteárico	1 %

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para este trabalho projetou-se uma carga com massa de 2,2 kg, que representou 1941 gramas de pó metálico da liga (1921,6 g do pó de ferro puro e 19,4 g de silício). Enquanto que o sistema ligante representou uma massa de 256,3 g da mistura, sendo: 128,1 g de PEAD; 64 g de parafina; 61,4 g de cera de carnaúba; e 2,5 g de ácido esteárico. Foi utilizado um misturador de carga injetável '*Stephan*' aquecido a partir de óleo (Figura 19-a e 19-b). A temperatura do óleo foi ajustada em 220 °C, entretanto a temperatura no interior do misturador foi de aproximadamente 180 °C, medidos com um pirômetro.

Figura 19: Misturador para preparação da carga: (a) vista externa – (b) vista interna



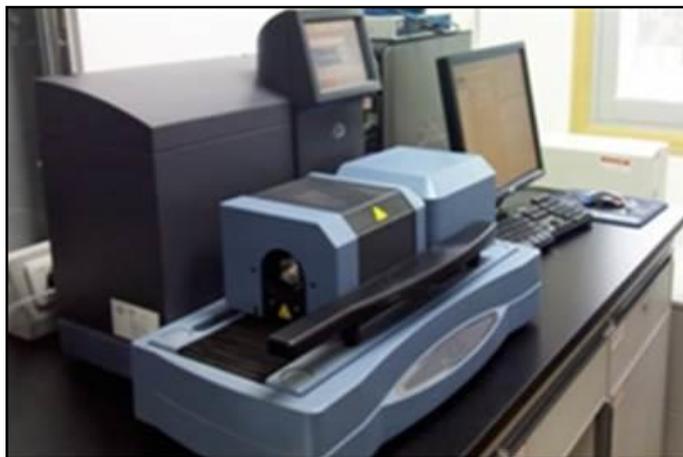
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Inicialmente foi colocada metade da carga de pó metálico e metade do PEAD, até que ocorresse a fusão do polietileno (180 °C), formando uma espécie de pasta, porém não homogênea. A seguir foi colocada metade das outras substâncias formadoras do *binder* (parafina, cera de carnaúba e ácido esteárico), e deixado por cinco minutos a misturar. Após foi colocado o restante de toda a carga, e deixado por mais 5 minutos, até que ficasse uma massa homogênea.

A seguir o material foi despejado em um recipiente para que acontecesse seu resfriamento. Uma vez resfriado, com uma espátula, procedeu-se a quebra da massa em pedaços menores, com tamanho entre 2 e 4 cm. Após, estes foram colocados em um moinho de facas marca *Seibt* (com potência de 1,6 CV) para que ocorresse a peletização.

As curvas termoanalíticas de 'Calorimetria exploratória diferencial (DSC)' e 'Análise termogravimétrica (TGA)' a partir da carga foram obtidas em um equipamento de análise térmica diferencial simultânea da marca *Thermal Analysis* modelo Q600 SDT (Figura 20) presente no LdTM-UFRGS, neste ensaio é possível ver as temperaturas de fusão e degradação da carga injetável.

Figura 20: Equipamento de análise térmica simultânea da marca Thermal Analysis modelo Q600 SDT

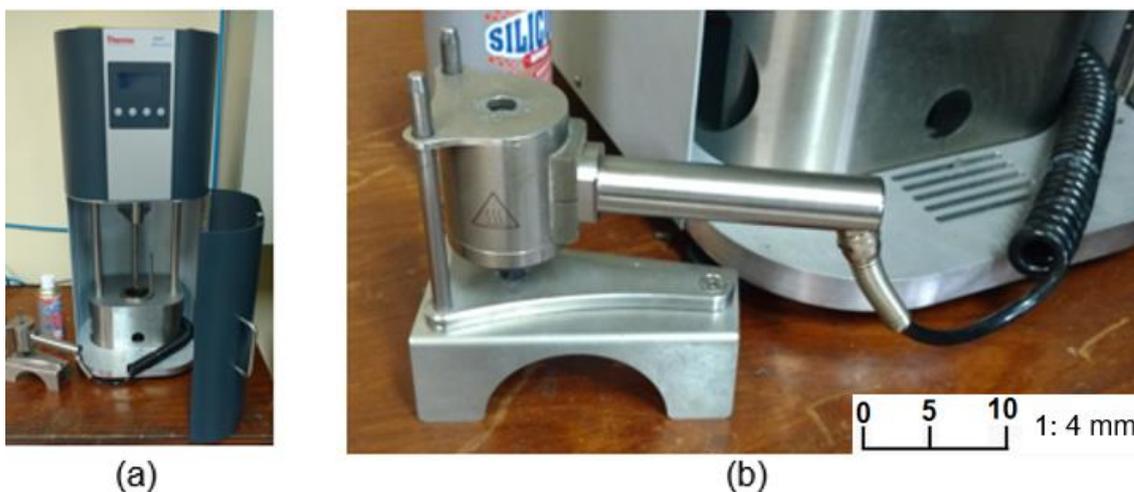


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3.3 Injeção dos corpos de prova

As peças, na forma de barra e de gravatinha, foram injetadas na injetora *Haake MiniJet II* da marca *Thermo Scientific* (Figura 21-a e 21-b).

Figura 21: Injetora: (a) visão geral - (b) canhão



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os parâmetros de injeção foram conforme mostrados na Tabela 8:

Tabela 8: Parâmetros de processo para injeção

Parâmetro:	Valor:
Temperatura do cilindro	190 °C
Temperatura do molde	70 °C
Pressão de injeção	550 bar
Tempo de injeção	2 s
Pressão de recalque	90 bar
Tempo de recalque	2 s

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os corpos de prova na forma de anel foram injetados na injetora da marca *Himaco* modelo *Apta 80* (Figura 22-a), bem como a matriz montada na Figura 22-b.

Figura 22: Injetora: (a) visualização em perspectiva – (b) matriz na forma de anel montada na injetora



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os parâmetros de injeção foram conforme mostrados na Tabela 9:

Tabela 9: Parâmetros de processo para injeção dos anéis

Parâmetro:	Unidade:	Estágios:			
Temperaturas do cilindro	°C	180	180	170	150
Pressão de injeção	bar	50	40		
Velocidade de injeção	mm/s	60	30		
Tempo de injeção	s	15			
Tempo de resfriamento	s	10			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3.4 Extração química

A extração química foi realizada em sistema semelhante a banho-Maria com hexano como solvente por 6 horas na faixa de temperatura de 60 °C a 80 °C. A Figura 23 mostra o dispositivo utilizado para extração química conforme Martins (2015).

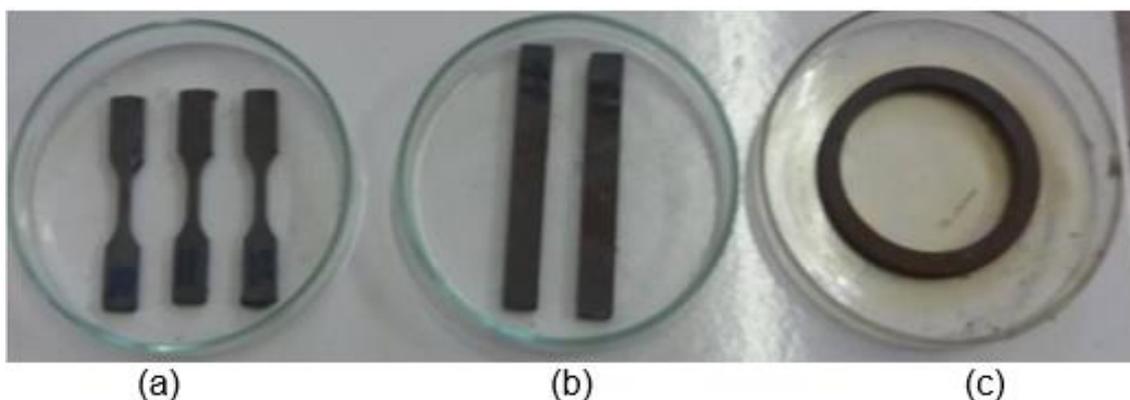
Figura 23: Dispositivo utilizado para extração química



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 24 mostra os corpos de prova injetados e com extração química, forma de gravatinha (Figura 24-a), barras (Figura 24-b) e anel (Figura 24-c).

Figura 24: Corpos de prova e com extração química a partir da liga Fe-1%Si na forma de: (a) gravatinha – (b) barra – (c) anel



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3.5 Extração térmica

A extração térmica foi realizada em um forno tipo 'mufla' com atmosfera à vácuo com uma taxa de aquecimento $0,2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura de $600 \text{ }^\circ\text{C}$, após foi mantida esta temperatura por uma hora, e por fim, desligou-se o aquecimento, conforme Martins (2015). A Figura 25 mostra o forno utilizado.

Figura 25: Forno utilizado na Extração térmica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

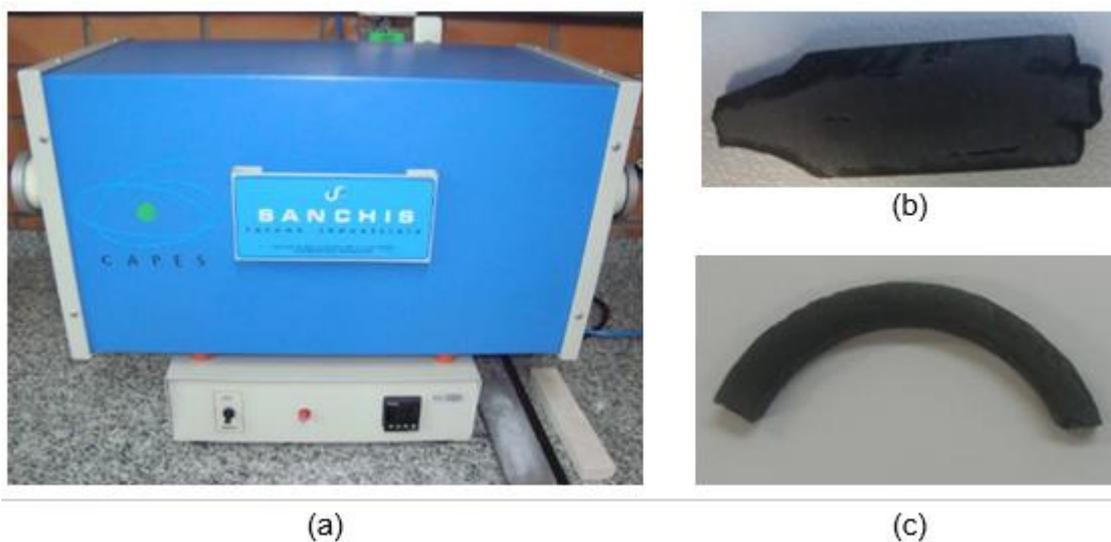
3.3.6 Sinterização

Após vários testes de injeção, tratamento químico, tratamento térmico e sinterização, foi possível obter dois corpos de prova consolidado, sem deformação e sem bolhas, a saber, um anel e uma gravatinha, contudo o anel apresentou duas trincas, e que ocorreu devido a esforços ocorridos na extração da peça da matriz na injetora. Salienta-se que a injetora utilizada para confecção dos anéis (Fig. 22-a) não possuía dispositivo de extração e, mesmo aqueles corpos de prova aparentemente sem trincas, apresentavam as mesmas não observáveis a olho nu. Outra dificuldade encontrada, tanto para extração térmica dos anéis quanto das barras, foi as pequenas dimensões do forno de extração (Fig. 25), pois a câmara fora projetada para corpos de prova de dimensões menores aquelas dos corpos de prova mostrados na Fig. 24. Esta também foi a razão de insucesso da consolidação dos corpos de prova na forma de barras.

Os testes de sinterização foram realizados em dois fornos diferentes. O primeiro teste foi em um forno tipo mufla (Fig. 26-a) com atmosfera controlada à base de gás verde (5 % de Hidrogênio e 95 % de Nitrogênio) com taxa de aquecimento de 10 °C por minuto, até a temperatura de 1150 °C, ficando neste patamar por aproximadamente 60 minutos. Após as peças permanecerem no forno até o mesmo resfriar à temperatura ambiente (GERMAN, 1984; MARTINS, 2015).

Uma vez que tinha se obtido somente uma gravatinha com bom acabamento após a o tratamento térmico, optou-se por partir a mesma em duas partes e realizar ensaios de sinterização em dois fornos diferente. A Figura 26-b mostra a metade da gravatinha e a Figura 26-c mostra um segmento do anel, ambas após a sinterização e polimento.

Figura 26: Primeira Sinterização – (a) forno – (b) gravatinha – (c) anel



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Embora a sinterização dos corpos de prova ilustrados na Figura 24 tenha sido realizada com sucesso, as peças apresentaram uma camada de óxido significativa. Por este motivo optou-se pela segunda sinterização no qual utilizou-se um forno de uma empresa de Metalurgia do Pó, tipo esteira com atmosfera inerte a base de nitrogênio (Fig. 27-a). A Figura 27-b mostra a outra metade da gravatinha sinterizada.

Figura 27: Segunda sinterização – (a) forno – (b) peça injetada e sinterizada



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.3.7 Dados de densidade

Para os corpos de prova com geometria definidas como as barras, os cilindros e os anéis, a densidade foi medida a partir das dimensões destes corpos de prova.

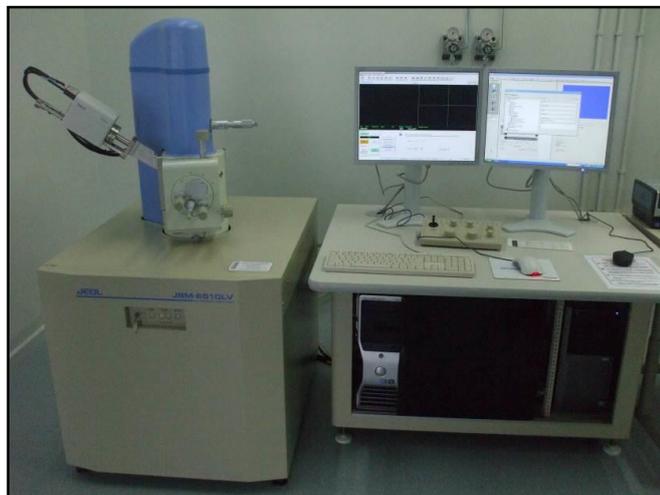
Já para as gravatinhas ou os segmentos das mesmas, a densidade foi medida utilizando o método de Arquimedes, que consiste em medir o volume por meio de um copo de Becker com água sobre uma balança Bel Brasil, modelo Mark500CP, capacidade 500 g, exatidão 0,001 g. A medida de massa foi executada na mesma balança.

3.3.8 Microestrutura metalográfica

As análises metalográficas foram preparadas pelo método tradicional, segundo norma ABNT NBR 13284:1995. Com o procedimento de embutimento em polímero auto-polimerizante, lixamento e polimento. A observação de microestrutura, distribuição de grãos e porosidade, foi realizada no microscópio óptico, marca Union, com ampliações de 200 e 400x.

O MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) utilizado foi o Modelo: JSM-6510LV Marca: JEOL (Figura 28) com capacidade de aumento: 300.000x.

Figura 28: Microscópio eletrônico de varredura modelo: JSM-6510LV marca: JEOL



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para preparação, as amostras devem ser resistentes a ação do feixe de elétrons nas condições de vácuo. Portanto, as amostras em primeiro lugar devem ser limpas (não liberarem pó ou resíduos dentro da câmara) estejam bem presas ao suporte, estejam livres de umidade e de materiais voláteis. Também devem ser condutoras para evitar o carregamento de imagem.

3.4 OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS DEFINITIVOS

A obtenção dos corpos de prova preliminares permitiu que fosse definido os parâmetros de injeção com sucesso, onde foram definidos todas etapas e patamares, de preparação da carga, injeção, extração química e térmica e sinterização. Para a obtenção dos corpos de prova definitivos, foram preparadas novas cargas, contudo utilizando-se o reômetro de torque como misturador (Fig. 29) o qual permite a obtenção de uma mistura mais homogênea do *feedstock*.

Figura 29: Reômetro de torque: (a) vista geral - (b) vista ampliada da câmara interna



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Considerando as dificuldades para injeção dos anéis na Injetora Himaco, bem como o volume relativamente grande, quando comparado a câmara do forno de extração térmica, tanto do anel quanto da barra, optou-se pela injeção de todos os corpos de prova na mini injetora Haake MiniJet II (Fig. 21).

A Figura 30-a mostra uma gravatinha injetada, e abaixo a mesma gravatinha já sinterizada (Figura 30-b), para uma carga preparada no reômetro de torque.

Figura 30: Gravatinha gerada por carga via reômetro de torque– (a) injetada – (b) sinterizada



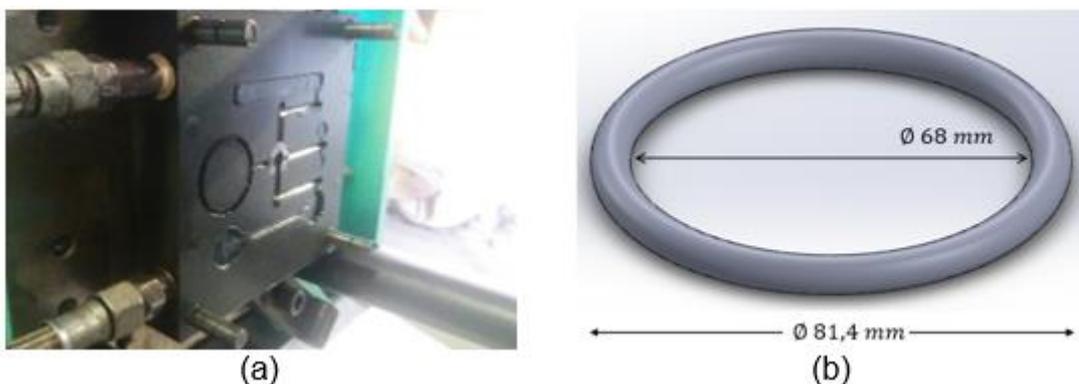
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Contudo, os corpos de prova obtidos a partir desta mini injetora resultaram em baixa densidade, o que enfatizou a baixa pressão de injeção da mesma. Por este motivo, ficou definido a utilização da Injetora *Arburg Allrouder 170 S* (Figura 31).

Figura 31: Injetora Arburg Allrounder 170 S

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 32-a mostra uma matriz montada na injetora Arburg. Nesta Figura, pode-se observar que é possível injetar peças na forma de anel toroidal, barra e gravatinha. Já a Figura 32-b mostra as dimensões do corpo de prova de anel toroidal, ou com melhor detalhamento no Apêndice 4.

Figura 32: (a) Matriz para injeção de corpos de prova – (b) dimensões do corpo de prova na forma de anel toroidal

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nesta fase do trabalho, optou-se pela confecção somente do anel, pois a partir deste foi possível obter: curvas magnéticas; resistividade elétrica; densidade; microdureza; microestrutura.

Os dados de injeção utilizados estão relacionados na Tabela 10:

Tabela 10: Parâmetros de processo utilizados na injetora Arburg

Parâmetro:	Unidade:	Estágios:			
		1	2	3	4
Temperaturas do cilindro	°C	190	180	165	150
Temperatura do molde	°C	90			
Pressão de injeção	bar	800			
Pressão de recalque	bar	400			
Tempo de recalque	s	1,5			
Velocidade de injeção	cm ³ /s	35			
Tempo de resfriamento	s	15			

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

3.5 PROPRIEDADES FÍSICAS DOS MATERIAIS (CORPOS DE PROVA)

Quando se deseja verificar a aplicação de um novo material ou um novo processo para uso em núcleos de máquinas elétricas rotativas, investiga-se três grupos de propriedades físicas, como abaixo:

- Propriedades Magnéticas: coercitividade, permeabilidade, indução de saturação;
- Propriedades Elétricas: resistividade elétrica;
- Propriedades Mecânicas: dureza e microdureza.

Em termos das propriedades magnéticas, os materiais devem ter: elevada permeabilidade magnética, o que reduz a relutância do circuito magnético dos núcleos de ferro, concentrando todo o campo magnético no entreferro; elevada indução de saturação; e baixa coercitividade, o que reduz as perdas por ciclo de histerese.

Já quanto à propriedade elétrica, busca-se maximizar seu valor para minimizar o efeito das correntes parasitas. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, uma vez que esta isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. A redução das correntes

induzidas também pode ser obtida a partir do aumento da resistividade elétrica do material. Por este motivo, máquinas elétricas de alto rendimento são construídas com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono (BOLDEA; NASAR, 2009; JILES, 1991).

Em termos de materiais magnéticos macios, as propriedades mecânicas versam sobre a necessidade do material de suportar as vibrações no qual está submetida a máquina em que fazem parte. São de interesse saber a dureza e ductilidade. A dureza é a medida de quanto o material pode localmente resistir a deformações plásticas. Existem diversas técnicas para o ensaio que determina a dureza de um material, como por exemplo a dureza Rockwell, muito utilizada para metais (CALLISTER; RETHWISCH, 2009).

Resumidamente, busca-se as seguintes propriedades:

- Elevada Permeabilidade Magnética Relativa;
- Baixa Coercitividade Magnética;
- Elevada Indução de Saturação;
- Elevada Resistividade Elétrica;
- Dureza e/ou Ductilidade compatíveis com as vibrações as quais a máquina é submetida.

3.5.1 Propriedades magnéticas - Curvas de histerese

As propriedades magnéticas foram obtidas a partir das curvas magnéticas (laço de histerese e curva de magnetização) que relacionam campo magnético H aplicado a um material com a indução magnética B resultante.

A partir do laço de histerese, foram obtidas a retentividade (magnetismo remanente) e a coercitividade (campo desmagnetizante). Através da análise da curva de magnetização, obtiveram-se a permeabilidade magnética e a indução de saturação ou indução máxima (que também pode ser visualizada a partir do laço de histerese).

A determinação das propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide) segue a norma ASTM A773. As curvas magnéticas foram obtidas a partir de um dispositivo modelo TLMP-TCH-14 (Figura 33).

Figura 33: Traçador de curva de histerese modelo TLMP-TCH-14



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Para aplicação deste método de análise, é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Rowland (Figura 34). O procedimento consiste em isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado (Figura 34-a), enrolamento de espiras secundárias (Figura 34-b) e novo isolamento (Figura 34-c) seguido do enrolamento das espiras primárias (Figura 34-d) (ASTM_A773/A773M, 2001; JILES, 1991).

Figura 34: Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário



Fonte: Jacoby, 2015.

Os corpos de prova de anel foram bobinados de acordo com as seguintes características:

- Número de espiras do Primário (enrolamento externo = 145 com fio AWG 21);
- Número de espiras do Secundário (enrolamento interno = 200 com fio AWG 23);
- Densidade de espiras do Primário = 1.431 espiras/metro.

3.5.2 Propriedade Elétrica - Resistividade Elétrica

A resistividade do material (corpos de prova) foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para medição desta, utiliza-se um dispositivo denominado de multímetro, que mede diretamente a resistência elétrica do corpo.

Entretanto, para medição de resistência elétrica muito baixa, aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Portanto, o corpo de prova para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. Um artifício é a utilização de um anel, cortando-se um segmento do mesmo, fazendo que este tenha a forma de uma barra curvada, ou seja, de grande comprimento e pequena área de seção transversal. A Lei de Ohm estabelece que:

$$R = V/I \Rightarrow \rho = R \cdot A/L \quad (7)$$

Na qual ρ é a resistividade elétrica; R , a resistência elétrica; V , a tensão elétrica aplicada; i , a corrente elétrica aplicada; A , a área da seção transversal da barra e L representa o comprimento da barra (ou segmento de um anel) (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2009).

3.5.3 Propriedades mecânicas

Para avaliação da resistência à vibração de um material a ser utilizado em uma máquina elétrica rotativa, também foram realizados ensaios mecânicos nos corpos de prova.

Análise de dureza foi baseada na norma ABNT NBR ISO 6508 (escala Rockwell) ou ASTM E18 e ajustes de equivalências conforme ASTM E 140. As amostras são preparadas para análise de dureza na seção transversal por corte, lixamento e polimento (às vezes), ou quando superficial, por vezes somente limpeza ou lixamento. Dependendo do resultado de dureza, se adéqua, a melhor escala. Aí se usa a tabela de equivalências. Para as medidas de dureza utilizou-se durômetro marca INSIZE modelo ISH – BRV. Já para a microdureza foi medida a partir de um microdurômetro INSIZE, na escala Vickers com carga de 50 gf (HV 0,05 ou carga de

0,49 N), executado sobre as amostras preparadas por sequência de embutimento, lixamento e polimento.

3.6 ESPECIFICAÇÕES E SIMULAÇÃO DA MÁQUINA SÍNCRONA

As ligas por M/P convencionais e MPI injetadas foram simuladas para a avaliação de seu desempenho, quando utilizadas em núcleos magnéticos de máquinas elétricas rotativas ou geradores trifásicos possíveis de serem utilizados em aerogeradores e geradores a gás até 7 kW.

Estudos realizados no LdTM /UFRGS em parceria com Universidade FEEVALE, constaram que máquinas elétricas rotativas construídas com núcleos do estator ou estator e rotor com núcleos sinterizados obtiveram rendimento entre 29 e 40% (DA CAS *et al.*, 2014; DIAS *et al.*, 2010).

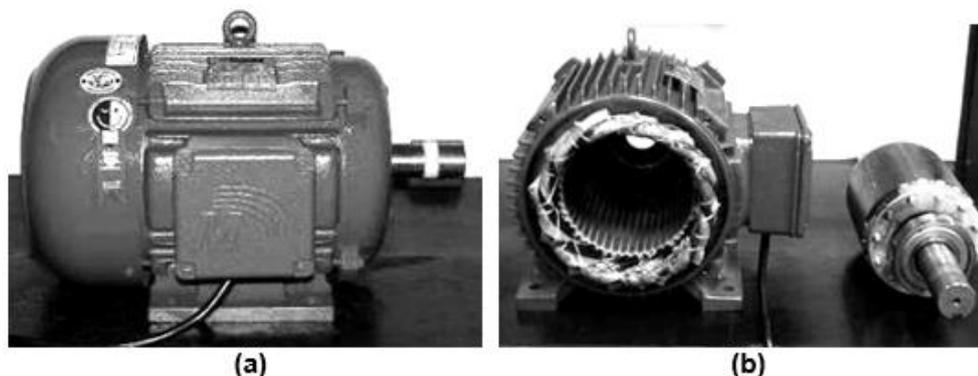
Contudo máquinas construídas a partir de estator de chapas e rotor a partir de materiais sinterizados obtiveram rendimento estimado em até 88% (CERVA, 2014; DIAS, 1999; JACOBY, 2015; PAULETTI, 2012).

Assim, optou-se pelo estudo de uma máquina elétrica síncrona com ímãs permanentes de 7 kW, construída na base de um motor de indução de 10 CV fabricado por Voges Motores, com núcleo de chapas laminadas e rotor a partir da MPI e M/P e ímãs permanentes de Nd-Fe-B (BOLDEA; NASAR, 2009; FITZGERALD *et al.*, 2006; KOSOW, 1991; TORO, 1994).

3.6.1 Especificações da máquina

A máquina síncrona estudada neste trabalho foi baseada em um motor de indução de alto rendimento, produzido por Voges Motores (antiga Eberle Motores) de Caxias do Sul (Figura 35).

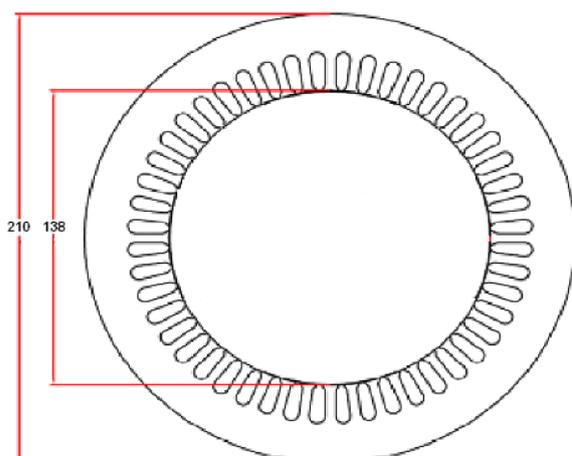
Figura 35: Motor de indução trifásico de 10 CV - (a) vista lateral - (b) parcialmente desmontado



Fonte: Jacoby, 2015.

Os dados da máquina e chapas do estator encontram-se na Figura 36.

Figura 36: Esquema das chapas do estator da máquina



Carcaça de motor para 10CV 220v
60Hz

Número de polos: 4

Diâmetro externo do disco: 210 mm

Diâmetro interno do disco: 138 mm

Número de ranhuras: 48

Diâmetro Interno : 138 mm

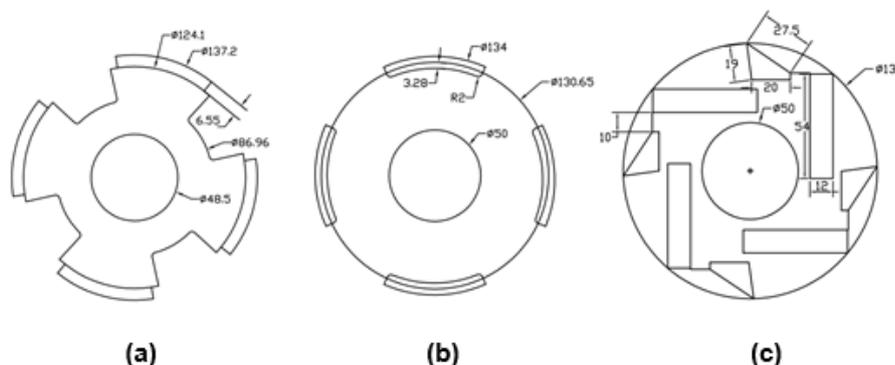
Pacote de chapas: 148 mm

Número de chapas: 320

Fonte: Jacoby, 2015.

Para as simulações, partiu-se de três rotores com quatro polos (Figura 37) foram concebidos a partir dos conceitos de máquinas elétricas síncronas com ímãs permanentes de Nd-Fe-B.

Figura 37: Topologia dos rotores estudados – (a) polos salientes com ímãs na superfície das saliências – (b) polos lisos com ímãs na superfície do rotor – (c) ímãs embutidos no interior do rotor

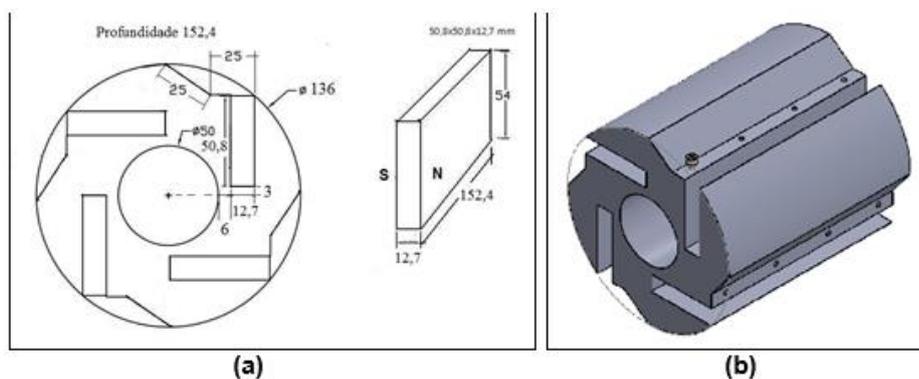


Fonte: Jacoby, 2015.

Das três topologias indicadas, aquela de mais fácil construção é a 3, uma vez que os ímãs são na forma de paralelepípedo (de fácil aquisição no mercado) enquanto as outras duas os ímãs são curvados (de difícil aquisição no mercado);

O núcleo do rotor foi projetado a partir de uma máquina síncrona trifásica desenvolvida pela Siemens com ímãs de Nd-Fe-B embutidos no núcleo do rotor conforme Boldea e Nasar (2009), a partir de materiais injetados e sinterizados, mantendo-se todas as outras partes da máquina, como carcaça, estator, eixo e tampas do motor de indução de 10 CV da Voges Motores. Desta maneira é possível transformar um Motor de Indução em uma Máquina Elétrica Síncrona Trifásica ou mais precisamente um Gerador Trifásico de Alto Rendimento. A Figura 38-a mostra o esboço do projeto do núcleo do rotor e a Figura 38-b mostra a vista em perspectiva.

Figura 38: Projeto do rotor – (a) desenho dimensional – (b) vista em perspectiva



Fonte: Jacoby, 2015.

3.6.2 Simulação da máquina

Com relação às simulações, os resultados das iterações eletromagnéticas de uma máquina elétrica rotativa podem ser obtidos através de simulações em software de elementos finitos FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*). A metodologia de elementos finitos tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas. O objetivo principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada uma com uma geometria simples (e.g. triângulo). Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo (MEEKER, 2010).

Através do FEMM 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência da máquina e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

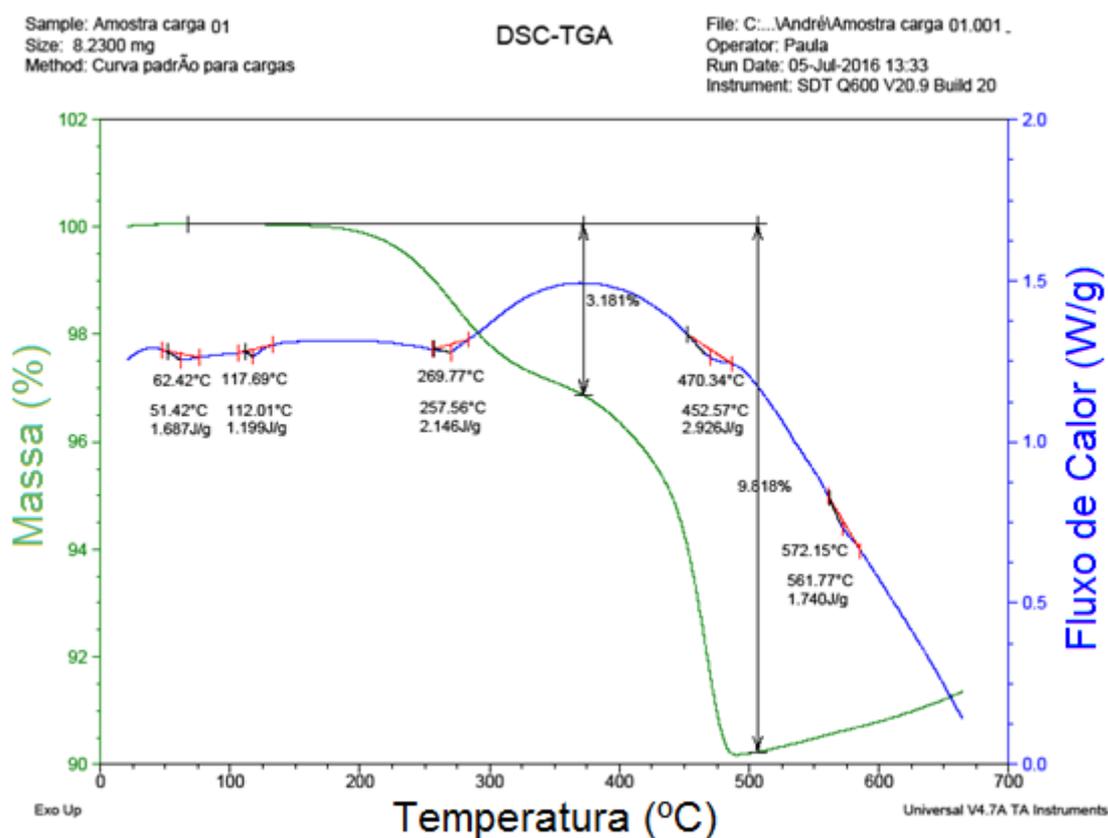
Foram realizadas simulações comparativas considerando o estator com núcleo de chapas laminadas (aço M15) conforme desenho da Figura 36, e o rotor (Figura 38) a partir de chapas de aço M15, a partir de blocos compactados e sinterizados da liga Fe-1%Si, e injetado da liga Fe-1%Si. Assim, foram inseridas no FEMM 4.2, as topologias do estator e rotor, características do bobinamento e as curvas de magnetização dos materiais utilizados. A corrente nominal foi de 14,2 A por fase e 192 condutores em Série por Fase. Assim, foi possível uma análise comparativa de torque e fluxo de entreferro considerando os núcleos do rotor a partir de chapas de aço M15, materiais sinterizado e injetado.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 ANÁLISE DA CARGA PREPARADA

A Figura 39 mostra a curva DSC / TGA da carga preparada, cuja curva foi realizada se partindo de temperatura ambiente até a 650°C.

Figura 39: Curvas DSC e TGA para a carga injetável da liga Fe-1%Si



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

É possível visualizar que ocorre um ponto de fusão a aproximadamente 65 °C, provável ponto de fusão da parafina e um segundo ponto de fusão a 117 °C, provavelmente da cera de carnaúba. Nesse caso, em aproximadamente 180 °C inicia-se a degradação da parafina, e o PE tem seu ponto máximo de degradação em 270 °C, com uma perda de massa total de 3,20 %.

Em 470 °C, ocorre a finalização da degradação do PE, tendo uma perda total de massa de 9,81 % de massa. Ainda foi observado que em 570 °C, ocorre o início de oxidação da amostra na atmosfera empregada pelo ensaio, que no caso é um fluxo gasoso de argônio. Esses dados são importantes para determinar temperaturas de processamento do material na máquina injetora e posterior remoção da fração orgânica (polímeros) na extração química e térmica.

4.2 CORPOS DE PROVA PRELIMINARES

4.2.1 Densidade e Microestrutura

A Figura 40 mostra os corpos de prova obtidos a partir da liga preliminar onde a peça a esquerda (amostra 1) foi sinterizada no forno de esteira, e a peça a direita (amostra 2) foi sinterizada no forno tipo mufla. Comparando-se os dois corpos de prova, observa-se que a peça a esquerda (forno de esteira) apresentou uma altura média de 3,1 mm enquanto que a peça a direita (forno mufla) apresentou altura média de 1,6 mm.

De fato, a peça a direita, ao ser retirada do forno, apresentava uma grossa camada de oxidação, o qual foi retirado a partir do lixamento, enquanto a peça a esquerda, apresentava uma camada de oxidação muito menor, praticamente superficial. Por este motivo optou-se pela sinterização de todas as peças posteriores no forno de esteira.

Figura 40: Segmentos gravatinha - à esquerda sinterizada em forno de esteira – à direita sinterizada em forno tipo mufla



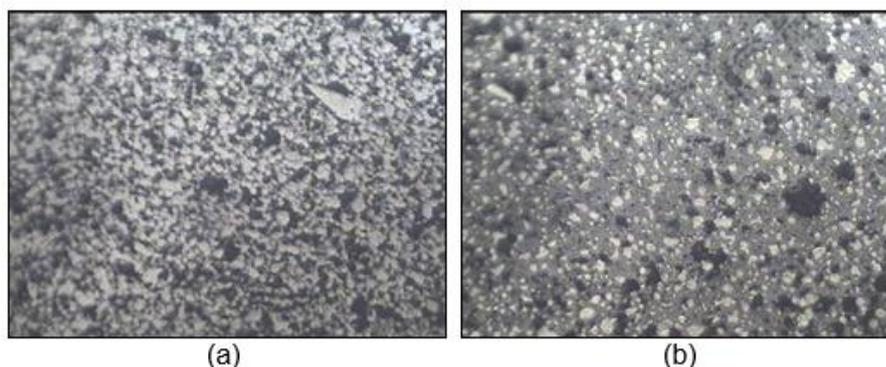
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A partir do corpo de prova (Figura 40 a esquerda) da carga preliminar foram realizadas micrografia, determinação da densidade e da dureza.

A densidade foi determinada a partir das gravatinhas (segmentos das mesmas), utilizando o método de Arquimedes, na qual o volume foi calculado a partir do deslocamento do nível de água em um copo de Becker. Amostra 1 (sinterizada no forno de esteira) apresentou uma densidade de $5,01 \text{ g/cm}^3$ enquanto a amostra 2 (sinterizada no forno tipo mufla) apresentou uma densidade de $4,78 \text{ g/cm}^3$.

Devido à baixa densidade das peças, variação de concentração de polímeros e a existência de poros, não foi possível determinar a dureza, contudo, possível determinar a microdureza. Para a amostra 1 foram retiradas duas partes da peça e realizada a verificação da micrografia das mesmas (Figura 41).

Figura 41: Microestrutura da amostra 1 – (a) áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Aumento: 400x. – (b) áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Áreas cinza: binder. Aumento: 400x



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Figura 42 mostra a micrografia da amostra 2.

Os resultados de microestrutura das amostras são observados nas Figuras 41 e 42. Pelas imagens vê-se que as áreas claras são referentes ao pó de ferro e os pontos escuros pela porosidade. De acordo com a grande quantidade de porosidade, entende-se que os valores de densidades medidos são justificados. Um fato visto na imagem da Figura 41-b é a presença de binder aplicado na injeção que não foi extraído completamente.

Figura 42: Microestrutura da amostra 2: áreas claras: Fe-1%Si. Áreas escuras: poros. Aumento: 400x



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

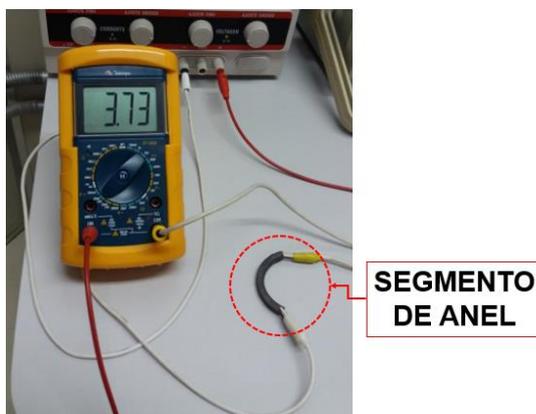
Verificou-se, contudo, que em novos testes de extração química, verificou-se que em uma segunda extração química, ainda restava resíduos de ceras, pois o hexano estava impregnado com as cores em tons de marrom o que evidenciava que, principalmente a cera de carnaúba ainda não havia sido totalmente retirada.

Verificou-se também que a mistura (carga) não estava completamente homogênea, sendo por isto preparadas novas cargas (ou a carga definitiva) no reômetro de torque, o qual produz uma carga mais homogênea. Nos testes preliminares com maior tempo de extração química e obtidas a partir do reômetro de torque, as peças já se mostraram com maior densidade e de ótima aparência.

4.2.2 Resistividade Elétrica

A determinação da resistividade elétrica foi realizada nos Laboratórios de Engenharia Eletrônica da Feevale. A Figura 43 mostra um segmento de um anel conectada a uma fonte de tensão contínua ajustável e um multiteste, onde pode-se observar a medida de corrente elétrica, para determinação da resistividade elétrica (BOYLESTAD; NASHELSKY, 2009).

Figura 43: Anel segmentado conectado a uma fonte e multímetro para determinação da resistividade elétrica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Considerando as dimensões e medidas a seguir:

- Área: $A = 0,005 \times 0,0055 \text{ m}^2$
- Comprimento: $l = 0,063 \text{ m}$
- Tensão: $V = 2 \text{ mV} = 2,0 \times 10^{-3} \text{ V}$
- Corrente: $i = 3,77 \text{ A}$

Aplicando se os dados acima na Equação 7, obtém-se o seguinte valor:

$$\rho = \frac{2 \times 10^{-3}}{3,77} \cdot \frac{0,005 \times 0,0055}{0,063} = 2,32 \times 10^{-7} = \mathbf{0,23 \mu\Omega \cdot m} \quad (8)$$

A fim de avaliar o resultado obtido de resistividade elétrica, apresentam-se as seguintes referências na Tabela 11:

Tabela 11: Valores referenciais de resistividade elétrica

Liga	Método	Valor em $\mu\Omega \cdot m$	Referência
Fe-1%Si	M/P convencional	0,200	Pauletti, 2012.
Fe-3%Si	M/P convencional	0,350	Pauletti, 2012.
Ferro puro	M/P convencional	0,157	Jacoby, 2015.
Fe-1%Si	M/P convencional	0,276	Cerva, 2014.
Fe-3%Si	MPI	0,399	Martins, 2015.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Pode-se observar que o valor de $0,23 \mu\Omega.m$ obtido no experimento para a liga Fe-1%Si injetada e sinterizada, apresentou valor de resistividade elétrica em linha com os valores referenciados para a mesma liga por Metalurgia do Pó convencional, e como esperado abaixo do valor para a liga Fe-3%Si pelo mesmo método.

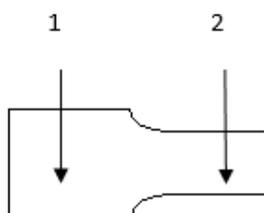
4.3 CORPOS DE PROVA DEFINITIVOS

Os corpos de prova definitivos foram obtidos a partir da carga misturada no reômetro de torque e compreenderam, inicialmente a injeção de gravatinhas na mini injetora Haake MiniJet II, contudo devido à baixa densidade destes, optou-se pela utilização da injetora Arburg 170 S, e corpos de prova na forma de anel. Para estes corpos de prova foram observadas a Densidade e Microestrutura, Microdureza, Resistividade Elétrica e Curvas Magnéticas.

4.3.1 Corpo de prova de gravatinha injetado na mini injetora

O ensaio de microdureza Vickers (300 gf), realizada em um equipamento Insize na amostra preparada por PIM em uma liga Fe-1%Si moldada como amostra para ensaio de tração. Um croqui apresentando as regiões de análise são mostradas na Figura 44.

Figura 44: Croqui da amostra apresentando as regiões de análise 1 e 2



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Já a Tabela 12 mostra os valores medidos e a média para ambas as regiões.

Tabela 12: Valores medidos de microdureza para amostra

Medida	Microdureza HV	
	Área 1	Área 2
1	63,9	72,9
2	57,5	72,7
3	56,0	51,4
4	34,1	65,4
5	56,7	66,7
6	50,6	61,4
Média	53,1	65,1

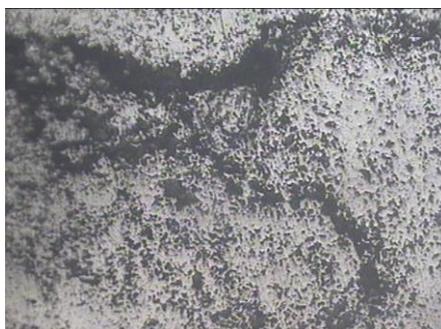
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Com relação a dureza HB, realizada na região da área 2 resultou em uma faixa de valores entre 30 a 35 HB.

O procedimento de preparação metalográfica foi o convencional, composto de corte, lixamento e polimento. Sem ataque com reativo químico. Microscópio óptico empregado foi um Union.

Para a análise metalográfica, as amostras após a preparação por polimento, foram observadas a distribuição de poros. Esta análise consistiu em verificar duas áreas do corpo de prova injetado. No caso, as mesmas áreas 1 e 2 da análise de microdureza. Na área 1, constatou-se a presença de trincas e excesso de poros resultante do processo de extração química e térmica, conforme Figura 45.

Figura 45: Microestrutura da área 1 com presença de poros e trincas resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Entretanto, na mesma região, vê-se uma melhor apresentação da combinação matriz e poros, conforme Figura 46.

Figura 46: Microestrutura da área 1 com presença menor de poros e uma distribuição mais homogênea, resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Na análise da área 2, observa-se uma situação parecida, com presença de poros em menor quantidade em relação a matriz metálica, Figura 47.

Devido a análise metalográfica e de microdureza, aliada com a constatação da baixa dureza e existência de excesso de poros, optou-se então pela utilização da Injetora Arburg, específica para injeção de pós metálicos, e que poderia conferir melhor contra-pressão ao final do processo de injeção.

Figura 47: Microestrutura da área 2 com uma menor presença de poros em uma distribuição homogênea, resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 400x.

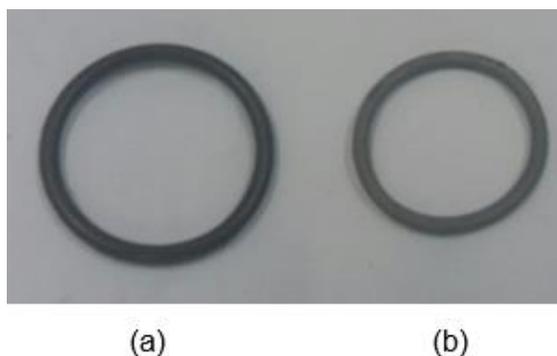


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

4.3.2 Densidade, microestrutura e microdureza

O anel da Figura 48-a foi injetado na injetora Arburg, seguido de extração química, extração térmica e sinterização (Fig. 48-b).

Figura 48: Anel – (a) injetado – (b) sinterizado



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 13 apresenta as variações dimensionais bem com as densidades do anel considerando após a injeção e após o processo de sinterização.

Tabela 13: Tabela com as dimensões e densidade obtidas com o corpo de prova anel via injetora Arburg

Designação	Diâmetro Interno [cm]	Diâmetro Externo [cm]	Perímetro Médio [cm]	Seção Transversal [cm ²]	Volume [cm ³]	Massa [g]	Densidade [g/cm ³]
Injetado	3,40	4,07	11,70	$8,81 \times 10^{-2}$	1,03	4,26	4,13
Sinterizado	2,96	3,52	10,16	$6,16 \times 10^{-2}$	0,63	3,73	6,02 (*)
Contração					38,8%		

(*) O anel da Figura 53-b já sinterizado, apresentou diferenças no diâmetro interno, externo e na área da seção transversal. Assim, os valores da Tabela 13 representam os valores médios. Assim, para a determinação da densidade, foi utilizado o método de Arquimedes, onde mede-se o volume de deslocamento de água e a massa. Nesta condição, considerando alguns segmentos do anel (após o seu corte em vários segmentos), a densidade variou de 5,7 até 6,3 g/cm³.

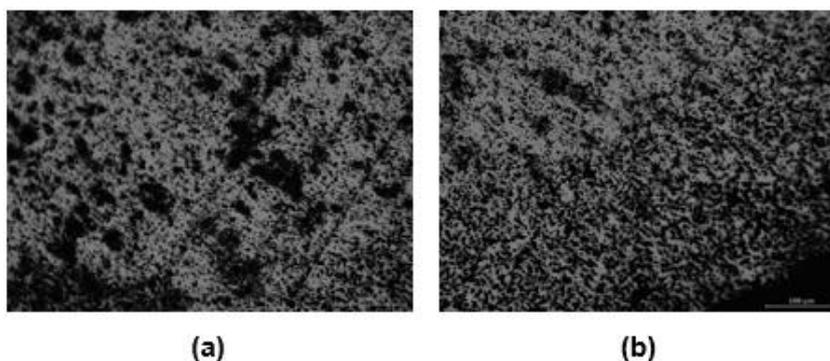
Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A densidade resultante média foi de 6,02 g/cm³, que se comparada aos valores de 6,7 g/cm³ - encontrados por Cerva (2014), Bittencourt (2012) e Da Cas (2014) através de MP e por Martins (2015) através PIM – ficou abaixo do esperado. Tal diferença, na ordem de 0,7 g/cm³, deve-se a porosidade ainda encontrada nas amostras geradas na injetora Arburg, como se pode verificar nas Figuras 48 e 49.

Para a análise metalográfica do corpo de prova da Figura 49, utilizou-se procedimento semelhante ao referido no item 4.3.1. Foram retiradas duas amostras

do corpo de prova. Na primeira amostra, analisou-se duas regiões, uma mais central (Figura 49-a) e uma mais periférica (Figura 49-b).

Figura 49 - Microestrutura da amostra 1 com presença de poros e trincas resultante do processo de fabricação, região escura. Sem ataque. Aumento 200x. (a) região central – (b) região mais próxima da extremidade

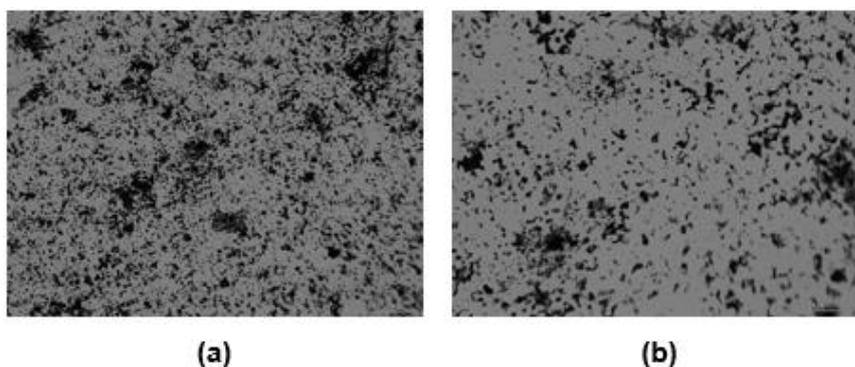


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Observa-se que comparativamente, que o corpo de prova proveniente da injetora Arburg, apresenta uma melhor consistência na formação da peça, se comparado com um corpo de prova preliminar (vide item 4.3.1. na Figura 45), bem como não apresenta trincas evidentes.

Já para a amostra 2, utilizando os mesmos parâmetros de análise metalográfica (sem ataque e aumento de 200x), corrobora-se a ideia de uma presença menor de poros e sem ocorrências de trincas.

Figura 50: Microestrutura da amostra 2 com uma menor presença de poros em uma distribuição homogênea, região escura. Sem ataque. (a) Aumento 200x – (b) Aumento 500x.

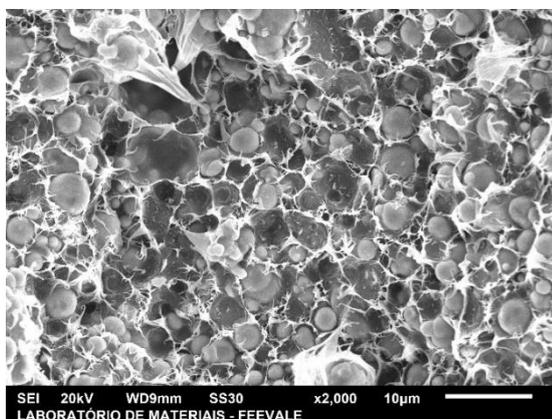


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Essa menor ocorrência de poros também evidencia o aumento de densidade conferido pela alteração da máquina injetora, basta verificar o acréscimo de densidade na ordem de $1,00 \text{ g/cm}^3$, se comparadas a densidade de um corpo de prova preliminar (item 4.2.1) com a densidade obtida para o corpo de prova definitivo via Arburg.

A Figura 51 mostra a micrografia obtida através de MEV da peça injetada e sem extração química e demais etapas subsequentes, onde se observa o aspecto claro do sistema ligante, e os pós constituintes de formato esférico.

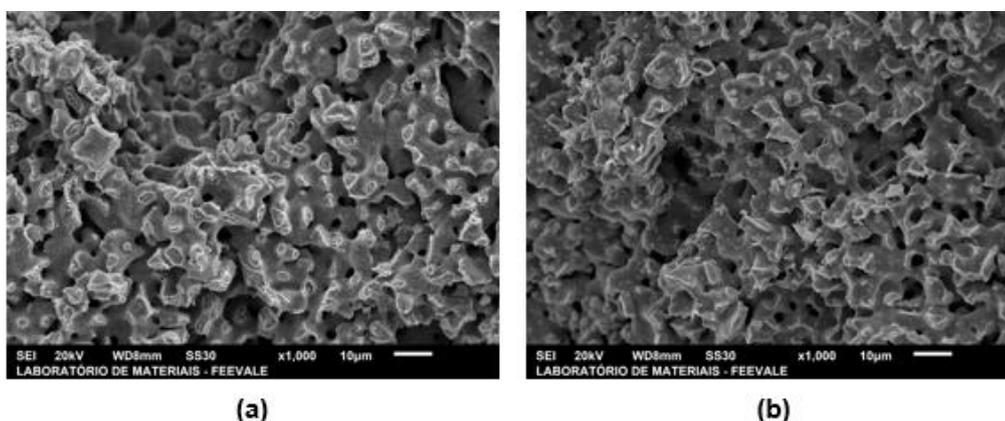
Figura 51: Micrografia do corpo de prova injetado, região clara: sistema ligante, região escura: pós constituintes. Aumento: 2000x. Escala: $10\mu\text{m}$.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Já na Figura 52 mostra a micrografia obtida através de MEV mesma após a sinterização. É possível observar a extração razoável dos ligantes, e a presença de poros com relativo padrão de distribuição, mas com pequena quantidade se comparada a presença da liga na imagem.

Figura 52: Micrografia do corpo de prova injetado, região clara: sistema ligante, região escura: pós constituintes. Aumento: 1000x. Escala: 10µm. (a) centro da amostra – (b) extremidade da amostra



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A microdureza foi medida ao longo de alguns segmentos do anel. A Tabela 14 mostra os valores encontrados na escala Vickers, e convertidos para a escala Brinell também.

Tabela 14: Medidas de microdureza para o anel

Medida	HV	HB
1	110,71	105,23
2	187,28	178,13
3	216,38	205,38
4	255,82	243,38
5	153,21	145,69
6	169,46	161,16
7	171,86	163,45
Média	180,67	171,77

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

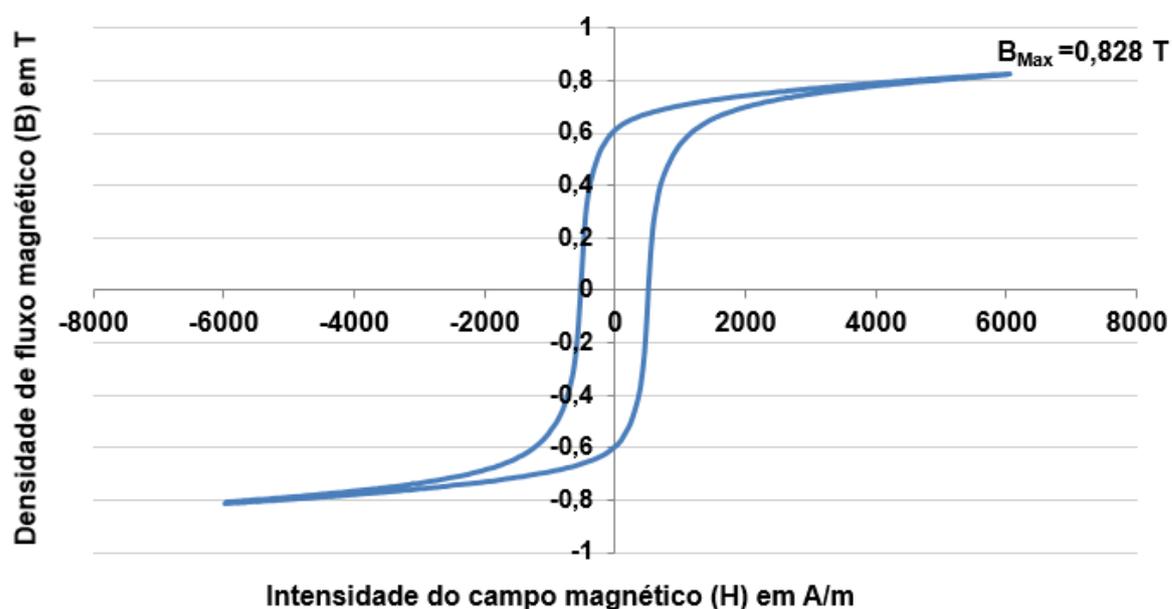
Isto indica que o anel não ficou completamente homogêneo, além da não extração completa dos polímeros e presença de porosidade variável ao longo do perímetro do anel. Entretanto, se comparado ao valor médio obtido por Martins (2015) de 95 HB, as amostras apresentaram um aumento de dureza mesmo com percentual menor de silício. Para a mesma liga, Fe-1%Si, por processos convencionais de MP,

os valores ficaram bem superiores aos obtidos por Bittencourt (2012) na ordem de 64,50 HB.

4.3.3 Curvas magnéticas

A Figura 53 mostra a curva de histerese para o corpo de prova de anel para a liga Fe-1%Si.

Figura 53: Curva magnética de histerese para liga Fe-1%Si

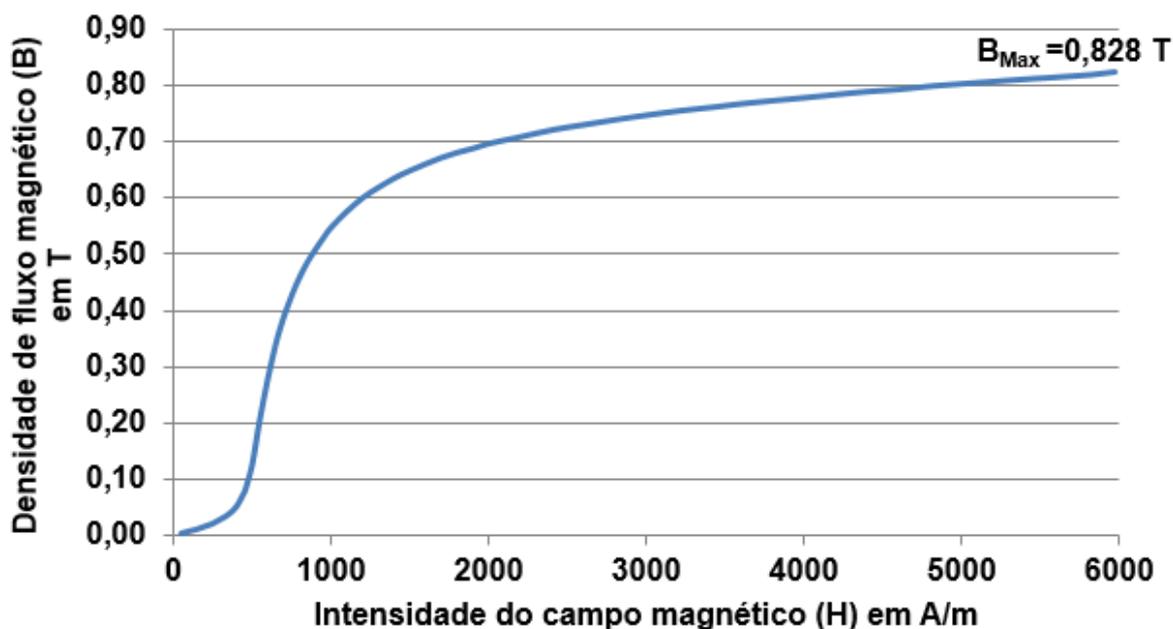


Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Na Figura 53 apresenta-se o ensaio de Histerese determinou uma curva característica de material magnético macio semelhante à figura 8, com uma coercitividade magnética (H_c) de 570 A/m, retentividade (B_r) de 0,6 T e uma intensidade de campo máximo de aproximadamente 6000 A/m.

Já a Figura 54 mostra a curva de magnetização para o mesmo corpo de prova.

Figura 54: Curva de magnetização para liga Fe-1%Si



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Já na Figura 54 que apresenta a curva de Magnetização para a liga Fe-1%Si revelou-se uma Indução de Saturação de 0,828 T para um campo de 6.000 A/m bem como uma Permeabilidade Magnética Relativa Máxima = 600.

Considerando o valor de 1,03 T obtido por Cerva (2014) e Bittencourt (2012) para a mesma liga através de Metalurgia do Pó, obteve-se um valor menor de indução de saturação, o que presume que a liga injetada atinge a saturação dos domínios magnéticos com um campo de indução menor.

Analogamente, a permeabilidade relativa máxima ficou bem abaixo, para as mesmas referencias citadas anteriormente, haja vista que as mesmas tratam de valores na casa de 1852. Entretanto, o valor de permeabilidade obtido ficou acima do obtido por Martins (2015), que foi de 223, para uma liga com maior percentual de silício através de MPI.

Em termos de retentividade, o valor obtido de 0,6T se encontra próximo dos valores referenciais de 0,71 – obtidos por Cerva (2014) e Bittencourt (2012) – mas com uma coercitividade superior aos obtidos por estes, que referencialmente fica na ordem 246 A/m.

4.3.4 Resistividade Elétrica

Com relação a resistividade esta foi obtida a partir dos segmentos do anel (Fig. 43) com a determinação de suas dimensões, aplicando tensão e medindo-se uma corrente.

Considerando as dimensões e medidas a seguir:

- Área: $A = 6,16 \times 10^{-6} \text{ m}^2$
- Comprimento: $l = 0,0451 \text{ m}$
- Tensão: $V = 9,5 \text{ mV} = 9,5 \times 10^{-3} \text{ V}$
- Corrente: $I = 5 \text{ A}$

Tem-se então conforme a Equação 7, o seguinte valor:

$$\rho = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} = \frac{9,5 \times 10^{-3}}{5} \cdot \frac{6,16 \times 10^{-6}}{4,51 \times 10^{-2}} = 2,6 \times 10^{-7} = 0,26 \mu\Omega\text{m} \quad (9)$$

Considerando o valor obtido na Equação 9, verifica-se que a resistividade encontrada nos corpos de prova definitivos foi superior à encontrada nos corpos de prova preliminares (item 4.2.2.). Este incremento na resistividade pode se dar a microestrutura um pouco mais homogênea obtida.

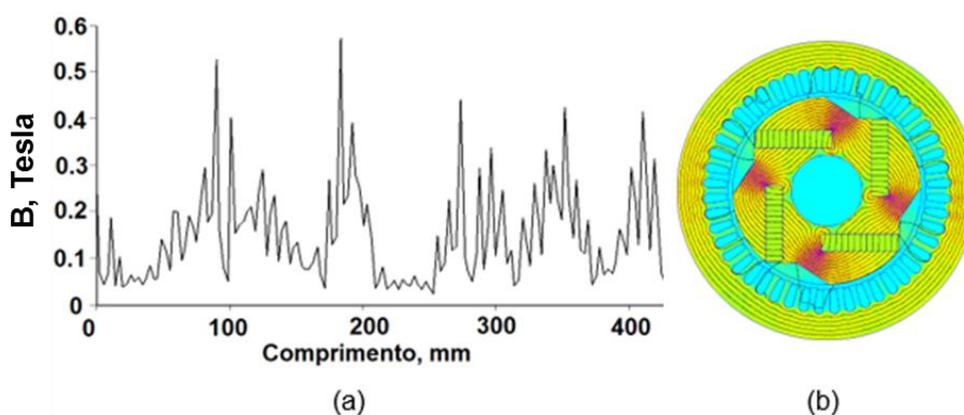
Não obstante, os valores são próximos aos obtidos por Cerva (2014) e Bittencourt (2012) para a liga Fe-1%Si, mas superior ao obtido por Pauletti (2012), conforme a Tabela 11. Sendo assim, não se pode afirmar que a diferença real em termos de resistividade entre uma peça compactada de uma peça injetada.

Entretanto ao se comparar com o valor obtido por Martins (2015), obteve-se um valor inferior, mas Martins trabalhou com uma liga com teor de silício maior (3%), pode-se inferir que essa resistividade pode ser devido ao fato de o maior teor de silício não se densificou homogêneamente na matriz de ferro, gerando descontinuidades.

4.4 SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações com estator de chapas M15 e núcleo do rotor com chapas M15, liga Fe-1%Si injetada e sinterizada. A Figura 55-a mostra a amplitude, em módulo, da indução de entreferro, e Fig. 55-b as linhas de fluxo magnético geradas no plano longitudinal da máquina com rotor de chapas de aço M15.

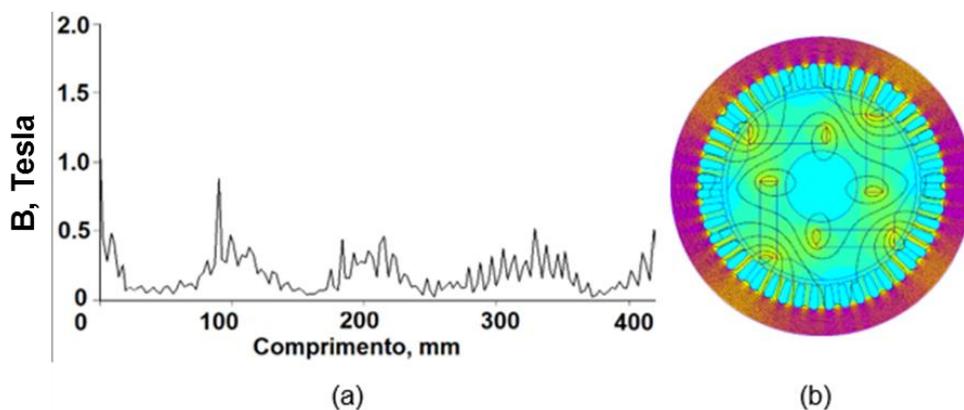
Figura 55: Simulação da máquina com rotor a partir de chapas aço M15 – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As Figuras 56-a e 56-b mostram os mesmos gráficos para o rotor com a liga Fe-1%Si injetada.

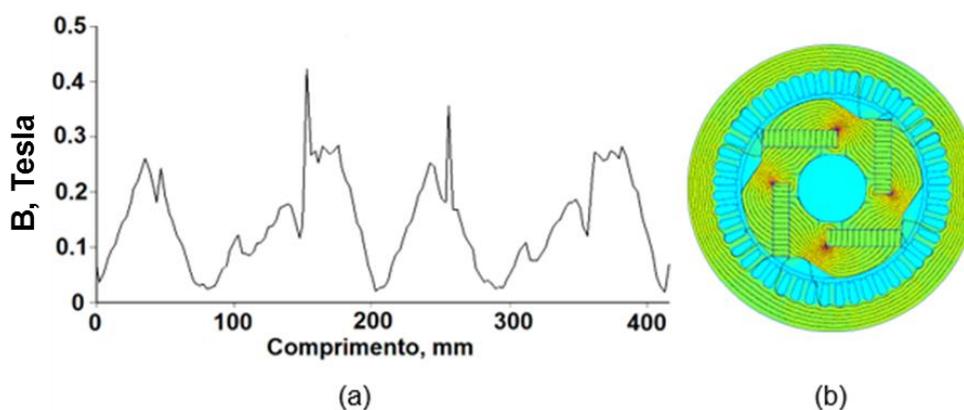
Figura 56: Simulação da máquina com rotor a partir da liga Fe-1%Si injetada – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

As Figuras 57-a e 57-b mostram os mesmos gráficos para o rotor com a liga Fe-1%Si sinterizada.

Figura 57: Simulação da máquina com rotor a partir da liga Fe-1%Si sinterizada – (a) densidade de fluxo de entreferro – (b) linhas de fluxo no plano longitudinal da máquina



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

A Tabela 15 mostra os valores de torque (em N.m) e a densidade de fluxo (em T) para cada um dos casos estudados.

Tabela 15: Simulação de torque e densidade de fluxo de entreferro para núcleo de rotor da liga Fe-1%Si injetada, e sinterizada e de chapas de aço M15

Material do Rotor	Torque em N.m	Densidade de Fluxo em T
Chapas de aço M15	0,594	0,72
Fe-1%Si injetado	0,305	0,52
Fe-1%Si sinterizado	0,351	1,03

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Nas simulações realizadas e apresentado na Tabela 15, o torque resultou para liga de Fe-1%Si por injeção em 0,305 N.m, ficando próximo para a mesma liga via Metalurgia do pó que foi de 0,351 N.m, o que reforça a semelhante entre ambos os materiais, embora a densidade de fluxo resultante tenha sido 0,52 T contra 1,03 T da liga compactada-sinterizada, devido a menor indução de saturação da liga injetada (0,828 T conforme item 4.3.3).

Embora se comparado o torque com o torque da máquina construída com chapas de aço, observa-se que a liga Fe-1%Si em ambos os casos apresenta valores

menores. Tal aspecto se deve ao fato de a máquina originalmente tenha sido projetada para uso de chapas para a topografia típica. Frisa-se que, no caso dos materiais a partir de pós, os blocos são maciços, o que de certa maneira, desvirtuaria o funcionamento da máquina elétrica.

Salienta-se que trabalhos onde foram desenvolvidas máquinas como Jacoby (2015) e Pauletti (2012) ou materiais a partir de pós como Barbosa (2009) e Martins (2015) citam que para uma melhor eficiência das novas máquinas desenvolvidas, novas geometrias devem ser consideradas, com alterações dimensionais e funcionais, como por exemplo, enrolamentos, corrente elétrica e forma das ranhuras. Desta maneira, pode se ter um melhor aproveitamento destes materiais sendo compactados ou injetados devido à sua anisotropia.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foi analisada a liga de Ferro com adição de 1% de Si, através do processo de Moldagem de Pós por Injeção, e comparada principalmente com mesma liga obtida pelo processo de Metalurgia do Pó convencional, através de propriedades mecânicas, elétricas e magnéticas. Então de posse destas propriedades, simulou-se a aplicação da liga em uma máquina elétrica e comparou-se os resultados obtidos com máquinas semelhantes, mas com materiais diferentes.

As propriedades mecânicas obtidas - como dureza, microdureza e densidade - estão em linha com valores obtidos na literatura, mesmo estas propriedades sejam consideradas importantes em um segundo plano no desempenho de máquinas elétricas.

Já propriedade elétrica, resistividade, obtida foi próxima aos valores considerados para a mesma liga, mas através de MP, isso mostra que para esta liga, o processo de injeção tende a homogeneizar o Silício na matriz de Ferro, de maneira ao mesmo se converter em descontinuidades que remetem a resistividade.

Em termos de propriedades magnéticas, os valores obtidos foram um pouco abaixo se comparados com a mesma liga por metalurgia do pó, mas em concordância com os descritos

Já as simulações mostraram um torque para a liga Fe-1%Si injetado próximo ao injetado e menor que do aço M15. Entretanto, valor distante em termos de densidade de fluxo máximo, se dá a menor indução de saturação obtida. Entretanto as diferenças também se dão ao fato de máquina originalmente ter sido projetada para utilização do aço e não da liga Fe-1%Si.

Mesmo com esse interim, a liga estudada apresentou características próximas as citadas, logo sua aplicação se enquadra nos requisitos para aplicação em núcleos de máquinas elétricas rotativas.

Após diversos contatos com a equipe do LdTM (UFRGS), cuja experiência nesta área de pesquisa é notória, constatou-se que a repetitividade na obtenção de corpos de prova com qualidade fica afetada pela extração térmica. As amostras obtidas neste trabalho foram tratadas termicamente no laboratório supracitado em forno de vácuo com dimensões de mufla reduzidas, o que pode acarretar na

dificuldade em retirar os polímeros do sistema ligante das peças, juntamente com avarias no próprio equipamento. Esta é a razão pelo qual obtêm-se ao mesmo tempo peças perfeitas e outras imperfeitas, que não se consolidam na extração térmica nem após na sinterização. Estudos em paralelo foram realizados com atmosfera de gás verde e de gás marrom para avaliar o efeito deste parâmetro sobre as peças, entretanto os mesmos consumiram muito insumo (gás), deixando-os inviáveis. Salienta-se que um forno mais adequado conseguiria repetitividade às peças de acordo com o referido pela literatura.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Utilizar um forno mais adequado para extração térmica;
- Estudo de Moldagem por Injeção de Pós para obtenção de ligas de material magnético macio como o Fe-1%P;
- Utilização de pó pré-ligado de Fe-1%P para a mesma metodologia;
- Desenvolvimento de estudo considerando um percentual de 2% para a liga Fe-Si, a fim de verificar a influência do percentual de silício nas propriedades físicas;
- Avaliar o efeito da contrapressão aplicada por injetoras nas propriedades físicas de materiais magnéticos macios por Moldagem por Injeção de pós.

REFERENCIAS

- AQUINO, Junior. **Teoria eletrônica da magnetização.** In: **Notas de aula de Eletromagnetismo I - Engenharia Elétrica.** 1a ed. Bauru: UNESP, 2016. p. 113–126.
- ASTM_A773/A773M. American Standard Test Method for DC Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with DC Electronic Hysteresigraphs. 2001.
- ASTM_E18. Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials, 2015.
- ASTM_E140. Standard Hardness Conversion Tables for Metals Relationship Among Brinell Hardness, Vickers Hardness, Rockwell Hardness, Superficial Hardness, Knoop Hardness, and Scleroscope Hardness, 2012.
- BARBOZA, Juliano Soares. **CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS DESENVOLVIDAS ATRAVÉS DA METALURGIA DO PÓ APLICADOS A NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.** 2009. p. 101. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- BAS, J. A et al. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 254–255, p. 391–398, 2003.
- BEISS, P et al. **Powder Metallurgy Data.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, v.2, group VIII: Advanced materials and Technologies.2003.
- BOLDEA, Ion; NASAR, Syed. **The Induction machines design handbook.** 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- BONALDI, Patrick; SCHAEFFER, Lirio. Processo de moldagem de pós metálicos por injeção – uma revisão. **Revista Engenharia**, v. 589, p. 164–167, 2008.
- BOSE, Animesh. **Advances in Particulate Materials.** 1. ed. Newton: Butterworth-Heinemann, 1995.
- BOYLESTAD, Robert; NASHELSKY, Louis. **Eletronic Devices and Circuit Theory.** New Jersey: Prentice Hall, 2009. p.934.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Materials Science and Engineering: An Introduction**. 8a ed. USA: Joh Wiley & Sons, 2009.

CERVA, Luciano Lohmann. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA COM ÍMÃS PERMANENTES E NÚCLEO SINTERIZADO UTILIZADA EM AEROGERADOR**. 2014. p.101. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó**. 3 a ed. São Paulo, 1992.358p.

DA CAS, Roberto et al. Desenvolvimento de um motor universal para furadeira com núcleos do rotor e estator a partir da liga sinterizada Fe-1%P. **11º Encontro de Metalurgia do Pó**, n. 51, p. 30, 2014.

DIAS, Moisés de Mattos. **CONSTRUÇÃO DE UMA MÁQUINA SÍNCRONA DE RELUTÂNCIA TRIFÁSICA COM ROTOR DE MATERIAL MAGNÉTICO MACIO SINTERIZADO**. 1999. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

DIAS, Moisés de Mattos et al. Motor de relutância trifásico com núcleo do rotor sinterizado. **1a Conferência Internacional de Metalurgia do Pó**, v. 1, n. 1, p. 12, 2010.

DIRSCHNABEL, Mayara Schwarz; ARAÚJO, Rogério Gomes. Estudo De Propriedades Térmicas E Elétricas De Nanocompósitos Pvc/Nanotubos De Carbono Obtidos Pelo Processo De Compactação a Quente. **Revista de Extensão e Iniciação Científica UNISOCIESC-REIS**, v. 1, n. 2, p. 1–10, 2014.

ENNETI, Ravi et al. Review: Thermal Debinding Process in Particulate Materials Processing. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 27, n. 2, p. 103–118, 2012.

FITZGERALD, A. E et al. **Máquinas Elétricas**. 6a ed. Bookman, 2006. p.505.

GERMAN, Randall. **Powder metallurgy science**. New Jersey: Metal Powder Industries Federation, 1984.

HAMLER, A. et al. The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 304, n. 2, p. 816–819, 2006.

HEANEY, Donald. F. **Handbook of Metal Injection Molding**. 1ªed, Cambridge. Woodhead Publishing, 2012.

JACOBY, G. G. **DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA ELÉTRICA ROTATIVA TRIFÁSICA POR METALURGIA DO PÓ A SER UTILIZADA EM GERADOR EÓLICO DE 5 KW**. 2016. Dissertação de mestrado. Curso de Mestrado Profissional em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Feevale, Novo Hamburgo, 2016.

JILES, David. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. 1a ed. Londres. Chapman and Hall, 1991. v. 1

KATE, Kunal et al. Predicting Powder-Polymer Mixture Properties for PIM Design. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 39, n. 3, p. 197–214, 2014.

KIM, Donghan. et al. Gas-assisted powder injection molding: A study about residual wall thickness. **Powder Technology**, v. 239, n. March 2016, p. 389–402, 2013.

KOSOW, Irving Lionel. **Maquinas elétricas e Transformadores**. In: Volume 1. 4a ed ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1991. p. 689.

LEE, S. .; JEUNG, W. . Anisotropic injection molding of strontium ferrite powder using a PP/PEG binder system. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 226–230, p. 1400–1402, 2001.

LIBERATI, João Franklin. **COMPACTAÇÃO ISOSTÁTICA A QUENTE DO PÓ DE AÇO RÁPIDO AISI M2**. 2001. Dissertação de mestrado. Curso de mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

MA, Jidong. et al. Microstructure and magnetic properties of Fe-50%Ni alloy fabricated by powder injection molding. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 329, p. 24–29, 2013.

MARTINS, V. **UTILIZAÇÃO DO PROCESSO DE MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS NANOMÉTRICOS (MIM) PARA O DESENVOLVIMENTO DE ROTOR E ESTATOR EM SERVOMOTOR APLICADO À ÁREA MÉDICA**. 2015. Tese de Doutorado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas,

Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2-15.

MEEKER, David. **Finite element method magnetics, User's manual**. 4ªed, 2015. 161p.

MITROVIĆ, Nebojsa et al. Soft magnetic properties of MnZn ferrites prepared by powder injection moulding. **Science of Sintering**, v. 44, n. 3, p. 355–364, 2012.

MORO, Norberto; AURAS, André Paegle. **Processos de fabricação: Metalurgia do pó e o futuro da indústria**. 1ª ed. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

NARASIMHAN, K et al. Soft Magnetic Material for A.C. Applications. Hoeganaes Corporation, n. 1, p. 6, 1992.

NYBERG, Eric et al. Microstructure and mechanical properties of titanium components fabricated by a new powder injection molding technique. **Materials Science and Engineering**, v. 25, n. 3, p. 336–342, 2005.

PAULETTI, Philippe. **CONSTRUÇÃO E ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO COM NÚCLEO PRODUZIDO VIA METALURGIA DO PÓ**. 2012. 79p. Dissertação de mestrado. Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

REITZ, John et al. **Fundamentos da Teoria Eletromagnética**. 3a ed. Rio de Janeiro: Editora Campus, 1982. 512p.

SANTOS, Hamilta de Oliveira. **ESTUDO DE ORIENTAÇÕES CRISTALOGRÁFICAS DE AÇOS AO SILÍCIO UTILIZANDO TÉCNICAS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X, DIFRAÇÃO DE ELÉTRONS E MÉTODO ETCH PT**. 1999. 111p. Dissertação de mestrado. Curso de mestrado em Ciências na área de Reatores Nucleares de Potência e Tecnologia do combustível Nuclear, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1999.

SHOKROLLAHI, H. The magnetic and structural properties of the most important alloys of iron produced by mechanical alloying. **Materials and Design**, v. 30, n. 9, p. 3374–3387, 2009.

SILVA, Aline. et al. Study of soft magnetic iron cobalt based alloys processed by powder injection molding. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 320, n. 14, 2008.

SILVA, Aline. **LIGAS MAGNÉTICAS À BASE DE FeCo PROCESSADAS VIA MOLDAGEM DE PÓS POR INJEÇÃO**. 2008. 114p. Dissertação de Mestrado. Curso do programa de pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

TORO, Vincent del. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 1994. 550p.

WEG. **Guia Prático de Treinamento Técnico Comercial - Motor Elétrico**. 14. ed. Jaraguá do Sul: WEG, 2015. 16p.

WEG **MÁQUINAS. Motores Síncronos: Aplicações, Funcionamento e Características Construtivas**. Jaraguá do Sul: WEG, 2015. 17p.

WESTCOT, Ethan. J. et al. Monitoring of the Dimensional Changes and Mechanisms During Solvent Debinding. **Center for Innovative Sintered Products**, p. 2–10, 2002.

APÊNDICE 1 - OBTENÇÃO DE CORPOS DE PROVA INJETADOS – LIGA FE-1%P

INTRODUÇÃO

Para a avaliação das propriedades físicas de interesse, foram injetados corpos de prova na forma de barra para avaliação dos parâmetros de processo - tais como patamares de injeção, extração química e térmica e sinterização- anel para avaliação das propriedades magnéticas e elétricas e *gravatinha* para propriedades mecânicas.

GEOMETRIA DOS CORPOS DE PROVA

A geometria dos corpos de prova para a Liga Fe-1%P seguiu o mesmo modelo referido no corpo da dissertação, conforme o item 3.3.2. Geometria dos corpos de prova.

Considera-se que a Figura 15-a representa o corpo de prova na forma de barra, a Figura 16-a representa o corpo de prova na forma de anel (com seção transversal retangular), e por sua vez, a Figura 17-a representa o corpo de prova de *gravatinha*.

PREPARAÇÃO DA CARGA INJETÁVEL (*FEEDSTOCK*)

A carga para injeção da liga Fe-1%P foi baseada nas mesmas referências bibliográficas nas quais verificou-se a injeção de cargas metálicas a partir de ferro puro e Fe-3%Si, com êxito (GERMAN, 1984; HEANEY, 2012; MARTINS, 2015).

A carga foi designada conforme a Tabela 7 (inclusa no item 3.3.3 Preparação da carga injetável), com 60 % em volume de pó metálico, e 40 % de sistema ligante, idêntico este ao utilizado nas cargas para liga Fe-1%Si.

Para este trabalho projetou-se uma carga com massa de 2,2 kg, que representou 1941 gramas de pó metálico da liga (1820g do pó de ferro puro e 121 g da liga Fe₃P, cujo percentual de Fósforo é em torno de 16%). Enquanto que o sistema ligante representou uma massa de 256,3g da mistura, sendo: 128,1 g de PEAD; 64 g de parafina; 61,4 g de cera de carnaúba; e 2,5 g de ácido esteárico.

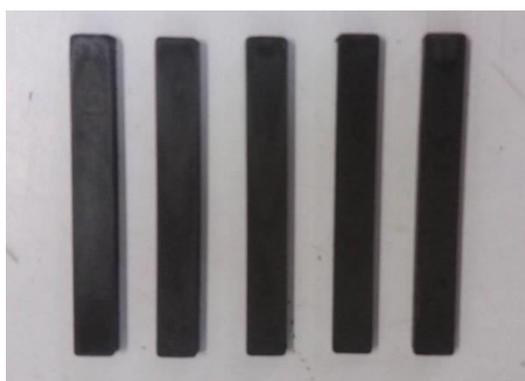
Para a mistura da carga utilizou-se o mesmo misturador assim como os mesmos parâmetros de processo, conforme descrito no item 3.3.3.

INJEÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

As peças, na forma de barra e de gravatinha, foram injetadas na injetora *Haake MiniJet II* da marca *Thermo Scientific* (Figura 20-a e 20-b) com os parâmetros como mostrados na Tabela 8.

A Figura 58 abaixo mostra os corpos de prova injetados na forma de barras para a liga Fe-1%P, onde os corpos tiveram as características mostrada na Tabela 16 à Figura:

Figura 58: Corpos de prova injetados da liga Fe-1%P na forma de barras



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Tabela 16 : Valores médios para as características das barras injetadas de Fe-1%P

Grandeza:	Valor médio:
Altura	4,20 mm
Largura	9,84 mm
Comprimento	77,65 mm
Massa	13,49 g

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Os corpos de prova na forma de anel foram injetados na injetora *Apta 80* marca *Himaco* (Figura 23-a), bem como se pode visualizar na Figura 23-b, a matriz utilizada

montada na mesma. Os parâmetros de injeção foram conforme mostrados na Tabela 10, constante no item 3.3.4. da dissertação.

A Figura 59 mostra os corpos de prova injetados na forma de anel da liga Fe-1%P, onde os corpos tiveram as dimensões médias conforme Tabela 17:

Tabela 17: Valores médios para as características dos anéis injetados de Fe-1%P

Grandeza:	Valor médio:
Diâmetro externo	60 mm
Diâmetro interno	53 mm
Espessura	5 mm
Massa	23,63 g

Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Figura 59: Corpos de prova injetados da liga Fe-1%P na forma de anel



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

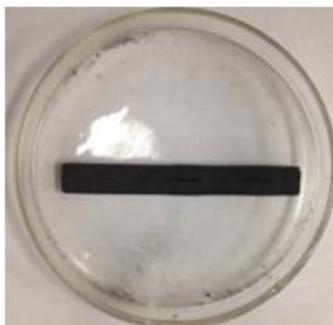
EXTRAÇÃO QUÍMICA

A extração química foi realizada em sistema semelhante a banho-Maria com solvente 'hexano' por 6 horas na faixa de temperatura de 60°C a 80°C.

EXTRAÇÃO TÉRMICA

A extração térmica foi realizada em um forno tipo 'mufla' com atmosfera à vácuo com uma taxa de aquecimento 0,2°C/min até a temperatura de 600°C, após foi mantida esta temperatura por uma hora, e por fim, desligou-se o aquecimento, conforme Martins (2015). A Figura 25-a mostra o forno utilizado, já Figura 60 mostra a barra após a extração térmica.

Figura 60: Barra da liga Fe-1%P obtida após extração térmica



Fonte: Elaborado pelo autor, 2017.

Contudo, conforme pode-se observar da Figura 67, a mesma possuía trincas, sendo esta a única barra que apresentou certa consistência para manuseio. Com base nisso, reduziu-se a taxa de aquecimento para $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, entretanto as peças resultantes ficaram demasiado frágeis para realizar o processo de sinterização. Realizaram-se também a extração térmica dos corpos de prova na forma de anel, e os mesmos também ficaram demasiados frágeis.

SINTERIZAÇÃO

Devido a fragilidade apresentada pelas amostras na etapa de extração térmica, não foi possível realizar a sinterização dos corpos de prova da liga Fe-1%P, contudo as mesmas deveriam ter sido realizadas nas seguintes condições: Forno tipo mufla com atmosfera controlada à base de gás marrom (25% de Hidrogênio e 75% de Nitrogênio) ou gás verde (5% de Hidrogênio e 95% de Nitrogênio) com taxa de aquecimento de 5°C a 10°C por minuto, até a temperatura de 1150°C , ficando neste patamar por aproximadamente 60 minutos. A Figura 26 mostra o forno utilizado para sinterização dos corpos de prova (GERMAN, 1984; MARTINS, 2015).

RESULTADOS PARA CORPOS DE PROVA DA LIGA FE-1%P

A carga para a liga Fe-1%P, as amostras obtidas apresentaram bom aspecto aparentemente e não apresentaram problemas na injeção, tanto na injetora Haake MiniJet II (das barras) como na Himaco. A extração térmica da mesma também

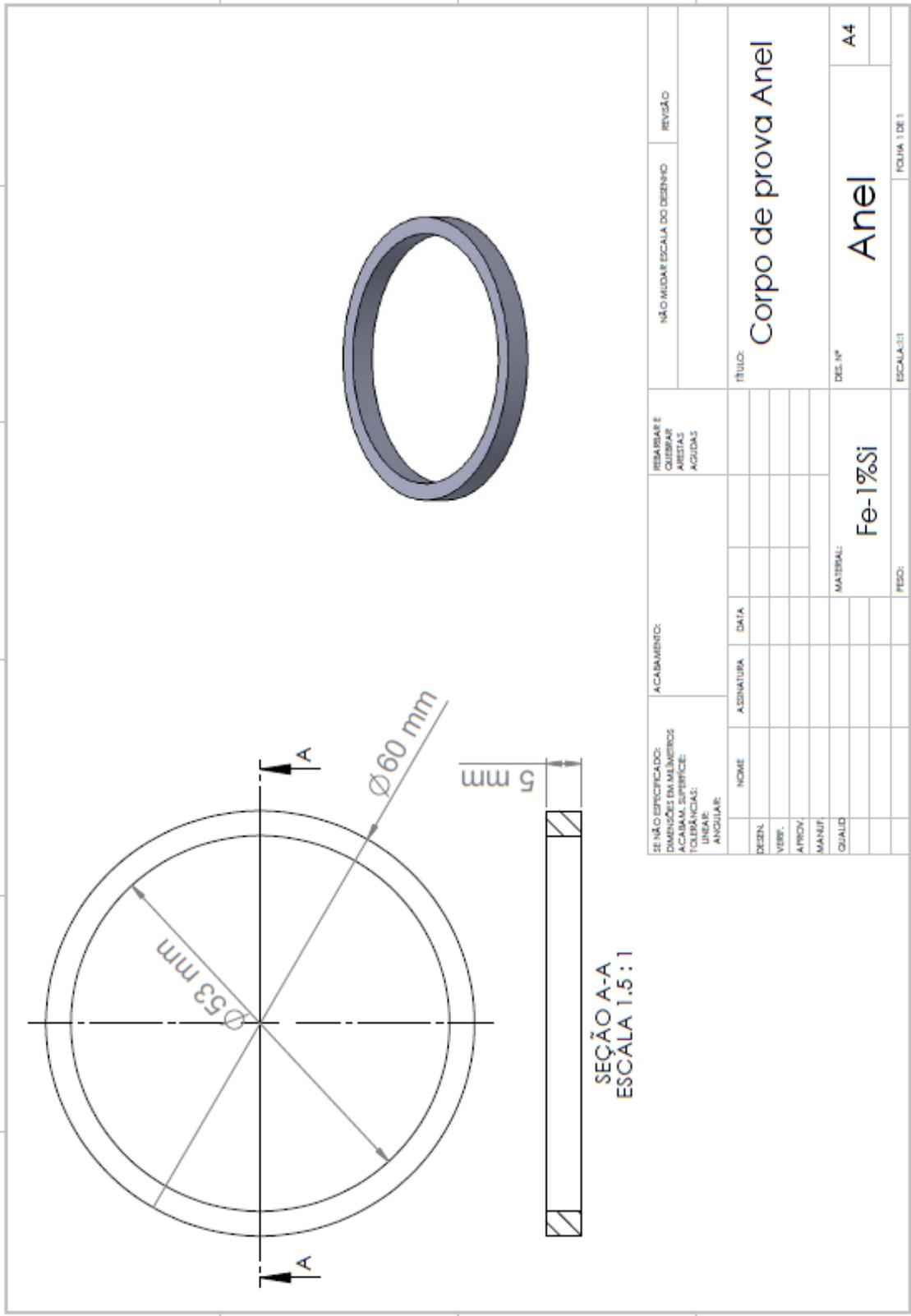
resultou em peças com ótima aparência. Contudo, somente uma barra resultou em uma peça com certa consistência (Figura 63), contudo com trincas, conforme pode-se observar.

As outras peças, tanto na forma de barra, quanto na forma de anel, após a extração térmica, não adquiriam consistência tornando-se muito frágeis, não sendo possível seu manuseio para a sinterização.

A partir de alguns estudos foi possível levantar algumas hipóteses sobre tal liga para injeção.

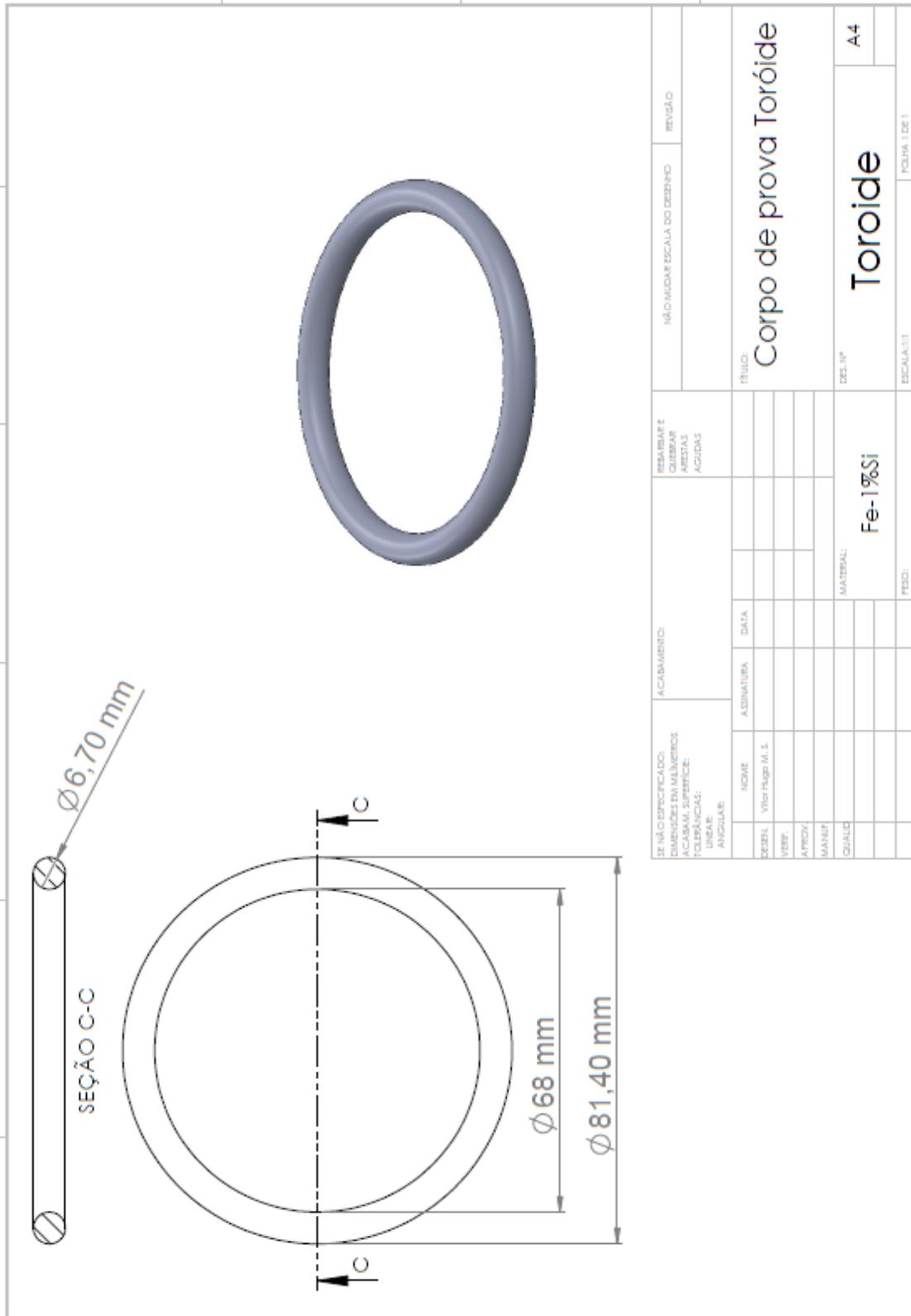
- A liga metálica utilizada possuía tamanho de partículas grande o que torna muito difícil a injeção, contudo, alguns estudos do LdTM/UFRGS constataram que foi possível injetar com boas propriedades ligas metálicas com tamanho de partículas maiores, contudo, foram testes preliminares, e com cargas e patamares diferentes daqueles estudos para a liga Fe-1%P;
- Praticamente não existem referências bibliográficas de ligas Fe-P injetadas, o que indica a extrema dificuldade para obtenção das mesmas, restringindo-se ao Ferro puro, e ligas Fe-Si, Fe-Ni e Fe-Co;
- No caso da liga utilizada, houve uma mistura de Fe₃P (ferro com 16% de P) com ferro puro para formação da liga Fe-1%P. Nesta condição, não existe uma difusão do fósforo na liga, como ocorre na M\P convencional, o fósforo atinge fase líquida e migra para a superfície das partículas de pó de Ferro, fragilizando as partículas, impedindo que exista atrito suficiente entre as partículas para manter a consistência das peças;
- Cita-se também a dificuldade em se obter pré-ligados de Fe-P com baixo percentual de fósforo (1% por exemplo). Uma alternativa seria realizar a mistura de Ferro com Fe₃P para formação de Fe-1%P e posterior moagem em moinho atritor para obtenção da liga e redução de tamanho de partícula, contudo tal ação geraria partículas de forma dendrítica e irregular o qual também não é adequado a injeção.

APÊNDICE 3 – DESENHO DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA ANEL



DE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABADA SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:		REBARBAR E QUEBRAR ARISTAS AGUDAS		MÉDIA ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA			TÍTULO: Corpo de prova Anel			
VERIF.						DES. Nº		A4	
APROV.						MATERIAL: Fe-1%Si			
MANUT.						ESCALA: 1:1		FOLHA 1 DE 1	
QUALID.						PEÇO:			

APÊNDICE 4 – DESENHO DIMENSIONAL DO CORPO DE PROVA ANEL TOROIDAL



DE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS		ACABAMENTO:		PREPARAR E QUILIBRAR		NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO		REVISÃO	
ACABARAL SUPERFÍCIE:				ARESTAS					
TOLERÂNCIAS:				AGUDAS					
UNIDADE:									
ANGULAR:									
DESENH.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO:		ESCALA:		FOLHA:	
VERIF.	Vitor Hugo M. S.			Corpo de prova Toróide		1:1		1 DE 1	
APROV.				MATERIAL:		DEL. Nº		A4	
MADEP.				Fe-1%Si		Toróide			
QUALID.				FEÇO:					