



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais(PPGE3M)**  
**Laboratório de Transformações Mecânicas (LdTM)**

***DESENVOLVIMENTO DE UM MINI MOTOR DE PASSO À PARTIR DA  
MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS***

**Maiquel Emersom Pfingstag**

**MSC. Eng. Metalúrgico**

**Porto Alegre**

**2014**



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL**  
**Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)**  
**Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais(PPGE3M)**  
**Laboratório de Transformações Mecânicas (LdTM)**

***DESENVOLVIMENTO DE UM MINI MOTOR DE PASSO À PARTIR DA***  
***MOLDAGEM POR INJEÇÃO DE PÓS METÁLICOS***

**MSc. Maiquel Emersom Pfingstag**  
**Engenheiro Metalúrgico**

**Trabalho realizado no LdTM - Centro de Tecnologia - Ufrgs, dentro do**  
**Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de**  
**Materiais - PPG3M , para obtenção do título de Doutor em Engenharia.**

Banca:

Prof. Dr. Moisés de Matos Dias (Feevale)

Prof. Dr. Vicente Mariano Canalli (PUC-RS)

Prof. Dr. José Carlos Krause de Verney (ULBRA)

**Orientador: Prof. Dr. Ing- Lírio Schaeffer**

**Área de concentração: Processos de Fabricação**

**Porto Alegre**

**2014**

**Coordenador do PPGEM: Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker**

### CIP - Catalogação na Publicação

Pfingstag, Maiquel Emerson

Desenvolvimento de um mini motor de passo à partir da moldagem por injeção de pós metálicos / Maiquel Emerson Pfingstag. -- 2014.

98 f.

Orientador: Lírio Schaeffer.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, BR-RS, 2014.

1. Mini motor. 2. Moldagem de pós por injeção. I. Schaeffer, Lírio, orient. II. Título.

## **I - AGRADECIMENTOS**

À Deus;

A minha mãe Helenita Pfingstag;

A meu orientador Prof. Dr. Lírio Schaeffer;

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo aporte financeiro ao Projeto “DESENVOLVIMENTO DE ÓRTESES E IMPLANTES A PARTIR DE PÓS NANOMÉTRICOS APLICADOS A FABRICAÇÃO DE MICROCOMPONENTES” e bolsas de pós-graduação.

Aos Professores Atuantes no Centro de Tecnologia-UFGRS pelo incentivo e acesso a equipamentos;

Aos amigos e colegas por ajudas oportunas e pela soma de valores, principalmente a MSc.Raul Faviero de Mesquita e Dr. Moisés de Mattos Dias.

“Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro amanhã, portanto hoje é o dia certo para fazer, amar, acreditar, e principalmente viver.”

Dalai Lama

### III-SUMÁRIO

I- AGRADECIMENTOS .....	iii
II- EPÍGRAFE .....	iv
III- SUMÁRIO .....	v
IV- LISTA DE FIGURAS .....	x
V- LISTA DE TABELAS .....	xii
VI- LISTA DE ABREVIACÕES .....	xiii
VII- LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
VII- RESUMO .....	xv
VIII- ABSTRACT .....	xvi
1. INTRODUÇÃO .....	17
2. REVISÃO DA LITERATURA .....	20
2.1. Moldagem de pós por injeção .....	20
2.1.1. Formulação de carga e sistema aglutinante.....	22
2.1.2. Parâmetros de injeção .....	23
2.1.3. Extração química .....	24
2.1.4. Extração térmica .....	24
2.1.5. Sinterização .....	25
2.2. Motores elétricos e sua fabricação.....	26
2.3 Controladores de motores de passo .....	29
2.4 Ligas utilizadas em núcleos de motores elétricos.....	32
2.5 Motores de passo.....	33
2.6 Mini motores aplicados na área médica .....	34
2.7 Introdução ao magnetismo .....	36
2.7.1. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos.	36
2.7.2. Polos magnéticos .....	37
2.7.3. Dipolos magnéticos ou momentos magnéticos .....	38
2.7.4. Campo magnético .....	38
2.7.5. Curva de histerese magnética.....	39
2.8 Noções de óptica .....	41

<b>3. PROCEDIMENTOS E ANÁLISE EXPERIMENTAL.....</b>	<b>43</b>
<b>3.1. Materiais .....</b>	<b>43</b>
<b>3.2. Projeto do mini motor .....</b>	<b>45</b>
<b>3.2.1. Simulação computacional do mini motor.....</b>	<b>48</b>
<b>3.2.2. Dispositivo de Acionamento do mini motor de passo.....</b>	<b>48</b>
<b>3.3 Obtenção de um mini motor preliminar, à partir de ferro puro sinterizado .....</b>	<b>50</b>
<b>3.3.1 Caracterização do Ferro Puro Sinterizado .....</b>	<b>51</b>
<b>3.3.2 Preparação do pó de ferro.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.3 Compactação e Sinterização.....</b>	<b>52</b>
<b>3.3.4 Propriedades dos Corpos de Prova .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.4.1 Resistividade Elétrica .....</b>	<b>53</b>
<b>3.3.4.2 Curva de Histerese e Magnetização .....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.5 Usinagem de acabamento dos núcleos.....</b>	<b>55</b>
<b>3.3.6 Montagem do mini motor obtido por MP .....</b>	<b>56</b>
<b>3.4 Liga FeNi50 a partir da MP.....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.1 Moagem da liga FeNi50 .....</b>	<b>57</b>
<b>3.4.2 Granulometrias .....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura .....</b>	<b>58</b>
<b>3.4.4 Metalografias .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4.5 Compactação da Liga FeNi50 .....</b>	<b>59</b>
<b>3.4.6 Sinterização da liga FeNi50 .....</b>	<b>60</b>
<b>3.5 Características técnicas da Injetora Utilizada.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.1 Desenvolvimento da matriz dos corpos de prova.....</b>	<b>63</b>
<b>3.6 Cargas preliminares da liga FeNi50 injetada .....</b>	<b>64</b>
<b>3.6.1 Mistura das Cargas Injetável Preliminar e formulada</b>	<b>64</b>
<b>3.6.2 Parâmetros preliminares de injeção.....</b>	<b>66</b>
<b>3.6.3 Injeção dos Corpos de Prova .....</b>	<b>66</b>
<b>3.7 Corpos de prova a partir de uma carga comercial.....</b>	<b>67</b>
<b>3.7.1 Topologia dos corpos de prova injetados .....</b>	<b>67</b>
<b>3.7.2 Injeção Extração e Sinterização dos Corpos de Prova ..</b>	<b>68</b>
<b>3.7.3 Propriedades Físicas dos Corpos de Prova .....</b>	<b>68</b>
<b>3.7.4 Análise Térmica (DSC / TGA) .....</b>	<b>68</b>

3.7.5 Propriedades Reológicas .....	69
3.8 Simulações de injeção.....	70
3.9 Idealização do dispositivo endoscópico .....	70
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>72</b>
4.1 Mini motor preliminar a partir do ferro puro sinterizado .....	72
4.2 Liga FeNi50 a partir da MP convencional .....	74
4.3 Corpos de prova injetados à partir de carga comercial .....	78
4.3.1 Resistividade Elétrica.....	78
4.3.2 Dimensões dos corpos de Prova Injetados .....	79
4.3.3 Curva de Histerese e Magnetização.....	79
4.4 Corpos de prova injetados à partir de carga formulada.....	81
4.4.1 Resultados da obtenção da carga injetável .....	81
4.4.2 Análises reológicas da carga injetável FeNi50 .....	83
4.4.3 Análise Térmica (TGA/DSC) do FeNi50 formulado.....	83
4.4.4 Extração química, térmica, e Sinterização .....	84
4.4.5 Histerese do FeNi50 Injetado .....	84
4.5 Comparações dos materiais utilizados na pesquisa .....	85
4.6 Motor com FeNi50 Injetado e Testes de acionamento .....	88
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>6. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>92</b>

## IV Lista de Figuras

Figura 1 Fluxograma do trabalho .....	19
Figura 2 Processo simplificado da Moldagem de Pós por Injeção .....	20
Figura 3 Ângulo de contato entre as partículas de pó . e sistema aglutinante. a) baixo ângulo b)alto ângulo.....	21
Figura 4 Viscosidade x taxa de cisalhamento de carga injetável (Catamold aço inox).....	23
Figura 5 Curvas de extração térmica de alumínio.....	25
Figura 6 Modelo teórico das etapas que ocorrem durante a sinterização ...	26
Figura 7 Mini motor comercial Vexta PV266-01E .....	27
Figura 8 Exemplo de motor de relutância variável .....	27
Figura 9 Driver Unipolar trifásico para motor de passo de relutância variável.	30
Figura 10 Diagrama de blocos de driver para controle de motor de passo 5 fases .....	31
Figura 11 Diagrama de driver de motor de 4 fases .....	31
Figura 12 Motor de passo com rotor de relutância variável .....	33
Figura 13 - Motor de Passo de relutância variável trifásico com 3 rotores ....	34
Figura 14 Equipamentos médicos com uso de mini motores. A)Bomba centrífuga rotativa; B) Catéter de ultrassom motorizado; C)Braços robôs, cirurgia minimamente invasiva; D) Cápsula endoscópica; E) Ferramentas de cirurgia; F) Transmissão mecânica de braço robô e bomba de insulina; .....	35
Figura 15 Curva de Histerese para material magnético .....	40
Figura 16 Ciclo de histerese para materiais magnéticos duro e macio .....	41
Figura 17 Raio de luz se propagando em diferentes meios mostrando a refração .....	42
Figura 18 Microscopia eletrônica do Pó de Ferro .....	43
Figura 19 Microscopia eletrônica do pó de FeNi50.atomizado.....	44
Figura 20 Microscopia Eletrônica dos Pós de FeNi50 obtido por moagem..	45
Figura 21 Geometrias do mini motor e vista explodida da montagem .....	46
Figura 22 Medidas e topologia do rotor do mini motor .....	46
Figura 23 Medidas e geometrias do estator .....	47

Figura 24 Desenho esquemático do bobinamento em ligação 'Y' .....	47
Figura 25 Fluxo magnético simulado do mini motor .....	48
Figura 26 Esquema elétrico do sistema de acionamento do mini motor.....	49
Figura 27 Driver de acionamento do mini motor de passo .....	50
Figura 28 Sistema manual de bobinamento do mini motor .....	51
Figura 29 Metalografia do ferro puro sinterizado .....	51
Figura 30 Matrizes empregadas na compactação de ferro puro e FeNi50.....	52
Figura 31 Seção utilizada nos ensaios de resistividade.....	53
Figura 32 Anéis de Rowland prontos para ensaios magnéticos.....	55
Figura 33 Mini motor usinado por eletro-erosão a fio .....	56
Figura 34 Distribuição granulométrica de pós de FeNi50 .....	58
Figura 35 Amostras de pós metálicos prontos para observação em M.E.V.	59
Figura 36 Curvas de sinterização a)Aquecimento e patamar b)resfriamento.	60
Figura 37 Ciclo básico de injeção da máquina utilizada .....	61
Figura 38 Placa de fixação do molde (Parte móvel) .....	62
Figura 39 Matriz dos corpos de prova injetados.....	63
Figura 40 Desenho e detalhamento da matriz de injeção a) Matriz dos CPs b)Desenho e medidas.....	63
Figura 41 Matriz para corpos de prova (a) Formato dos corpos de prova (b) Forma da cavidade da matriz .....	64
Figura 42 Mistura de carga injetável preliminar a) Misturador com pás em Z b) moinho de facas c) carga injetável peletizado.....	65
Figura 43 Câmara de mistura de um reômetro de torque .....	65
Figura 44 Geometrias dos Corpos de provas injetados .....	67
Figura 45 TGA/ DSC de amostra de FeNi8 comercial .....	69
Figura 46 Viscosidade x tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do FeNi8 .....	69
Figura 47 Simulações de Injeção a) Tempo de injeção do estator b) melhor ponto do canal principal.....	70
Figura 48 Maquete do sistema endoscópico idealizado .....	71
Figura 49 Distribuição granulométrica do pó de Ferro puro .....	72
Figura 50 Rotor e estator do mini motor preliminar .....	73
Figura 51 - Mini motor preliminar com bobinamento.....	73

Figura 52 - Teste do Mini motor preliminar em escala .....	73
Figura 53 Formato das partículas de FeNi50 em MEV e distribuição granulométrica .....	74
Figura 54 Difração de Raios-X para amostras de pós de FeNi50 A) 5h B) 25h .....	74
Figura 55 Microestrutura de FeNi50 compactado e sinterizado .....	75
Figura 56 Relação entre densidade de inclusões e coercitividade.....	75
Figura 57 Curva de Histerese da liga FeNi50 via Metalurgia do Pó convencional .....	76
Figura 58 Curva de magnetização do Fe-50Ni sinterizado .....	77
Figura 59 Ensaio de resistividade do FeNi50 com medidas e resultados..	77
Figura 60 Geometria utilizada nos ensaios de resistividade e dados .....	78
Figura 61 Curvas de histerese de FeNi8 comercial injetado .....	79
Figura 62 Variação da permeabilidade magnética em função da composição da liga .....	80
Figura 63 Curva de magnetização do FeNi8 injetado .....	80
Figura 64 Sistema manual desenvolvido para mistura de cargas injetáveis.	81
Figura 65 Corpos de prova em forma de anel.....	82
Figura 66 Microestrutura do FeNi50 sinterizado a partir da carga formulada (nital 5%) .....	82
Figura 67 Análise reológica de carga formulada de FeNi50 .....	83
Figura 68 TGA/DSC da liga FeNi50 .....	84
Figura 69 Histerese magnética do FeNi50 injetado.....	85
Figura 70 Comparações de curva de magnetizações do FeNi8 e FeNi50..	85
Figura 71 Curvas de magnetização de materiais ferrosos .....	86
Figura 72 Comparações das histereses magnéticas .....	87
Figura 73 - Efeito de Recozimento em ciclo histerético do FeNi65 a) Ciclo retangular b) Ciclo do material sem tratamento .....	88
Figura 74 Mini motor de FeNi50 em teste de acionamento final .....	89
Figura 75 Esquema elétrico do dispositivo de acionamento dos testes finais	89

## V - Lista de Tabelas

Tabela 1 Teores típicos de ligantes típicos para injeção de aço 316L .....	22
Tabela 2 Ligas tradicionalmente utilizadas em motores elétricos, características elétricas e magnéticas .....	32
Tabela 3 Análise química do pó de ferro .....	44
Tabela 4 Composição química do pó de FeNi50 atomizado.....	44
Tabela 5 Densidades dos corpos de prova de ferro à verde e após sinterizados .....	53
Tabela 6 Resistividade ( $\rho$ ) dos corpos de prova de ferro puro.....	54
Tabela 7 Medidas médias dos corpos de prova para ensaios magnéticos a) antes de sinterizados b) depois de sinterizados.....	60
Tabela 8 Dados técnicos do equipamento utilizado .....	62
Tabela 9 Medidas utilizadas na carga final formulada.....	66
Tabela 10 Dados da carga injetável comercial.....	67

## **VI- Lista de Abreviações**

**CA** Corrente Alternada

**CC** Corrente Contínua

**CP** Corpo de Prova

**EVA** Ethil Vinil Acetat

**FeNi50** Liga metálica 50% Ferro e 50% Niquel

**F.E.M.** Finite Element Modeling Software

**LdTM** Laboratório de Transformação Mecânica

**MEV** Microscopio Eletrônico de Varredura

**MP** Metalurgia do Pó

**MPI** Moldagem por Injeção (em inglês: **PIM** Powder Injection Molding)

**PP** Polipropileno

## VII- Lista de Símbolos:

### Letras Arábicas:

<b>A</b> Área seção transversal dos corpos de prova	[mm <sup>2</sup> ]
<b>a</b> Medida menor da seção transversal do anel compactado	[mm]
<b>B</b> Indução magnética	[T, tesla ]
<b>b</b> Medida maior da seção transversal do anel compactado	[mm]
<b>B<sub>m</sub></b> Indução de Saturação	[T]
<b>B<sub>r</sub></b> Retentividade	[T]
<b>c</b> Diâmetro externo do anel compactado	[mm]
<b>d</b> Diâmetro interno do anel compactado	[mm]
<b>e</b> Distância maior do corte do anel compactado para ensaio de resistividade	[mm]
<b>E<sub>p</sub></b> Energia Potencial	[J]
<b>f</b> Distância menor do corte do anel compactado para ensaio de resistividade	[mm]
<b>h</b> Altura	[cm]
<b>H</b> Campo Magnético	[T]
<b>H<sub>c</sub></b> Coercitividade magnética	[A/m]
<b>i</b> Corrente elétrica	[A]
<b>k</b> constante magnética	[--]
<b>l</b> Comprimento	[ m]
<b>m</b> Massa	[g]
<b>m (m1 m2)</b> Polos magnéticos	[--]
<b>M</b> Magnetização	[A/m]
<b>N<sub>1</sub></b> Número de espiras do primário	[voltas/m]
<b>N<sub>2</sub></b> Número de espiras do secundário	[voltas/m]
<b>n<sub>1</sub>...</b> Índices de refração	[-]
<b>R</b> Resistência elétrica	[Ω]
<b>r</b> Distância	[mm]
<b>U</b> Tensão	[Volt]
<b>V</b> Volume	[cm <sup>3</sup> ]
<b>T</b> Temperatura	[°C]
<b>t</b> Tempo	[horas]

## Letras Gregas:

$\alpha$	Ângulo de incidência	[graus]
$\beta$	Ângulo de refração	[graus]
$\mu$	Momento magnético	[ J/T]
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do Vácuo	[H m]
$\mu_p$	Permeabilidade Magnética	[H/m]
$\mu_r$	Permeabilidade Relativa	[H/m]
$\rho$	Densidade	[g/cm <sup>3</sup> ]
$\rho_r$	Resistividade Elétrica	[ $\Omega$ m]
$\emptyset$	Diâmetro	[cm]

## VIII- RESUMO

Neste trabalho foi projetado o núcleo de um mini motor de passo, com rotor e estator, obtidos a partir do processo de Moldagem de Pós por Injeção (MPI). Foram avaliadas as propriedades magnéticas, elétricas e mecânicas da liga FeNi50 obtida pelo processo MPI. Também por metalurgia do pó convencional obteve-se as mesmas propriedades físicas para comparação, e avaliar os dois processos de fabricação. Na obtenção do mini motor, primeiramente procedeu-se de maneira alternativa com a utilização de ferro puro, bem como, na preparação dos pó de ferro (moagem e misturas), e assim fazendo a avaliação funcionamento do motor. Projetou-se a carga injetável e todos os parâmetros fazendo-se um levantamento por reologia de propriedades como viscosidade e tensão de cisalhamento. Também com DSC/TGA analisou-se os componentes da carga, termicamente, e estipulou-se as temperaturas de extração térmica e química. Após confecção dos corpos de prova levantou-se os dados elétricos e magnéticos. O material que apresentou melhor comportamento para fins de utilização em motores (alta resistividade, alta permeabilidade magnética), foi o injetado de FeNi50 desenvolvido, com resistividade média de  $5,06 \cdot 10^{-7} \Omega m$  e baixas perdas por histerese magnética. Por fim construiu-se o mini motor com FeNi50 a partir de cilindros injetados. O motor foi submetido a testes de acionamento.

**Palavras-chave:** Mini motor, MPI (Moldagem de Pós por Injeção);

## **IX- ABSTRACT**

This work was designed the core of a mini stepper motor, rotor and stator, obtained from the Powder Injection Molding (PIM) process. Magnetic, electrical and mechanical properties of the alloy obtained by the PIM process FeNi50 were evaluated. Also by conventional powder metallurgy gave the same physical properties for comparing and evaluating the two processes. Obtaining the miniature motor is held first alternative way with the use of pure iron as well as in the preparation of iron powders (grinding and mixtures thereof), thus making the evaluation of engine operation. Designed to charge injection and all the parameters by making a survey by rheological properties such as viscosity and shear stress. Also DSC / TGA was analyzed components of the load, heat, and it was stipulated temperatures of thermal and chemical extraction. After preparation of the specimens rose electric and magnetic data. The material showed the best behavior for the purpose of use in motors (high resistivity, high magnetic permeability), was injected FeNi50 developed, with an average resistivity of  $5.06 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$  and low loss magnetic hysteresis. Finally we constructed the mini motor with FeNi50 from injected cylinders. The engine underwent drive tests.

**Keywords: Mini motor, PIM (Powder Injection Molding)**

## 1. INTRODUÇÃO

Nesta abordagem, a moldagem de pós por injeção (MPI) vem se tornando um processo de fabricação altamente promissor, diminuindo gastos com energia, e reduzindo o processo até a forma final. Combinando a versatilidade de formas, a alta produtividade e as propriedades elétricas e magnéticas dos materiais metálicos (RICHARDSON, D.V.; 1982). É minimamente detalhada as geometrias da máquina elétrica. Foi também avaliado se houve significância nas perdas de eficiência ou rendimento, por se tratar de blocos maciços.

Moldagem por injeção é um processo de fabricação amplamente utilizado como um método de replicação para produção em massa. Os recursos dessa tecnologia de replicação tem de ser estudados sistematicamente a fim de determinar as limitações do processo (GRIFFITHS, C.A.; 2007). Materiais, obtidos a partir dos processos da Metalurgia do Pó, possuem como característica, alta resistividade elétrica, alta permeabilidade magnética relativa, baixa coercitividade magnética e alta indução de saturação. (DIAS, M.M.; 1999)

Micro sistemas de engenharia são considerados um dos principais vertentes do futuro econômico em todo o mundo (PIOTTER, V.; et al.; 2008). Para fazer uso completo deste potencial industrial, os processos têm de estar disponíveis. Não só permitir a fabricação de pequenos componentes, mas também para uma produção economicamente eficiente. Para a produção em série de pequenas, médias e grandes peças, a moldagem por injeção pode ser empregada. Esta tecnologia já deu origem a uma série de produtos comercializáveis (WICHT, H.; 2005).

Núcleos de motores elétricos (estator e rotor), são tradicionalmente construídos com chapas de aço baixo carbono. Alguns motores de maior rendimento são construídos com chapas de aço-silício, com uma faixa percentual de 1 à 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos, consiste basicamente na laminação, corte, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico onde cria-se uma camada de óxido isolante, e os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um determinado tempo (estipulado pela composição do material), havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes (REBORA, G.;1969).

A micro moldagem por injeção ( $\mu$ PIM) vem sendo uma das tecnologias-chave para a fabricação de microcomponentes e superfícies micro estruturadas. Devido às crescentes demandas em diferentes áreas de aplicações, tais como sensores, dispositivos médicos e micro máquinas (IMBABY, M; 2008). Na micro injeção segue o processamento básico de moldagem por injeção, que inclui quatro etapas: mistura de pós metálicos e ligantes termoplásticos, a injeção da mistura na micro cavidade do molde, extração térmica catalítica ou por solvente e, finalmente, a sinterização do material (KONG, X; 2009)

O motor escolhido para o desenvolvimento, baseado em projetista renomado no desenvolvimento de motores elétricos, (Prof. Egomar Locatelli, in memoriam), foi o motor de passo de relutância variável. Salienta-se que as tecnologias de desenvolvimento de motores elétricos estão muito diversificadas e o foco está em novos processos de fabricação e novos materiais, bem como formas, geometrias e sistemas para seus controles. Os motores de passo se diferenciam dos demais, por em geral não necessitar altas velocidades nem mesmo altos torques, sendo apenas para posicionamento de sistemas sensíveis, ainda mais quando trata-se de escalas mini (ISHIKAWA, T.; 2000).

A área visada para aplicação do mini motor desenvolvido neste trabalho, é na área médica, em cirurgias minimamente invasivas, com o principal fim, uma idealização de equipamento para endoscopia. Melhorar o sistema de imagens internas do corpo humano, sem necessitar a retirada e giros físicos do corpo do equipamento e, por consequência, não causar mais desconfortos para o paciente. Não se limitando só à área médica, este tipo de máquina elétrica fornece movimentos precisos e com paradas em pontos exatos, podendo então ser utilizado para diversos fins, como por exemplo sistemas ópticos, periféricos de informática, robótica, sistemas mecânicos, automação, etc (JUFER, M.; 2000).

Para a total montagem do mini motor e todo desenvolvimento de pós metálicos e cargas injetáveis houveram diversos obstáculos. As misturas não efetivas, pós não adequados e acima de tudo o bobinamento dos polos do estator. O motor com suas medidas milimétricas, também os fios utilizados com pequena espessura eram de fácil rompimento e descascamento da camada isolante.

A figura 1 apresenta um fluxograma descrevendo a metodologia do trabalho desenvolvido

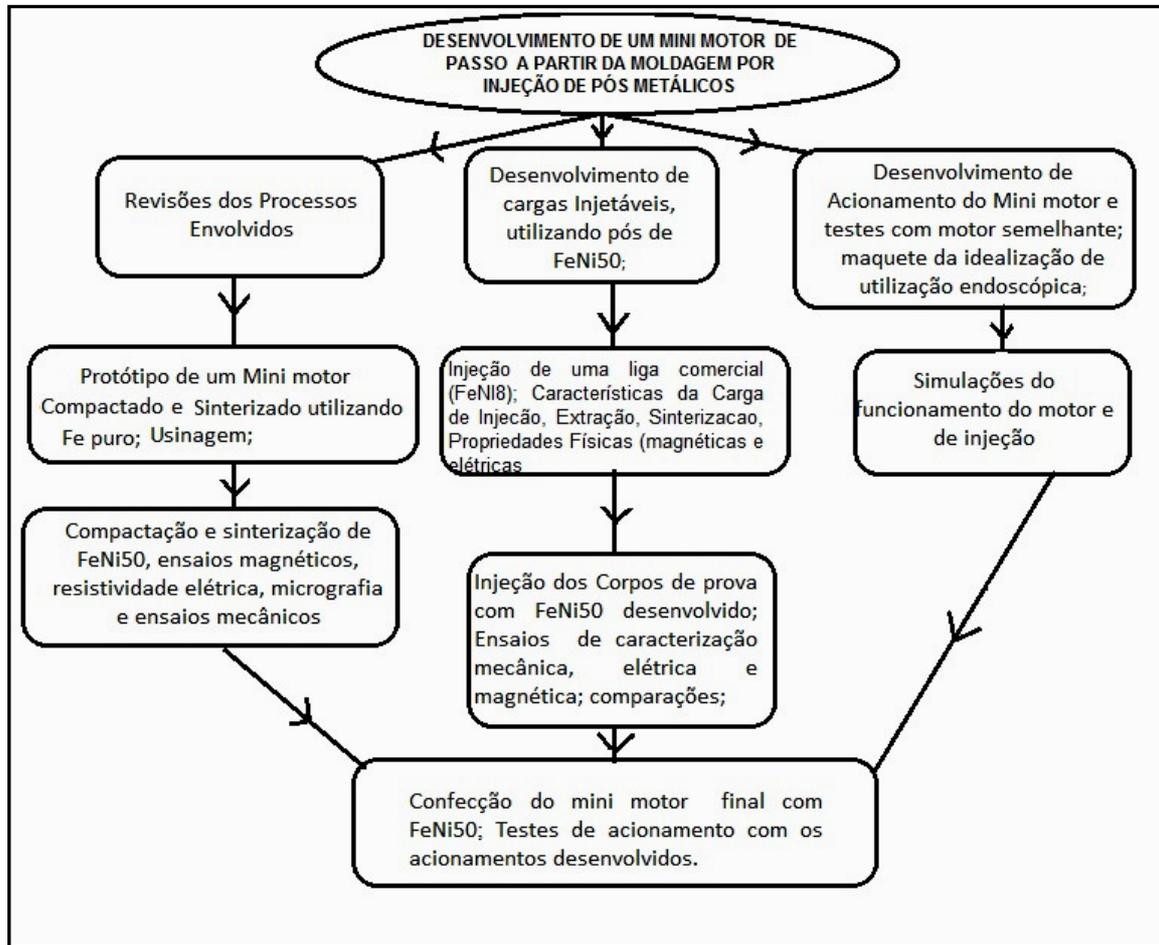


Figura 1 - Fluxograma do trabalho

## 2. REVISÃO DA LITERATURA

### 2.1 Moldagem de pós por injeção (MPI)

O processo moldagem de pós por injeção (MPI), também internacionalmente conhecido como PIM (Powder Injection Molding), é uma das ferramentas de produção de peças de pequena seção e formas complexas de maior expansão, sobretudo nos países da Europa. Um diagrama com as fases deste processo está apresentado na figura 2, e tem os seguintes passos: Mistura do pó metálico com sistema aglutinante, formulação da carga, injeção, remoção dos ligantes, e sinterização (SHA, B.; 2007) (PIOTTER, V.; 2011).

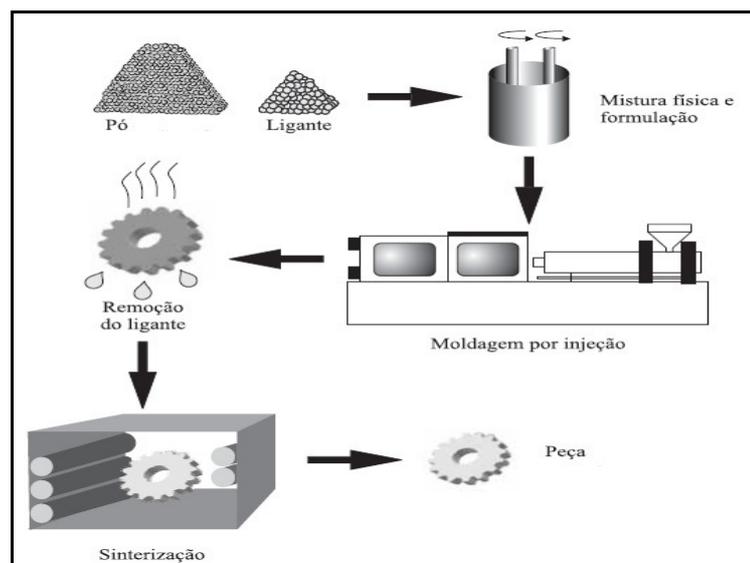


Figura 2 - Processo simplificado da Moldagem de Pós por Injeção (OLIVEIRA, R.V.B.; 2004)

O sistema aglutinante é um veículo temporário para compactar homogeneamente as partículas de pó na forma desejada e então manter as partículas nessa forma até o início da sinterização. As composições dos aglutinantes e as técnicas de extração (debinding) são as principais diferenças entre os vários processos MPI. Um requisito para o aglutinante é que ele permita o fluxo e a compactação das partículas dentro da cavidade da matriz. O sistema aglutinante deve ter um baixo ângulo de contato que propicia um maior teor de sólidos e

homogeneidade. Um baixo ângulo de contato entre as partículas de pó e o sistema aglutinante (figura 3) mantém as partículas sob compressão devido à força interna capilar, diminuindo a distorção e movimento de partículas (GERMAN, R.M.; 1997).

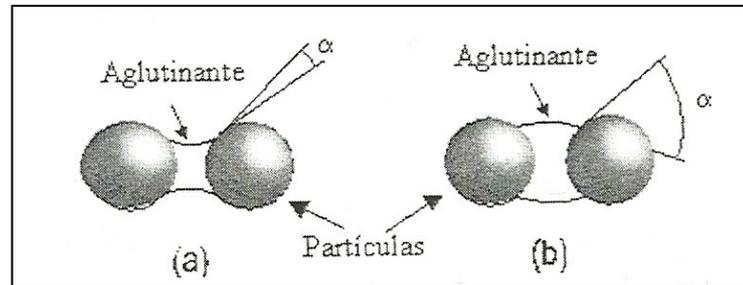


Figura 3 - Ângulo de contato entre as partículas de pó e sistema aglutinante. a) baixo ângulo b) alto ângulo (GERMAN, R.M.; 1997)

A utilização de múltiplos componentes no sistema aglutinante permite a decomposição progressiva na extração. Enquanto um componente é removido, os componentes restantes do sistema mantêm as partículas de pó no lugar e retêm a forma do compactado nesse primeiro estágio de extração. Subsequentemente, o componente do aglutinante restante vaporiza através dos poros abertos, sem gerar uma pressão interna de vapor, que possa causar falha no compactado. Os sistemas aglutinantes mais utilizados são baseados em algum tipo de cera (parafina, cera de carnaúba) e polímeros sintéticos. Polímeros biodegradáveis, celulose, gel, água e várias substâncias inorgânicas ainda podem ser utilizadas. (GERMAN, R.M.; 1997)

A carga de moldagem de pós por injeção (feedstock) é composta da mistura de pó metálico com o sistema aglutinante. A composição de uma carga de moldagem que produza bons resultados considera diversos fatores. É necessário uma quantidade suficiente de aglutinantes para preencher todos os espaços entre as partículas e lubrificar o deslizamento das partículas durante a moldagem. Normalmente, a viscosidade depende da relação entre o sistema aglutinante e pó metálico. Entretanto, um elevado teor de aglutinante é também indesejado, pois o componente perde sua forma durante o processo de extração. (GERMAN, R.M.; 1997)

As principais etapas da injeção da carga em matriz metálica são as seguintes: fechamento do molde; injeção; transição (ocorre quando a cavidade está completamente preenchida); manutenção da pressão; resfriamento e descompressão; abertura do molde e finalmente ejeção da peça.

### 2.1.1 Formulação de carga e sistema aglutinante

Existe uma vasta gama de formulações de carga para injeção, estas são resultado de uma mistura de polímeros e ceras, mundialmente denominada “Binder”, com os pós metálicos. Para cada tipo de equipamento, molde ou formas, há uma seleção de parâmetros importantes da carga, como viscosidade e tensão de cisalhamento, e do equipamento como velocidade de injeção e pressão de injeção. Como exemplos de aglutinantes (misturas de polímeros e ceras), tabela 1, tem-se alguns utilizados para aço inoxidável 316L.

Tabela 1. Teores típicos de ligantes para injeção de aço 316L (QUINARD,C.; 2010)

Formação (%vol)	Polipropileno	Polietileno	Parafina	Ácido Esteárico	ácido oléico
<b>1</b>	X	40	X	60	X
<b>2</b>	40	x	55	5	X
<b>3</b>	94	x	X	X	6

Para um processo de injeção efetivo, é necessário se ter uma análise detalhada das características reológicas e análise térmica das cargas, pois conforme o caso trabalha-se com peças pequenas e com geometria complexas que necessitam de faixas ótimas de viscosidade e temperaturas, para uma boa moldagem e efetivação de peça. Tem-se na figura 4 uma análise tradicional de reômetros capilar para uma carga injetável onde se analisa a viscosidade em função da taxa de cisalhamento. (REIS, S.G.; 2011)

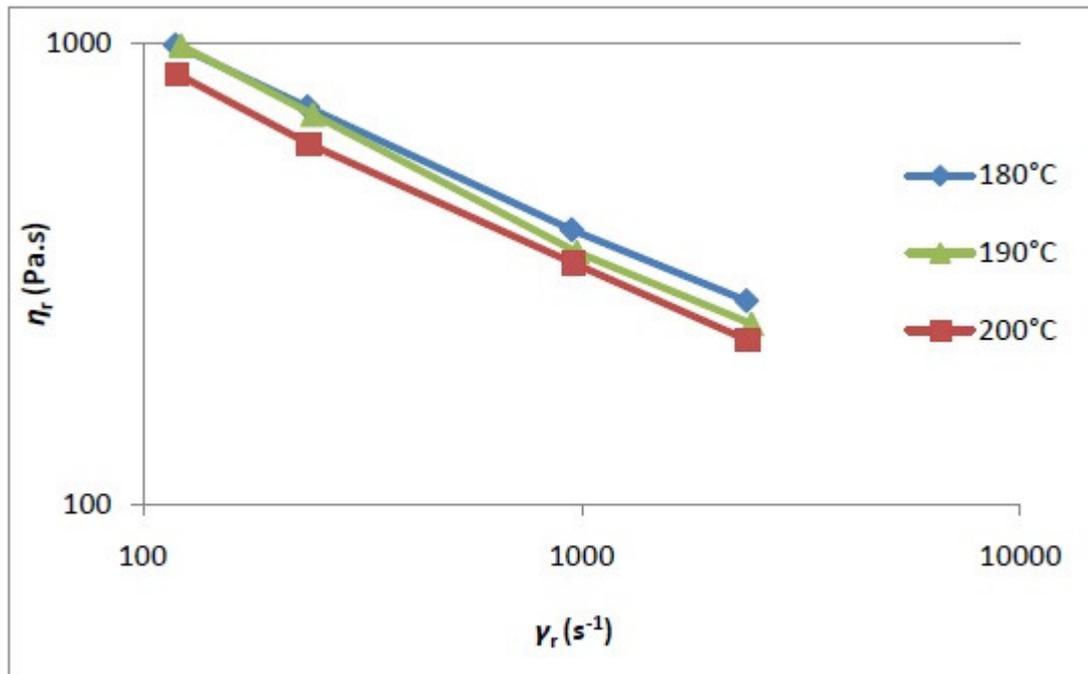


Figura 4 – Viscosidade x taxa de cisalhamento de carga injetável (Catamold aço inox) (REIS, S.G.; 2011)

### 2.1.2 Parâmetros de injeção

Durante a injeção alguns fatores influenciam na qualidade do produto. Estes fatores devem ser estipulados experimentalmente para cada tipo de peça à ser produzida. Os mesmos podem ser definidos como:

a) Velocidade de injeção: define a velocidade com que a carga de moldagem será injetada. Parâmetros errados de velocidade podem acarretar o “jetting” (formação de uma elevada pressão da carga de moldagem no interior do canal de alimentação do molde) e causar um mau preenchimento. (MILKE, E.C.; 2000)

b) Pressão de injeção: a pressão de injeção da matriz deve ser ajustada de maneira que a peça seja moldada sem defeitos e que esta pressão não exceda a capacidade de fechamento do molde, o que acarreta na abertura do mesmo e causa defeitos na peça.

c) Temperatura do molde: para o processo de MPI a temperatura do molde deverá ser constante e praticamente em quase todos os casos, acima da temperatura ambiente. O controle de temperatura da matriz é necessário para que seja evitado a contração da peça durante seu resfriamento. (MILKE, E.C.; 2000)

d) Perfil de temperatura das regiões de aquecimento da carga moldável: o controle de temperatura das zonas de aquecimento ao longo do fuso de injeção são importantes para a determinação da fluidez da mistura moldável.

e) Tempo de manutenção da pressão: o tempo de manutenção da pressão deve ser estipulado de maneira que as peças apresentem bom aspecto visual, sem rechupes e livres de tensões residuais.

f) Tempo de resfriamento: é o tempo necessário para solidificar a peça em sua forma de maneira que possa ser extraída sem ser deformada.

Um fator relevante no desenvolvimento de produtos por moldagem por injeção é a confecção do molde, principalmente ao elevado custo de sua produção.

### **2.1.3 Extração química**

A extração dos aglutinantes é a uma das etapas mais críticas do processo de moldagem de pós por injeção e tem seis possibilidades fundamentais de realização, sendo uma delas a remoção através de solventes condensados. Esta se dá através da imersão das peças verdes em um fluído que dissolve alguns dos componentes do sistema aglutinante, que deixam a estrutura através dos poros e, subsequentemente, a extração por evaporação. (BOSE, A.; 1995)

O tempo de extração na imersão em solventes condensados exhibe relações similares a outros processos, entre a espessura da peça e o tempo. Por outro lado, esta rota requer um sistema aglutinante composto por, no mínimo, dois componentes insolúveis entre si, um que é extraído e outro que permanece, segurando as partículas até a próxima etapa do processo. O componente que é extraído, por razões de conectividade com a superfície, deve ser constituído por, no mínimo, 30% do sistema aglutinante. Durante a extração, podem ocorrer uma série de defeitos, tais como distorção, contração localizada, trincas ou empenamentos, que serão minimizados devido ao ajuste correto das proporções. (SETASUWON, P.; et al.; 2008)

### **2.1.4. Extração térmica**

A união do aglutinante com as partículas de pó metálico é importante para uma abertura progressiva dos poros da peça durante a extração. Baixas

concentrações de um tipo de aglutinante pode causar a formação de bolsas isoladas. Estas bolsas isoladas são compostas pelo componente aglutinante de menos estabilidade, havendo, então, rompimento do compactado durante a extração, devido à pressão interna de vapor formada nestes pontos. O primeiro componente a ser removido deve constituir 30% ou mais do aglutinante, motivo este da composição dos aglutinantes ser majoritariamente à base de ceras ou componentes de baixo ponto de fusão. Geralmente as ceras são extraídas por solventes, enquanto que os polímeros sintéticos são removidos por degradação térmica. Assim, são os polímeros sintéticos que mantêm as partículas de pó unidas nos estágios iniciais de extração (LI, Y.; et al ;2003).

Na extração térmica, assumindo que no estado inicial os poros estão completamente saturados por aglutinantes, eles evaporam primeiramente na superfície. Inicialmente o fluxo dos aglutinantes é rápido, então a extração é controlada pela taxa de degradação do aglutinante. Algumas curvas de extração térmica (figura 5) comparam os aspectos finais das amostras, constatando que os ciclos longos de extração térmica apresentam amostras com menor índice de defeitos (Barrière, T.; 2000). Sugerindo que taxas de aproximadamente 5 °C/h seja a mais indicada para evitar defeitos devido a extração térmica nas amostras.

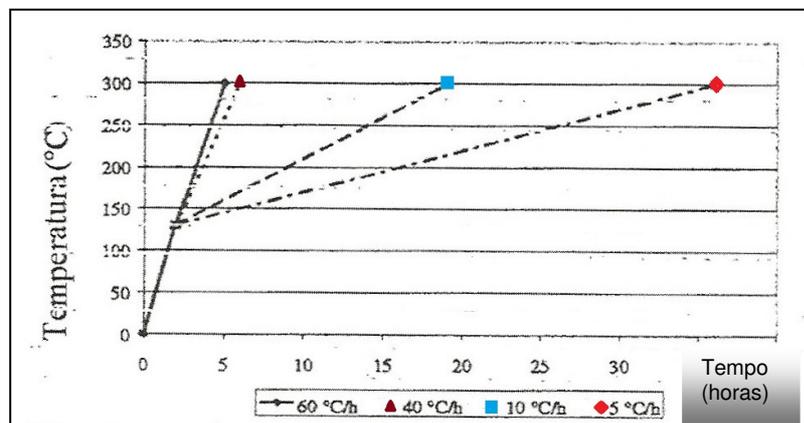


Figura 5 - Curvas de extração térmica de alumínio (PIWILL, I.E.; 1992.)

Para os materiais em geral, sugere-se taxas de aquecimento lentas.

### 2.1.5 Sinterização

É um tratamento térmico para a união em uma coerente massa sólida e confere à peça final integridade estrutural. Este passo é necessário, uma vez que o aglutinante foi anteriormente retirado durante a extração química e térmica. Durante

a sinterização em alta temperatura, as porosidades são eliminadas e as partículas de pó unem-se. Consequentemente, o componente se contrai macroscopicamente. (GERMAN, R.M.; 1990)

As teorias existentes que tentam explicar os fenômenos que ocorrem durante a sinterização podem ser resumidas pela consideração dos seguintes estágios: ligação inicial entre as partículas; crescimento do “pescoço”; fechamento dos canais que interligam os poros; arredondamento dos poros; densificação ou contração dos poros; crescimento das partículas eventualmente (figura 6) (GERMAN, R.M.; 1997).

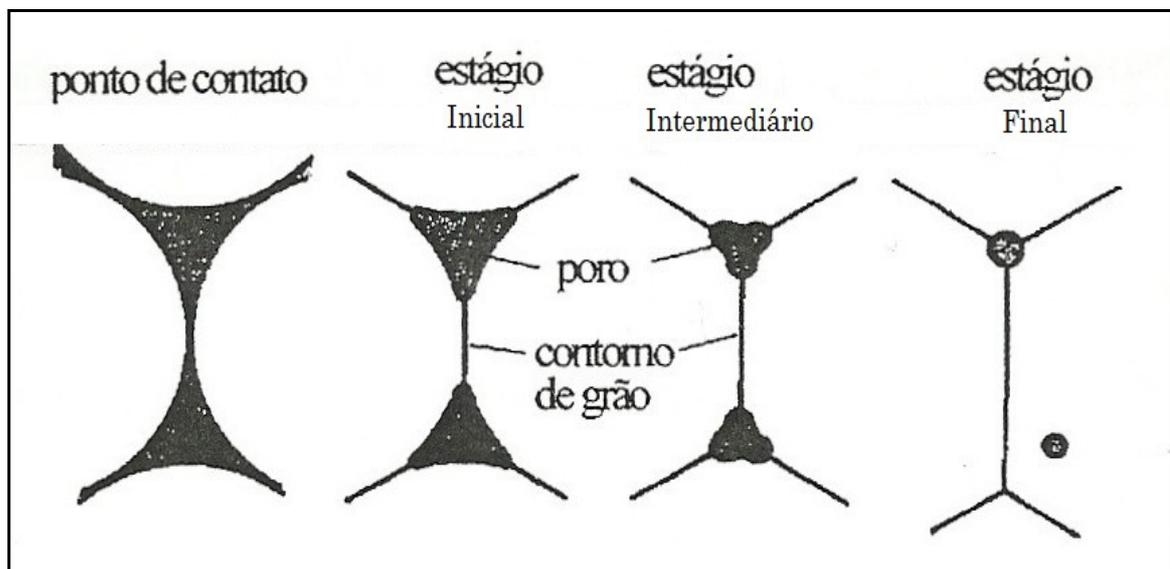


Figura 6 - Modelo teórico das etapas que ocorrem durante a sinterização (GERMAN, R.M.; 1990)

## 2.2 Motores elétricos e sua fabricação

Os motores elétricos vêm sendo produzidos da mesma forma desde os anos 1850. Somente nos últimos 10 a 15 anos métodos alternativos de produção foram estudados.

Motores elétricos na sua grande maioria comercialmente, os núcleos do estator e do rotor são construídos com chapas de aço baixo carbono (figura 7). Algumas máquinas de maior rendimento ainda são fabricadas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos, consiste basicamente em laminação, estampagem (corte), um tratamento para isolamento elétrica entre as chapas, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num

tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes (DIAS, M.M.; 2005).

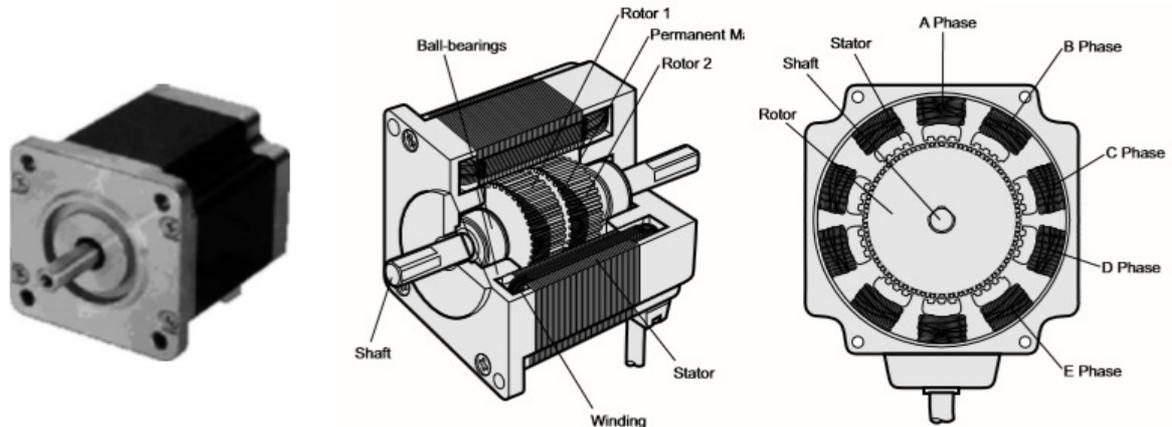


Figura 7 - Mini motor comercial Vexta PV266-01E (MELIN,P.; 2004)  
(BARABAS,Z.A.;2013)

O princípio para a comutação em motores de passo é a mesma para três variedades de enrolamento, mas torna-se importante para trabalhar a ordem correta para energizar os enrolamentos para fazer o motor de passo operar corretamente. A geometria do motor ilustrado na figura 8, dá  $30^\circ$  por passo, usa o menor número de dentes do rotor e pólos do estator que possa funcionar de forma satisfatória. Usando mais pólos do motor e mais dentes do rotor permite a construção de motores com ângulo de passo menor. (MELIN, P.; 2004)

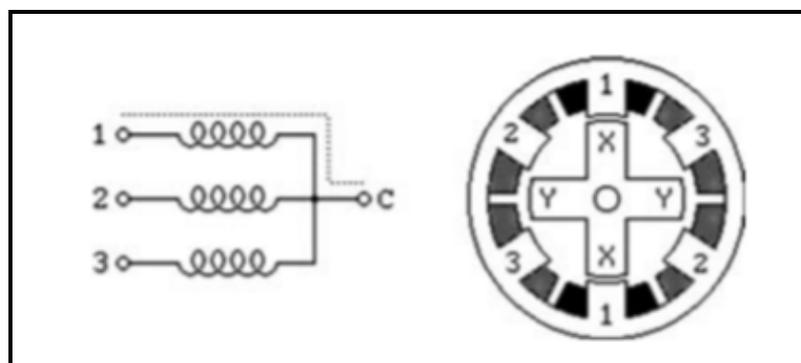


Figura 8 - Exemplo de motor de relutância variável (MELIN, P.; 2004)

Com a miniaturização e a complexidade de forma de dispositivos nos últimos anos, moldagem de pó por injeção (PIM) parece ser um processo adequado para a fabricação de alta performance de componentes magnéticos (DUAN, B.; 2006).

Conforme se pode constatar pela bibliografia, nos últimos 30 anos as pesquisas se concentraram basicamente no desenvolvimento de novas topologias de conversores e novas técnicas de controle. Pode-se constatar, por exemplo, que as máquinas de indução sofreram poucos avanços em relação a sua topologia tradicional, sendo que a maioria dos acionamentos empregam ainda máquinas de fabricação normal (GILIO, A. S.; 2003). Com relação à máquina síncrona constata-se um desenvolvimento de inúmeras novas variantes para princípios já há muito estabelecidos, tais como máquinas a ímãs, máquinas de relutância, máquinas a relutância chaveada, motores de passo e máquinas híbridas, as quais foram impulsionadas pelo desenvolvimento de novos tipos de ímãs a base de terras raras. O desenvolvimento e otimização destes tipos novos de máquinas também foi em grande parte possível graças ao desenvolvimento de técnicas numéricas avançadas de projeto e análise, entre eles o método dos elementos finitos. Estas novas variantes utilizam, entretanto, em sua grande maioria, materiais convencionais para as partes ferromagnéticas, ou sejam os núcleos do estator e do rotor ainda são formados a partir de chapas de aço laminadas. Existem poucos trabalhos publicados sobre a utilização de materiais fundamentalmente novos como núcleo magnético de máquinas (CHAPMAN, S. J.; 2002).

Os mini motores de passo, podem ser vistos como motores elétricos sem comutadores (KENJO, T. ; 1999). Tipicamente, todos os enrolamentos no motor são parte do estator e o rotor de ímã permanente ou, no caso de motores de relutância variável, um bloco dentado de um material magneticamente macio (MELIN, P.;2004).

A produção de motores elétricos pelo processo de Moldagem de Pó por Injeção, é pouco citada na literatura. Porém pode-se afirmar que o uso de materiais produzidos por este processo tem grande viabilidade para motores que trabalham em altas frequências. Pesquisas apontam o uso de material sinterizado em máquinas elétricas, que deverá conferir às mesmas características de desempenho e rendimento, além de simplificar e baratear o seu processo de fabricação. As máquinas desenvolvidas a partir desta tecnologia, poderão ser aplicadas com vantagens em um grande número de acionamentos elétricos a velocidade variável, tais como bombas, ventiladores, compressores, motores para refrigeradores, ar

condicionado, máquinas de lavar e automóveis, e veículos em geral (PEREIRA, L. A.; 2000).

Empresas do setor de sinterizados, já fabricam pós de alta permeabilidade magnética, também conhecidos por microencapsulados, para uso em núcleos de estator e rotor de máquinas elétricas. Estes pós são obtidos a partir de ligas ferromagnéticas de alta permeabilidade, onde as partículas são envolvidas por resinas, sendo as mais empregadas, as termofixas. A resina tem duas funções: unir e fazer uma isolação elétrica nas partículas de pós (JANSSON, P.; 1992).

### **2.3 Controladores de motores de passo**

Os motores de passo são amplamente utilizados, originalmente são projetados para fornecer controle de posicionamento preciso dentro de um número inteiro de passos sem o uso de sensores de posição. Ou seja, eles são de malha aberta, estáveis para qualquer posição e, conseqüentemente, nenhuma realimentação é necessária para controlá-los. Mas, usando o motor de passo em uma configuração laço aberto resulta em um desempenho muito baixo (CHRIFI-ALAOUI, L.; 1997). Um controlador de micro-passo na configuração laço aberto normalmente controla a corrente do motor em níveis discretos. Em particular, esses controladores podem ser implementados usando a realimentação de sensores de posição, que são montados no eixo para regular as correntes nos enrolamentos do motor, assim rejeitam perturbações no circuito de controle (Rahman, M.F.; 1998) (SELK, G.A.; 2003).

Normalmente, um motor de passo é acionado no modo meio passo e passo completo. Isto significa que as correntes no motor estão comutadas de acordo com um padrão específico. Em comutação, o eixo do motor move um pequeno passo. Usando o modo de micro-passo a corrente nas bobinas do motor não são comutadas, e sim modificados de forma contínua com uma forma de onda senoidal (SELK, G.A.; 2003).

As ondas de seno-cosseno permitem o motor mover-se continuamente a partir de um pólo (posição passo todo) para a seguinte. Quando a corrente aumenta em uma bobina diminui na outra, o que resulta em o rotor avançar suavemente. Micro-passo é uma forma de movimentar o fluxo do estator de uma maneira mais precisa do que nos modos de condução meio passo ou passo completo. As

características mais importantes de micro-passo é que é melhorada a resolução de posição, mas há redução no torque, especialmente a velocidades mais baixas (SELK, G.A.; 2003).

Os motores de passo também têm sido utilizados extensivamente em controles em malha aberta. O controlador de lógica fuzzy fornece um algoritmo, que converte o controle lingüístico, com base no conhecimento de especialistas em uma estratégia de controle automático (MELIN, P.; 2002). Portanto, o algoritmo de lógica fuzzy é muito mais próximo do pensamento humano do que os sistemas tradicionais de lógica (CASTILLO, O.; 2002). Além disso, a lógica fuzzy é usada com mais frequência para o controle de máquinas elétricas, tais como corrente direta ou indução direta (LI, Y.F.; 1989). No entanto, o principal problema com a lógica fuzzy é que não existe um procedimento sistemático para o projeto de um controlador fuzzy. O problema com geração distorcida do controlador lógico está relacionado com a escolha do regulador de parâmetros. Por este motivo, aplicam-se a metodologia ANFIS (JANG, J.S.R.; 1997, 1993), para adaptar os parâmetros do controlador fuzzy de acordo com os dados reais sobre o problema (CASTILLO, O.; 1998, 2001).

Muitos tipos de drivers são possíveis, desde simples como o utilizado neste trabalho, circuito unipolar com 3 fases em um motor de relutância variável, figura 9, como outros tipos complexos de motores comandados por programas de computadores. As figuras 10 e 11 mostram em diagramas de bloco 2 tipos de controladores complexos, sendo para diferentes motores de passo ( 5 fases e 4 fases respectivamente).

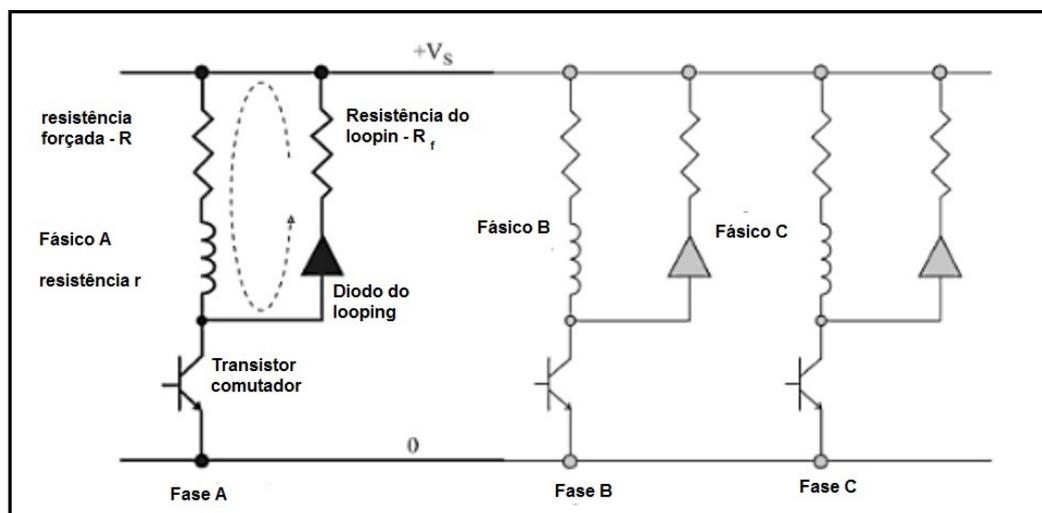


Figura 9 – Driver Unipolar trifásico para motor de passo de relutância variável  
(Adaptado de ACARNLEY, P.; 2007)

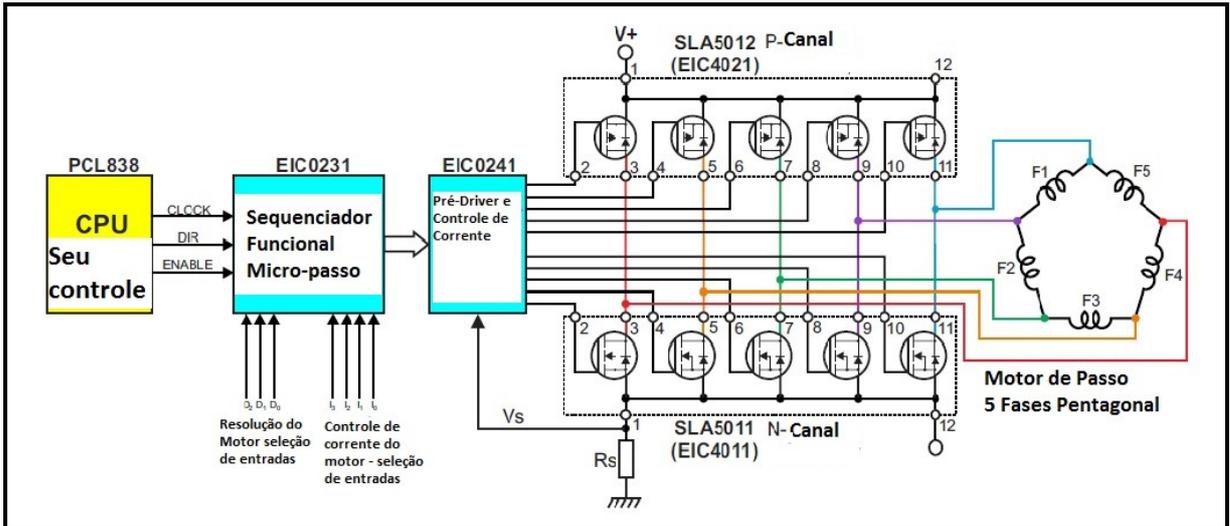


Figura 10 - Diagrama de blocos de driver para controle de motor de passo 5 Fases (Adaptado de BARABAS, Z.A.; 2013)

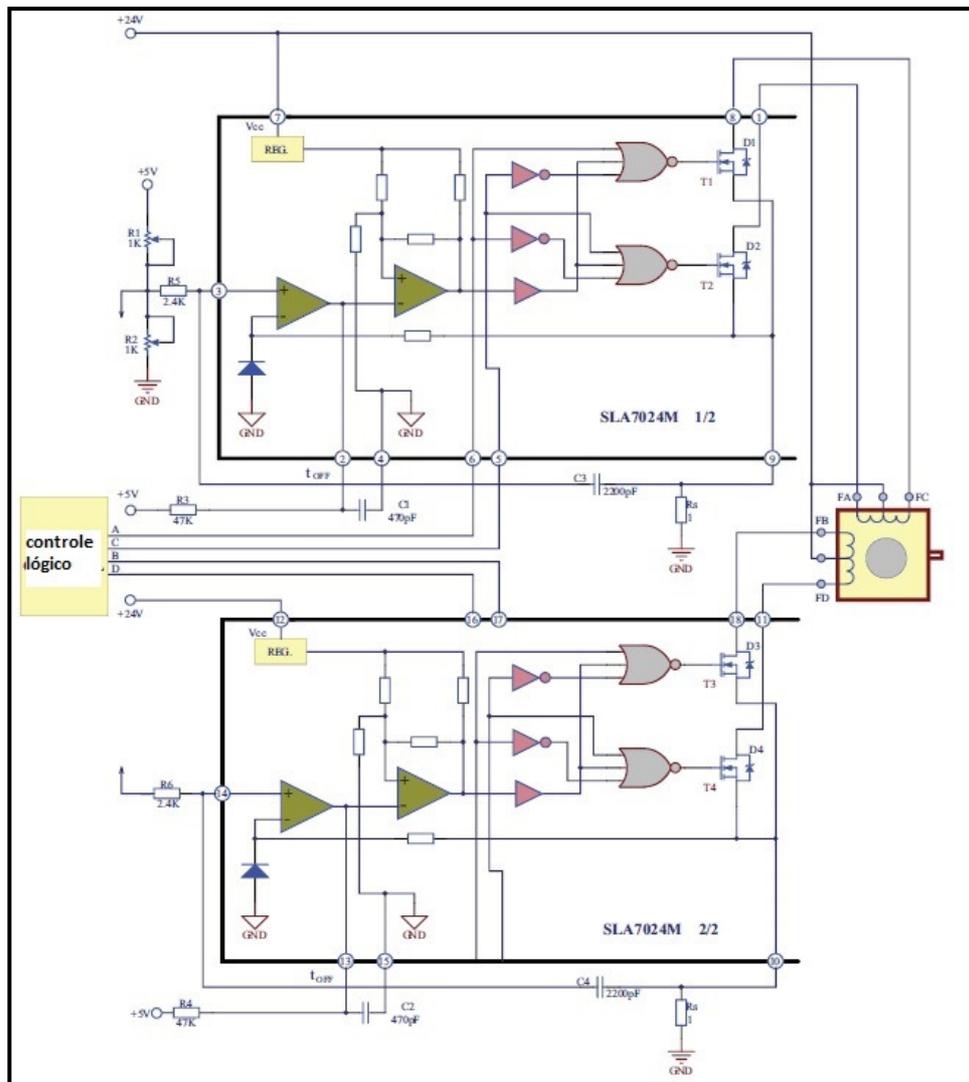


Figura 11 - Diagrama de driver de motor de 4 fases (Adaptado de MORAR, A.; 2014)

## 2.4 Ligas utilizadas em núcleos de motores elétricos

Aço-silício é o material magnético macio básico para motores elétricos. Materiais de pó magnético macio amorfo foram introduzidos apenas recentemente, com potencial para aplicação em motores de alta velocidade (alta frequência). As ligas apresentadas na tabela 2, são também comumente empregadas em núcleos do rotor e estator de motores elétrico na forma de chapas.

Tabela 2 – Ligas tradicionalmente utilizadas em motores elétricos, características elétricas e magnéticas (DE OLIVEIRA , J. G. S. M; 2009).

LIGA	Densidade $\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Indução máxima $B_m$ [T]	Retentividade $B_r$ [T]	Campo Magnético $H_c$ [A/m]	Permeabilidade Mag. Relativa $\mu_r$ [Ad.]	Resistividade $\rho_c$ [ $\mu\Omega$ .m]
Fe	6,8	1,14	0,96	131	2.900	0,14
	7,2	1,36	1,18	127	3.700	0,12
	7,4	1,47	1,29	119	4.700	0,11
Fe-3%Si	6,8	1,17	0,94	104	4.900	0,59
	7,0	1,31	1,09	92		0,55
	7,2	1,39	1,18	80		0,52
Fe-50%Ni	6,8	0,93	0,71	21	21.000	0,78
	7,1	1,09	0,80	20		0,69
	7,5	1,27	0,94	19		0,60
Fe-81%Ni-2%Mo	7,8	0,72	0,48	6	77.000	0,60

A primeira consideração que se deve fazer é que precisa-se de materiais de alta permeabilidade magnética, que ofereçam a mínima relutância possível ao fluxo magnético que, a cada ciclo da corrente, alterará o sentido dos dipolos magnéticos no núcleo magnético. Por isso, se usa materiais magnéticos macios. Dentro dos materiais magnéticos macios, o aço ao silício é um excelente candidato devido a suas características mecânicas e propriedades magnéticas muito próximas às do ferro puro, mantendo, porém, um índice menor de corrosão do que a substância pura. Todavia, o aço carbono por si só é bom condutor elétrico, busca-se reduzir a condutividade do núcleo magnético dos motores de modo a reduzir as perdas por corrente de Foucault. Por isso, ao invés de somente aço ao carbono, é usado o aço silício, também conhecido por sua vasta aplicação em máquinas elétricas como aço elétrico, ou aço de transformadores (DE OLIVEIRA , J. G. S. M.; 2009).

## 2.5 Motores de passo

O motor de passo movimenta seu eixo, que sofre deslocamentos precisos, sem que seja necessária uma realimentação externa feita por algum dispositivo a ele acoplado. Isso caracteriza um sistema aberto. Essa característica de funcionamento em malha aberta é muito empregada, pois permite a rotação e a parada em pontos exatos. Se, por exemplo, é necessário que o eixo gire meia volta ( $180^\circ$ ), basta fornecer acionamentos adequados e ele obterá deslocamentos com precisão. Normalmente, os motores de passo possuem enrolamentos que, na sua forma mais simples, constituem-se de quatro bobinas dispostas no estator em ângulos de 90 graus, uma em relação a outra (KENJO, T.;1994). Os rotores do motor de passo são divididos em dois tipos: Ímã permanente, e de relutância variável como mostrado na figura 12.

O rotor de ímã permanente permite obter maior força de atração entre o estator e o rotor. Todavia, é tecnologicamente mais difícil obter um grande número de elementos do rotor previamente magnetizados e cuja magnetização seja estável. Por causa disso, o número de passos é geralmente menor nesse tipo de motor.

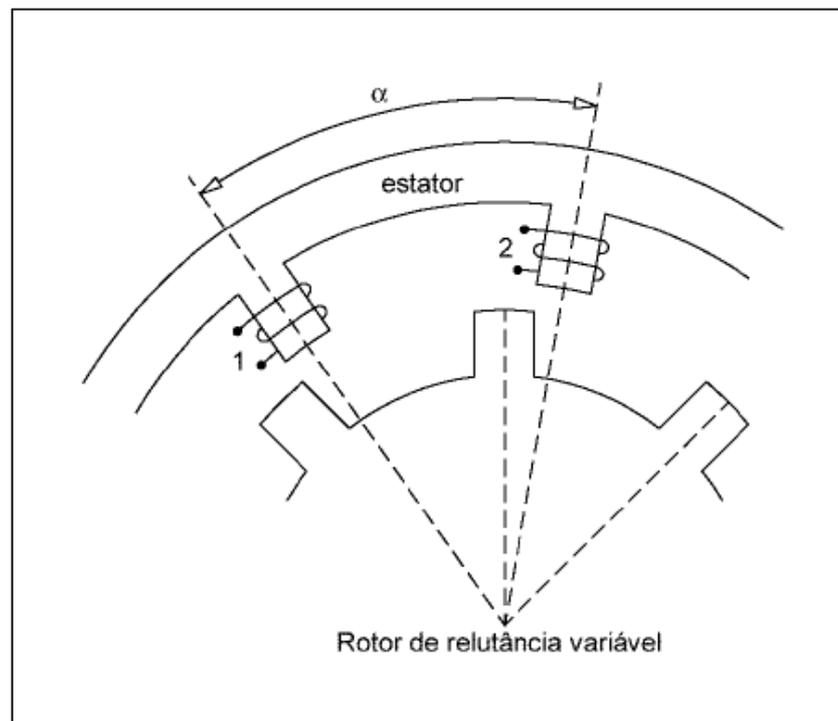


Figura 12 - Motor de passo com rotor de relutância variável (ACARNLEY, P.; 2007)

Existem diversos tipos de motores de passo entre eles o de multi rotores que está apresentado logo abaixo. Nos motores de passo de relutância variável com reforço, a fonte do fluxo magnético é da circulação de corrente nos enrolamentos colocados nos dentes do estator. Esses enrolamentos são excitados em seqüência para incentivar o alinhamento dos conjuntos sucessivos de dentes do estator e rotor, dando ao motor uma ação de passo característica. No motor de relutância variável multi-rotores, é dividido ao longo de seu comprimento axial seções magneticamente isoladas cada uma das quais pode ser acionada por um enrolamentos separados (Fase). Na vista em corte da figura 13, por exemplo, o motor tem três rotores, mas motores com até sete rotores trifásicos já foram fabricados (ACARNLEY, P.; 2007).

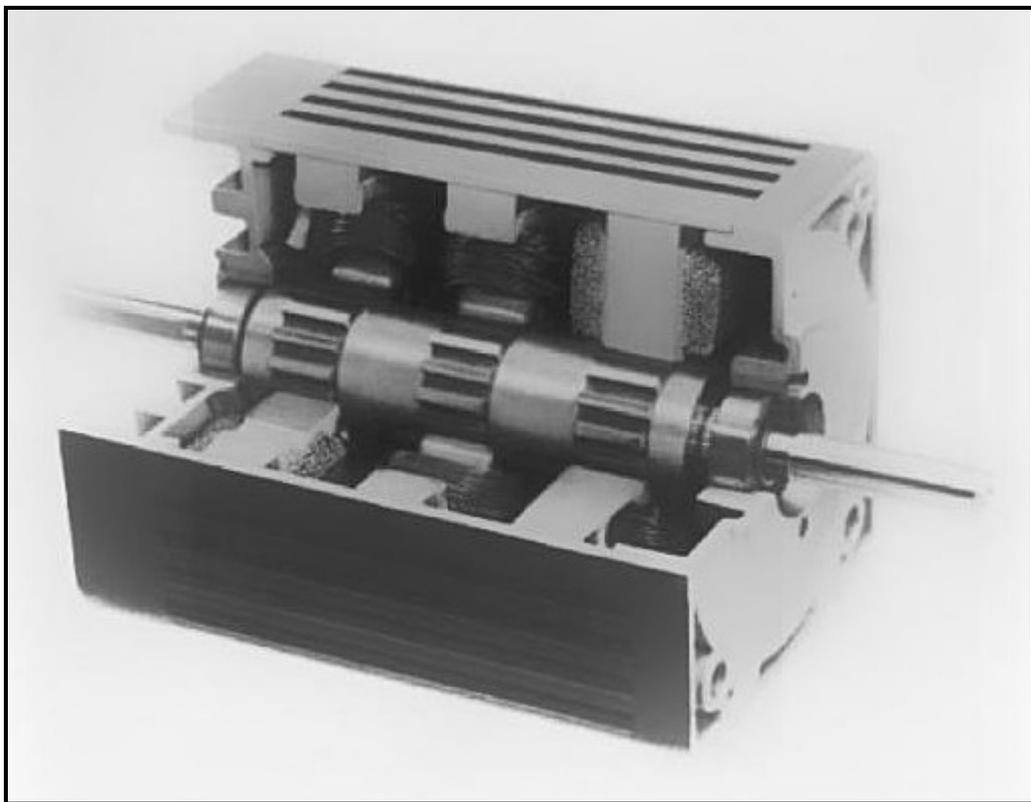


Figura 13 - Motor de Passo de relutância variável trifásico com 3 rotores (FITZGERALD, R.; 2003)

## 2.6 Mini motores aplicados na área médica

Atualmente, muitos dispositivos médicos usam mini motores elétricos como, por exemplo, camas hospitalares, mesas cirúrgicas, macas, guindastes, centrífugas, bombas de infusão, bombas de insulina, máquinas de hemodiálise, compressores, respiradores, scanners, brocas odontológicas, instrumentos de precisão cirúrgicos,

pinças, robô cirúrgico, próteses e dispositivos implantáveis (dispositivos de assistência ventricular, marca-passos, desfibriladores e estimuladores de nervos (GIERAS, J. F.; 2008). Para os dispositivos médicos os motores devem ter alta densidade energética, maior resistência à oxidação e curvas de magnetização estáveis durante longos períodos de tempo. Alguns dos equipamentos citados são mostrados na figura 14.

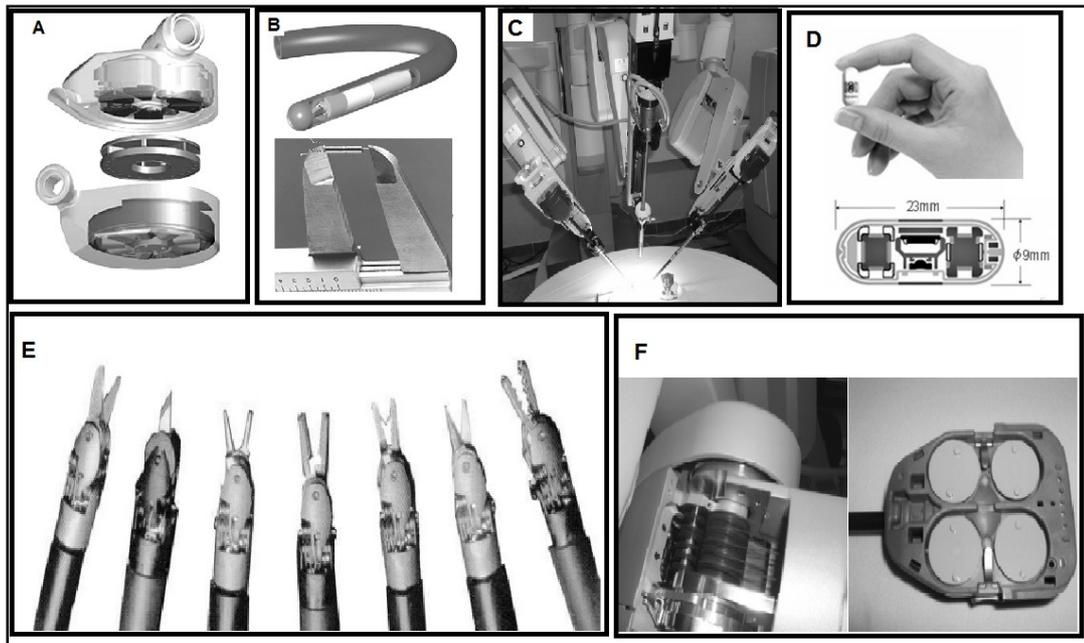


Figura 14 - Equipamentos médicos com uso de mini motores. A) Bomba centrífuga rotativa; B) Cateter de ultrassom motorizado; C) Braços robôs, cirurgia minimamente invasiva; D) Cápsula endoscópica; E) Ferramentas de cirurgia; F) Transmissão mecânica de braço robô e bomba de insulina (GIERAS, J. F.; 2008)

Cirurgia minimamente invasiva, também chamada de cirurgia laparoscópica é uma moderna técnica cirúrgica em que as operações no abdômen são realizadas por meio de pequenas incisões, tipicamente de 5 a 15 mm onde a cirurgia tradicional precisa de incisões maiores, cerca de 20 cm. Os pequenos motores são amplamente utilizados nestes tipos de cirurgias auxiliando e facilitando movimentos precisos dos instrumentos robóticos.

Atualmente, cirurgias, terapias e cuidados de saúde são cada vez mais dependentes da engenharia elétrica e eletrônica. Muitos dispositivos médicos exigem miniaturas de motores elétricos e atuadores com densidade de potência, torque, e força altas. Em termos de miniaturização para obter alta densidade de potência, alta

eficiência, baixa dissipação de calor, confiabilidade, vida e tolerância a falhas, a melhor opção são os motores sem escovas (GIERAS, J. F; 2008).

Os motores de passo possuem aplicabilidade em diversas áreas e pode-se citar alguns exemplos cotidianos como impressoras, sistemas de posicionamento de precisão, robôs e uma vasta gama de aplicações em sistemas de automação.

## **2.7 Introdução ao magnetismo**

A área de magnetismo pode ser resumida como a combinação de três pilares: 1) A origem do magnetismo, ou seja a descoberta da existência dos momentos magnéticos; 2) O entendimento das interações entre os momentos. 3) A mecânica estatística, necessária para descrever as propriedades macroscópicas observáveis. Antes, porém, precisa-se discutir alguns conceitos e definições fundamentais.

### **2.7.1. Propriedades magnéticas de aços para fins elétricos**

Os aços elétricos são utilizados por terem uma qualidade única, indisputada por outros metais, polímeros ou cerâmicas: sua capacidade de amplificar milhares de vezes um campo magnético externamente aplicado. Essa propriedade é o que viabiliza a existência da maioria das máquinas elétricas: motores, geradores, transformadores, etc. Essa propriedade especial, a capacidade de amplificação do campo magnético, é conhecida como permeabilidade magnética. A palavra permeabilidade reflete a idéia que os engenheiros elétricos do século XIX faziam do fenômeno, ou seja, uma medida da facilidade com que o fluxo magnético atravessava o material. Hoje sabe-se que os átomos de ferro de um objeto de aço carregam um magnetismo intrínseco, um "momento magnético atômico", mesmo quando parece desmagnetizado. Chama-se "momento magnético" por que o magnetismo dos átomos vem do movimento de rotação dos elétrons, ou seja, do seu momento angular. Basta que o objeto seja exposto a um campo magnético externo (o campo  $H$ , dado em A/m ou em Oerteds), vindo de um ímã ou de uma corrente elétrica, para que os "momentos magnéticos atômicos" se orientem e induzam, no espaço ao seu redor, um campo magnético muito maior que o campo externamente

aplicado. Assim, a permeabilidade magnética pode ser melhor entendida se vista como um poder amplificador do material utilizado (LANDGRAF, F. J. G.; 2004).

Uma nova família de aços para fins eletromagnéticos foi lançada no mercado internacional nos últimos anos, e já começa a ser utilizada no Brasil: um compósito de pó de ferro revestido com polímero, chamado de SMC (Soft Magnetic Composite) ou pó de ferro microencapsulado. Suas propriedades ainda não cumpriram as promessas teóricas, mas podem encontrar um importante nicho de aplicação se o controle de velocidade por meio de acionamento eletrônico ganhar mais espaço no mercado (JASON, P.; 1998).

O torque de um motor está associado ao campo magnético no entreferro (gap) entre o estator e o rotor. Em torno de 99,9% do campo magnético que existe no entreferro da máquina foi originado no interior do aço, resultado do alinhamento dos "momentos magnéticos atômicos" dos átomos de ferro que o compõe. A intensidade do campo magnético (H) no interior do material é chamada de indução magnética (B), pois esse magnetismo foi "induzido" pelo campo externamente aplicado. Essa propriedade, a indução magnética, é medida em tesla (T). A *permeabilidade magnética* é a relação entre o valor da indução magnética e a intensidade do campo magnético que a criou, e não tem unidade: é o fator de amplificação. A permeabilidade magnética é calculada pela equação 1 (JASON P.; 1998):

$$\mu_p = B / \mu_0 H$$

[1]

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo.

### 2.7.2 Polos magnéticos (m)

São os equivalentes magnéticos das cargas elétricas, conhecidos também como mono pólos magnéticos. Sua existência não é estabelecida experimentalmente apesar de décadas de tentativas de sua detecção. Ocorrem sempre aos pares N e S, e na superfície da amostra. Apesar de não existirem, o conceito é muito útil em cálculos micro magnéticos, ou seja, no cálculo dos campos internos a amostras e fenômenos relacionados como estrutura de domínios. Define-se através do equivalente da lei de Coulomb, pela força (F) entre dois pólos  $m_1$  e  $m_2$ , que ocorrem entre dois magnetos cilíndricos de raio r:

$$\boxed{F = K m_1 m_2 / r^2} \quad k=1/\mu_0 c^2 \text{ no SI )} \quad [2]$$

Um polo cria um campo magnético ao seu redor responsável por exercer a força (F) em outro polo próximo (NOVAK, M. A; 2003). Esta força é proporcional ao campo ou à *intensidade do campo magnético H e a carga do polo*:

$$\boxed{F = m H} \quad [3]$$

### 2.7.3 Dipolos magnéticos ou momentos magnéticos ( $\mu$ )

Os dipolos são reais e pode-se imaginar sua existência aos pares de polos +m e -m situados nas extremidades de um “cilindro” de comprimento l e área A ( $l \gg r$ ):

$$\boxed{\mu = m l} \quad [4]$$

Um momento magnético ( $\mu$ ) situado em um campo  $H$  está sujeito a um torque e daí pode-se deduzir que a energia potencial associada é:

$$\boxed{E = - \mu H} \quad [5]$$

Na prática trabalha-se com amostras macroscópicas compostas de vários momentos magnéticos. A magnetização ( $M$ ) como sendo a soma de todos estes momentos magnéticos elementares dividido pelo volume que ocupa (grandeza intensiva) (NOVAK, M. A, 2003).

$$\boxed{M = \sum \mu_i / V} \quad [6]$$

### 2.7.4. Campo magnético

Também conhecido como campo solenoidal, por ser produzido no laboratório por solenoides. Para um solenoide muito longo em seu centro  $H = \mu_0 n i$ , onde  $n$  é a densidade linear de espiras e  $i$  a corrente que passa pelas espiras. A unidade do

campo magnético no SI é o A/m (Ampere/metro) e sua expressão é conforme a equação 7.

$$\boxed{H = i F m} \quad [7]$$

Utiliza-se um outro campo magnético que é representado pelas conhecidas linhas de força de indução que é a Indução Magnética B, também conhecida por densidade de fluxo, por ser quantificado pelo número de linhas por unidade de área (NOVAK, M. A; 2003). No espaço livre

e nos materiais :  $B = \mu_0 H$  [8]

$$\boxed{\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M})} \quad [9]$$

**B** com unidade do SI em Weber/m<sup>2</sup> ou Tesla.

$$\boxed{\vec{B} = \vec{H} + 4\pi \vec{M}} \quad [10]$$

### 2.7.5 Curva de histerese magnética

Se um material for colocado dentro de uma bobina na qual circula uma corrente elétrica I, um campo magnético H será gerado no interior desta bobina, e o material irá sofrer uma indução magnética B. Se o material for diamagnético ou paramagnético poucas linhas de fluxo magnético serão induzidas e a relação BxH será aproximadamente linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação BxH tem as características de uma curva como mostrada na figura 15. Observa-se que esta curva possui uma histerese sendo portanto denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. Os materiais que possuem características magnéticas semelhantes àquelas mostradas pela curva são conhecidos como materiais magnéticos (KRAUS, J.D.; 1978) (JILES, D.; 1991).

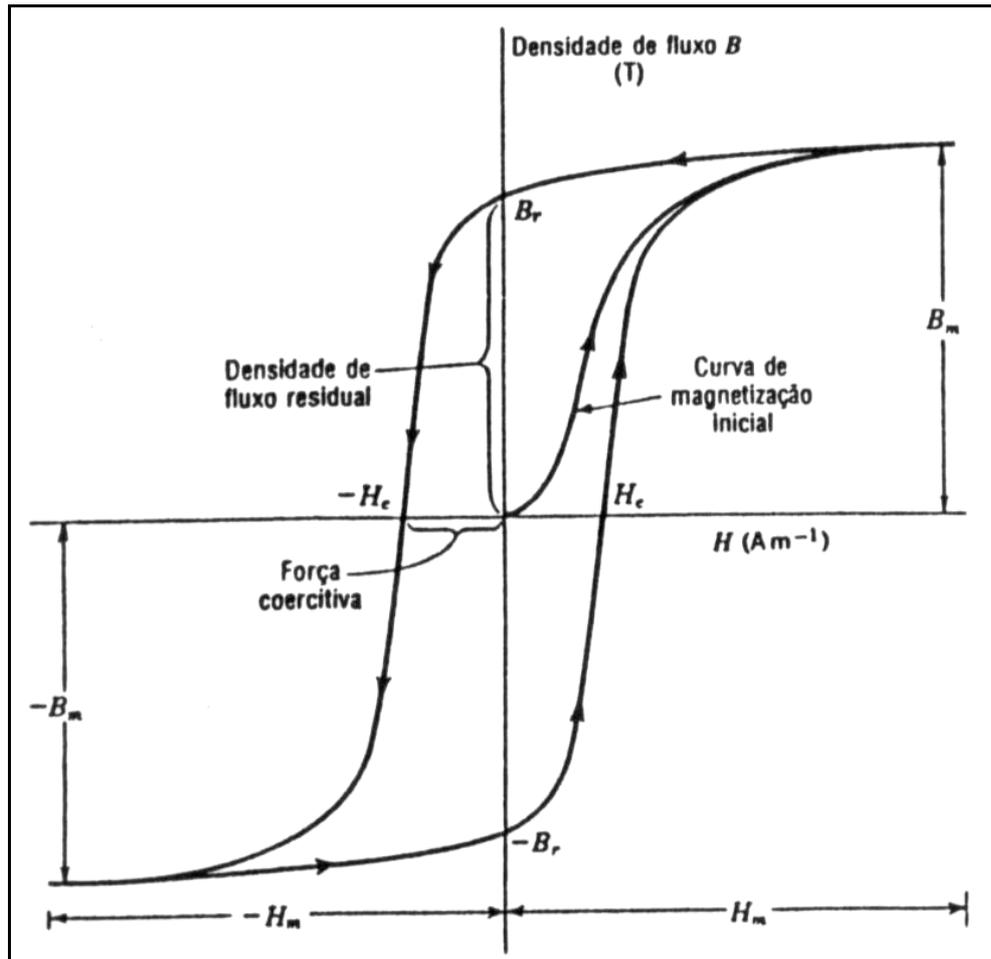


Figura 15 - Curva de histerese para material magnético (KRAUS, J.D.; 1978)

O ponto em que a curva corta o eixo de  $\mathbf{B}$ , no quadrante superior esquerdo, é denominado de *magnetismo remanescente* e representa a indução magnética residual que permanece no material sem campo magnético aplicado ( $\mathbf{H} = 0$ ). O magnetismo remanescente máximo é denominado de *retentividade*  $\mathbf{B}_r$ . O ponto em que a curva corta o eixo de  $\mathbf{H}$  no mesmo quadrante é denominado de *força coercitiva* e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o material ( $\mathbf{B} = 0$ ). O campo desmagnetizante máximo é denominado de *coercitividade*  $\mathbf{H}_c$ . Outro fator importante na identificação dos materiais magnético é o produto energético  $(\bar{\mathbf{B}} \times \bar{\mathbf{H}})_{\max}$  está associado com a densidade de energia armazenada num material magnético.

A figura 16 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um *material magnético duro* também conhecido como ímã permanente (geralmente materiais ferrimagnéticos), e um estreito que representa um *material magnético macio* - geralmente materiais ferromagnéticos (KRAUS, J.D.; 1978) (JILES, D.; 1991).

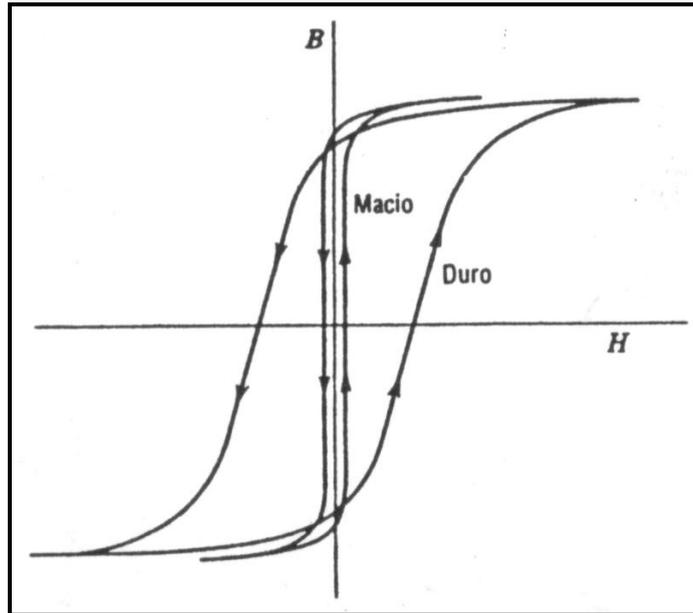


Figura 16 - Ciclo de histerese para materiais magnéticos duro e macio (Kraus, J.D.; 1978.)

## 2.8 Noções de óptica

Foi desenvolvido um mini motor para fins médicos, mais especificamente para um endoscópio, envolve-se noções de óptica e de suas propriedades como refração, reflexão e difração. A óptica é um ramo da física que estuda a luz ou, mais amplamente, a radiação eletromagnética, visível ou não. Ela explica os fenômenos de reflexão, refração e difração, a interação entre a luz e o meio, entre outras coisas. Geralmente estuda fenômenos envolvendo a luz visível, infravermelha, e ultravioleta; entretanto, uma vez que a luz é uma onda eletromagnética, fenômenos análogos acontecem com os raios X, microondas, ondas de rádio, e outras formas de radiação eletromagnética. A óptica pode se enquadrar como uma subdisciplina do eletromagnetismo. Alguns fenômenos ópticos dependem da natureza da luz e, nesse caso, a óptica se relaciona com a mecânica quântica. Segundo o modelo para a luz utilizada, distingue-se entre os seguintes ramos, por ordem crescente de precisão: Óptica geométrica: Trata a luz como um conjunto de raios que cumprem o princípio de Fermat. Utiliza-se no estudo da transmissão da luz por meios homogêneos (lentes, espelhos), como mostrado na figura 17. Óptica ondulatória: Considera a luz como uma onda plana, tendo em conta sua frequência e longitude de onda. Utiliza-se para o estudo da difração e interferência. Óptica eletromagnética:

Considera a luz como uma onda eletromagnética, explicando assim a reflexão e transmissão, e os fenômenos de polarização e anisotrópicos. Óptica quântica ou óptica física: estudo quântico da interação entre as ondas eletromagnéticas e a matéria, no que a dualidade onda-corpúsculo joga um papel crucial.

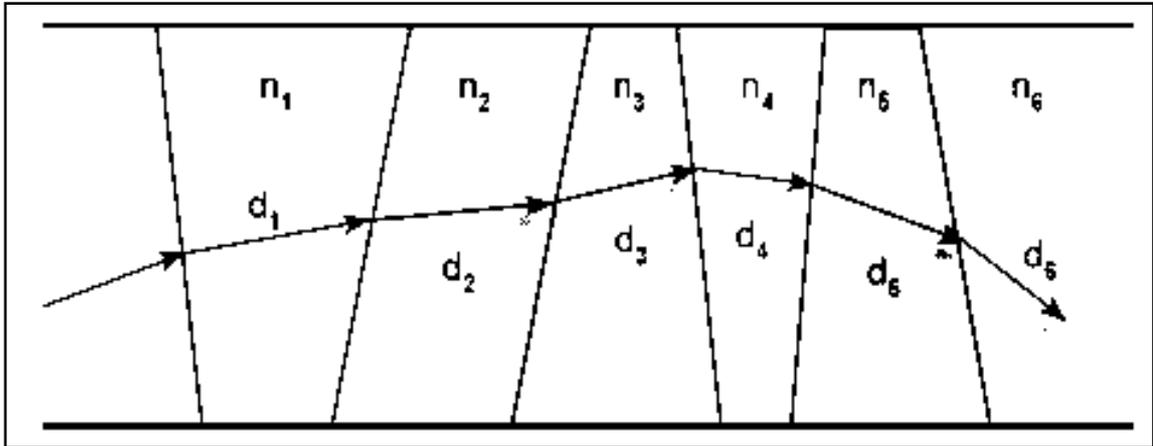


Figura 17 - Raio de luz se propagando numa série de meios com índices de refração diferentes

### 3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo descreve-se com detalhes, materiais utilizados, os testes e processos de fabricação envolvidos e alguns dos seus principais parâmetros, bem como o processo de injeção de pós metálicos, moagem de pós e formação de liga, formulação de carga injetável, compactação e sinterização, entre outros. Nos subcapítulos tem-se ainda os procedimentos gerais do estudo da obtenção de propriedades físicas como resistividade e histerese magnética.

#### 3.1 Materiais

Foram utilizados 3 tipos de pós metálicos, ferro puro, FeNi50 atomizado, e FeNi50 obtido para metalurgia do pó convencional, que foi misturado, moído e ligado por mecâno-síntese. Foi também injetada uma carga comercial de FeNi8, denominada Catamold FN8, para padronizar-se valores comercialmente consumados fazendo testes de reologia e termogravimetria. Os pós foram produzidos pelo processo carbonila (Fe) , atomização (FeNi50) e moagem FeNi50. Estão detalhados nas figuras 18, 19 e 20 com suas composições químicas nas tabelas 3 e 4. Optou-se por estes materiais, pois são materiais magnéticos de baixas perdas e alta permeabilidade. Os materiais sinterizados e compostos pela combinação de micropartículas, estão sendo utilizados na tecnologia de motores de atuação eletromagnética.

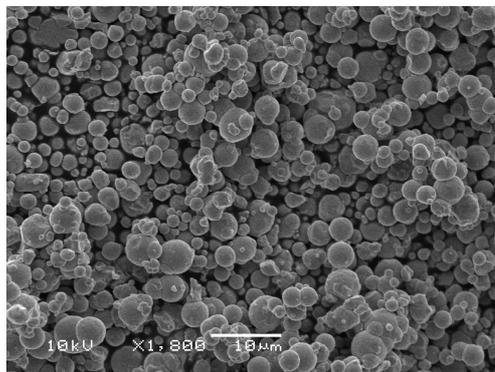


Figura 18 - Microscopia eletrônica do pó de ferro

Com a microscopia eletrônica de varredura do Fe nota-se a forma das partículas arredondadas ou levemente deformadas do processo carbonila.

Tabela 3. Análise química do pó de ferro puro (TCK S.A.,2013)

% peso	
Fe	≥99%
C	≥0,04
O	≥0,35
N	≥0,01
SiO <sub>2</sub>	≥0,07-0,1

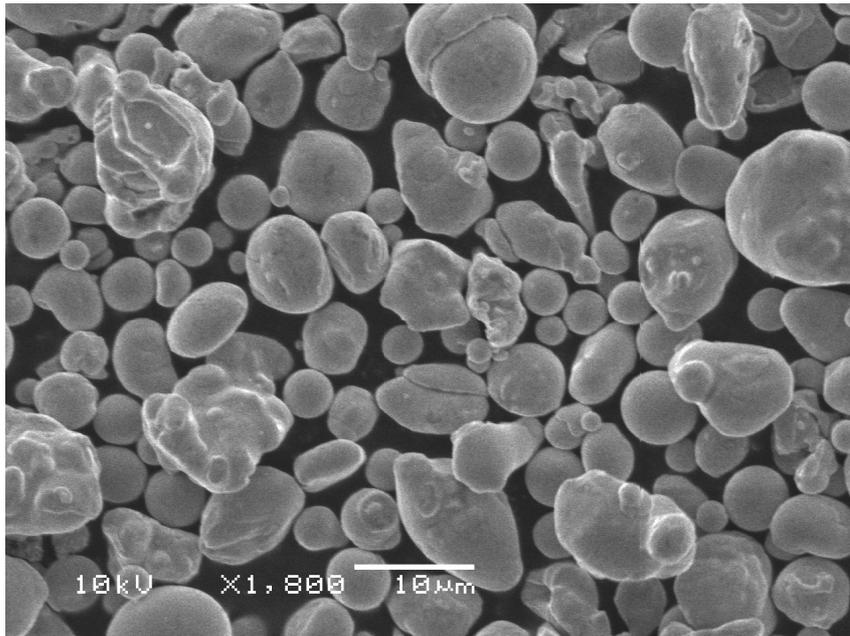


Figura 19 - Microscopia eletrônica do pó de FeNi50 atomizado

O FeNi50 foi adquirido no mercado da empresa Alfa Aesar com grau de pureza de 99,5%, apresentando uma densidade aparente de 3400 kg/m<sup>3</sup> e granulometria média de -325 mesh (0,044 mm) e sua composição química é apresentada na tabela 4:

Tabela 4. Composição química do pó de FeNi50 atomizado (Alfa Aesar)

	Carbono	Níquel	Oxigênio	Ferro
(% peso)	0,01	49,2	0,42	50,79

Também foi analisado em microscopia eletrônica de varredura (MEV) o formato das partículas da liga FeNi50 obtida à partir de mecâno síntese. A imagem está mostrada na figura 20.

Os procedimentos em relação a preparação desses pós e a montagem de cargas estão descritos nos próximos itens e são de suma importância para o sucesso das peças finais desejada.

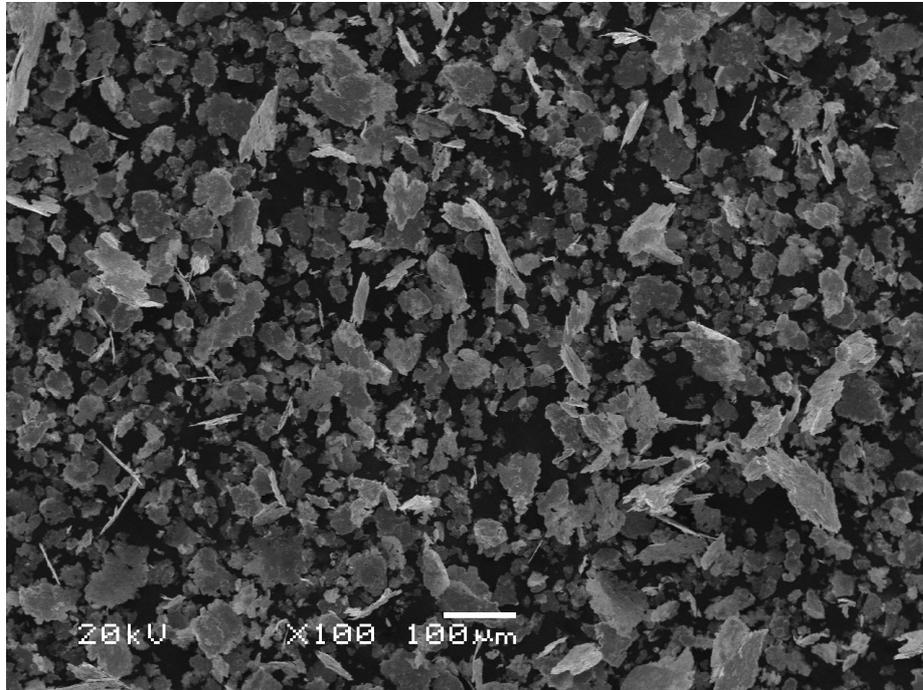


Figura 20 - Microscopia Eletrônica dos Pós de FeNi50 obtido por mecâno síntese

### 3.2 Projeto do Mini Motor

Inicialmente havia a proposta do desenvolvimento de um motor tipo eletrostático para uso endoscópico, mas constatou-se não adequado, pois este necessita de altas tensões de alimentação (de 2kV à 80kV) para seu funcionamento o que o torna de elevada periculosidade na aplicação pretendida.

No presente estudo preocupou-se com a seleção do motor mais adequado ao uso num modelo idealizado de endoscópio. Porém, o mesmo não se limitaria a tal equipamento, e nem tão somente na área médica. À partir da ponderação e análise dos vários tipos de motores foi selecionado como possíveis os seguintes: mini motor de passo; mini motor síncrono de ímã permanente monofásico ou trifásico; mini motor síncrono com rotor de polos salientes; ficando o primeiro como escolhido, com a seguinte topologia mostrada na figura 21, e o detalhamento das peças à serem injetadas nas figuras 22 e 23.

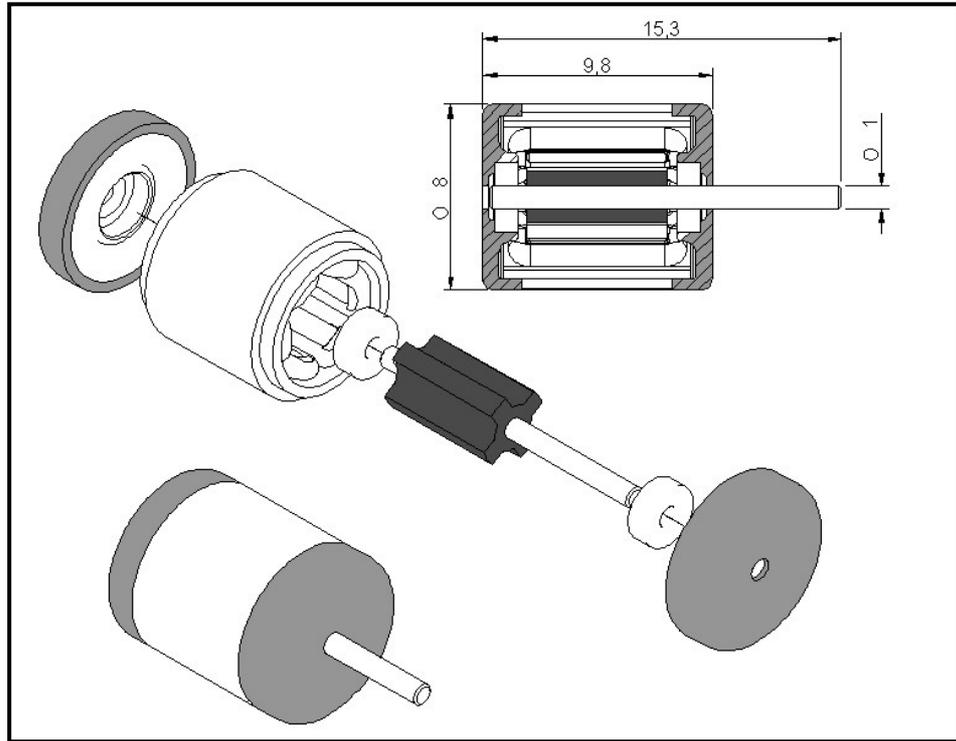


Figura 21 - Geometrias do mini motor e vista explodida da montagem

Os formatos do estator e rotor poderiam ser imaginados também a suas fabricações via metalurgia do pó convencional, pois não apresentam ângulos negativos e nem saliências complexas.

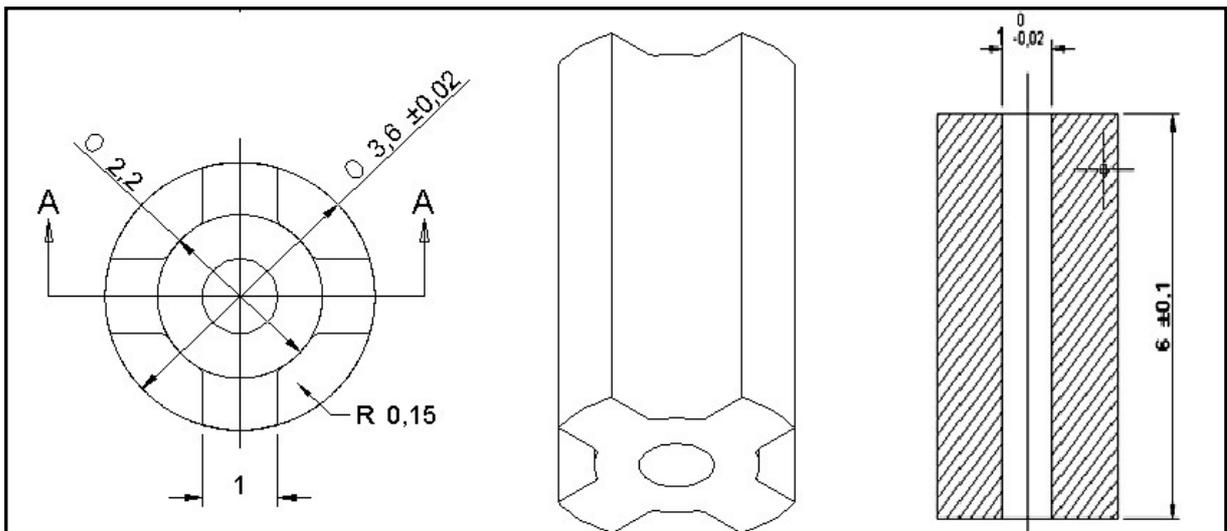


Figura 22 - Medidas e topologia do rotor do mini motor

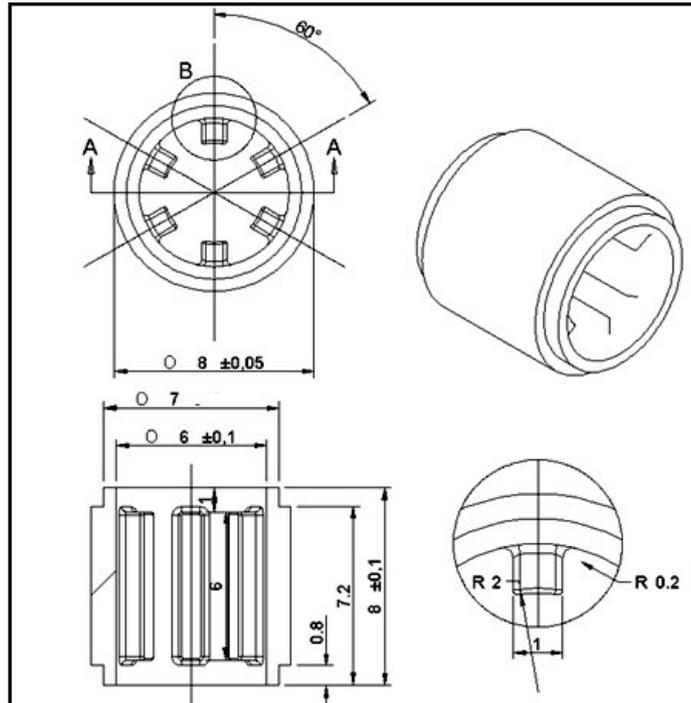


Figura 23 - Medidas e geometrias do estator do mini motor

Os enrolamentos do mini motor foram ligados em estrela (figura 24) com neutro acessível para poder utilizar o controlador apresentado na figura 26.

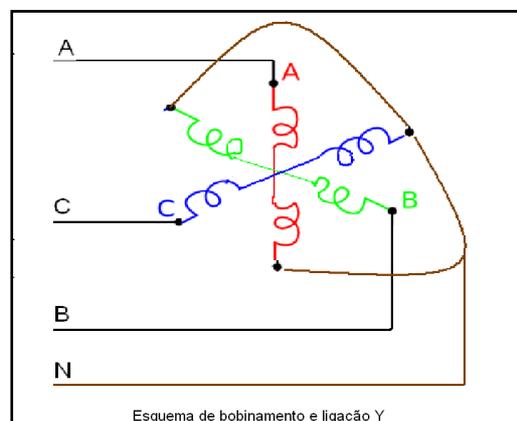


Figura 24 - Desenho esquemático do bobinamento em ligação 'Y'

No capítulo 4 mostra-se os resultados do bobinamento utilizado no motor final e os procedimentos que surtiram efeito na resolução dos problemas desta etapa.

### 3.2.1 Simulação computacional do mini motor

Realizou-se o estudo do funcionamento do mini motor através de simulações utilizando o programa F.E.M.M. 4.1, e como resultado, obteve-se dados mostrando

projeto viável da máquina elétrica. A carcaça (estator e rotor) com o fluxo magnético está mostrado pelos vetores na figura 25.

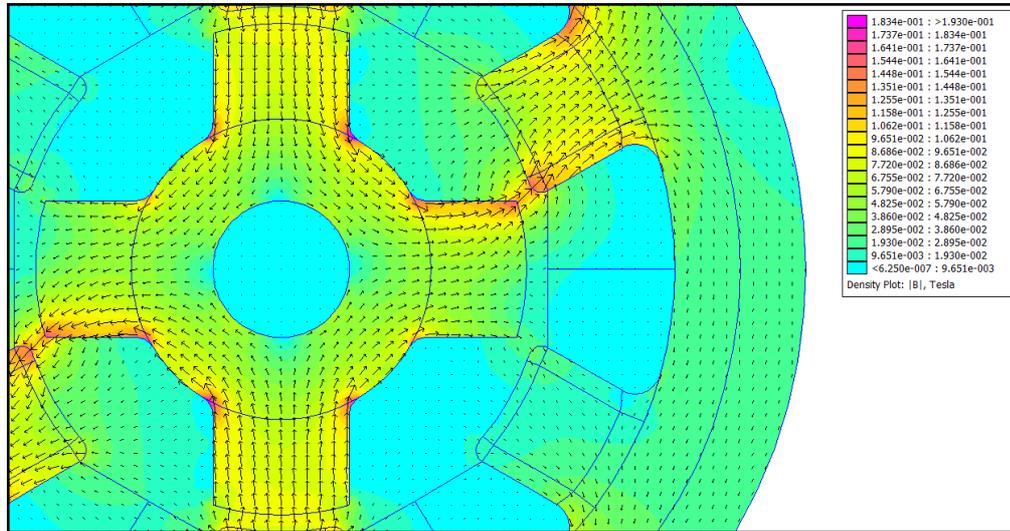


Figura 25 - Fluxo magnético simulado do mini motor

Para a análise do mini motor inicialmente foram definidos dados como corrente elétrica, tensão, diâmetro do fio de cobre a ser utilizado e o material estrutural. Considerou-se inicialmente dois projetos: 1) fio bitola 33 AWG ( $\varnothing = 0,18$  mm), sendo com 25 espiras para cada polo e corrente de 0,51 A e tensão de 20mV e; 2) fio bitola 44 AWG ( $\varnothing = 0,0502$  mm) com 190 espiras por polo com corrente de 0,04 A e tensão de 0,25 V; ambos testes foram simulados com o material ferro puro.

Além de análise vetorial das forças magnéticas também obtém-se valores instantâneos como torque e energia do campo magnético. Os resultados para o projeto 1 foi: Torque =  $29,9 \cdot 10^{-6}$  Nm (torque instantâneo no ângulo de maior toque) e energia do campo magnético  $3,6 \cdot 10^{-8}$  J. Os resultados para o projeto 2 foram: torque =  $15,09 \cdot 10^{-6}$  Nm (torque instantâneo no ângulo de maior torque) e energia do campo magnético =  $1,8 \cdot 10^{-8}$  J.

### 3.2.2 Dispositivo de Acionamento do mini motor de passo

Foi escolhido um sistema de acionamento para o minimotor de passo para atender as intenções de uso, ou seja, um sistema de obtenção de imagens (endoscópio). O circuito elétrico está apresentado na figura 26 e mostra com detalhes todos os componentes envolvidos.

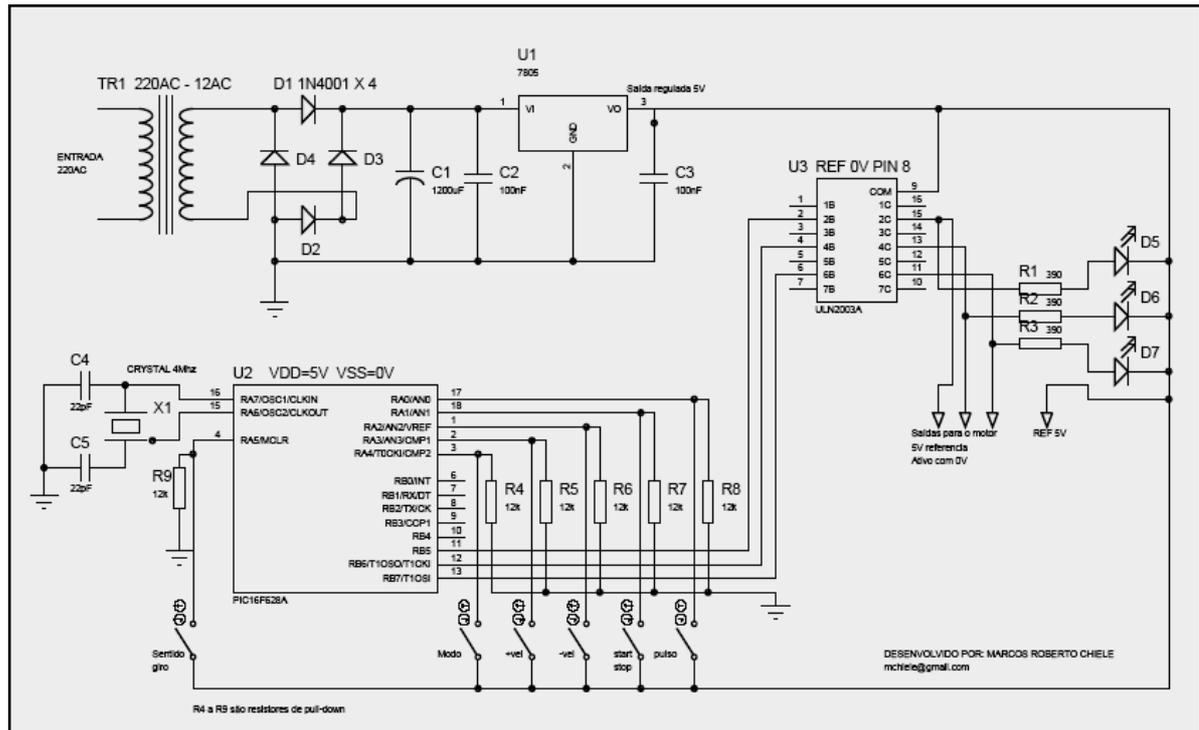


Figura 26 - Esquema elétrico do sistema de acionamento do mini motor

No driver foi utilizado um microprocessador programável, e a seleção de acionamento apresenta as seguintes opções:

- 1) Interruptor de seleção de acionamento contínuo ou pulsante manual.
- 2) Interruptor de deslocamento angular de passo inteiro ou em micropasso.
- 3) Botões para aumento ou diminuição de velocidade de giro.
- 4) Interruptor de reversão de sentido de giro.
- 5) Botão de comando pulsante manual utilizando as funções de passo, micropasso e reversão de sentido de giro.

Algumas características do dispositivo são, alimentação 220V da rede, e saída pulsada de 5V. A tensão de saída deverá ser ajustada para tensão de trabalho do minimotor. Para uma prévia simulação foi utilizado um mini motor síncrono trifásico com características construtivas semelhantes ao do projeto. Na figura 27 tem-se a foto do dispositivo

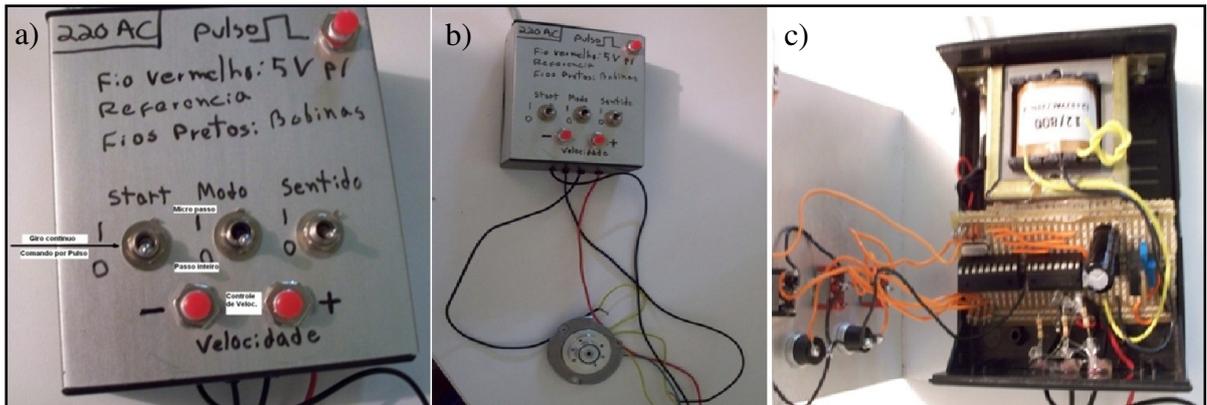


Figura 27 – Dispositivo de acionamento do mini motor de passo

Nos testes todas as possibilidades de movimentos foram simuladas e verificado funcionamento correto na totalidade. Algumas alterações de resistores podem ser feitas para mudanças de tensões, assim o projeto do motor pode ter algumas alterações da tensão elétrica que ainda pode-se utilizar o mesmo driver.

### 3.3 Obtenção de um mini motor preliminar à partir de ferro puro sinterizado

O mini motor foi inicialmente testado com uma versão usinada utilizando pós de ferro puro de granulometria aproximada a  $44 \mu\text{m}$ , e foram compactados em uma matriz cilíndrica e sinterizados a uma temperatura de  $1050^\circ\text{C}$  em atmosfera de argônio durante 1h. Foi utilizada uma prensa manual com capacidade de 30 ton, onde se aplicava uma pressão de 500 MPa sobre a área cilíndrica do CP. Após, a usinagem para forma desejada foi por eletro-erosão.

O bobinamento foi desenvolvido em um sistema manual para os polos do estator. Inicialmente pensou-se em um carretel solto, onde simplesmente enrolava-se o fio de cobre pelo movimento das mãos. Este primeiro modelo não aprovou, pois o grau de organização das espiras era ruim e o espaço tornava-se insuficiente para acomodá-las no interior do mini motor. Então, passou-se para um sistema também manual, mas com eixo e manivela fixos a um garfo (figura 28) onde se obteve um ótimo grau de organização dos fios, porém, com a limitação de fazer uma por vez, e precisar duas espiras interligadas.

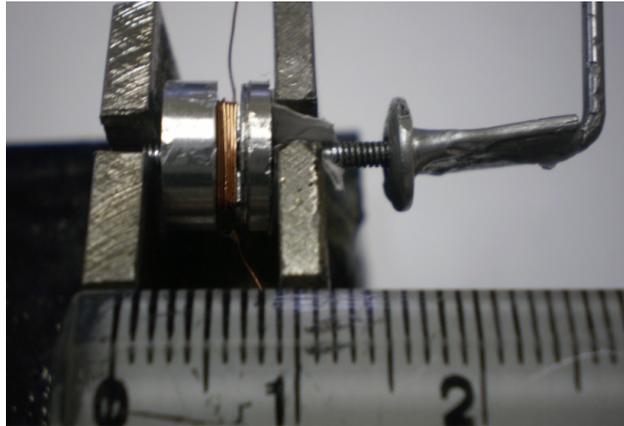


Figura 28 - Sistema manual de bobinamento do mini motor

### 3.3.1 Caracterização do Ferro Puro Sinterizado

Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável, principalmente, para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido a sua baixa resistividade elétrica ( $0,11 \mu\Omega.m$ ). O ferro puro sinterizado de alta densidade ( $7400 \text{ kg/m}^3$ ) possui elevadas indução máxima ( $1,47 \text{ T}$ ) e permeabilidade relativa ( $4700$ ), bem como, baixa coercitividade ( $119 \text{ A/m}$ ). Essas propriedades são essenciais para aplicações de corrente contínua. Os materiais e as condições de processamento necessitam de rígido controle para a obtenção de propriedades adequadas, por exemplo, se tensões são introduzidas ou o nível de pureza diminui, todas as propriedades são afetadas (DIAS, M. M.; 1999) (LENEL, F. V.; 1984) (LALL, C.; 1992). A metalografia do ferro puro sinterizado está na figura 29 e sua revelação seguiu os procedimentos citados no capítulo 3.4.4 somente usando nital 3% para ataque químico.

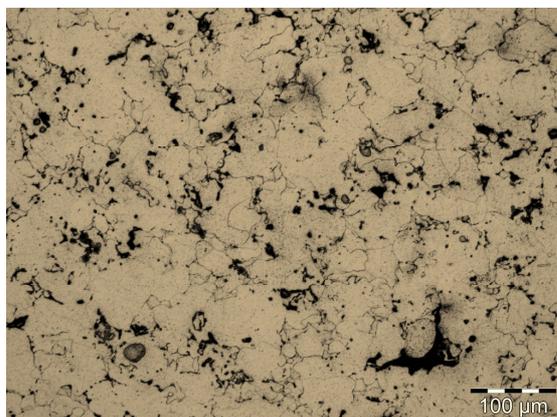


Figura 29 - Metalografia do ferro puro sinterizado (Bittencourt, S.D.; 2012)

A estrutura revelada mostra grãos ferríticos com porosidades inerentes do processo de metalurgia do pó convencional.

### 3.3.2 Preparação do pó de ferro

O pó de ferro foi utilizado na forma fornecida (processo carbonila) passando apenas por uma mistura com 1% do lubrificante (ácido esteárico) necessário para desmoldagem, em um misturador duplo cone. O pó utilizado nesta etapa possuía uma granulometria média de 44  $\mu\text{m}$  e mostrou-se apropriado para o processo de compactação

### 3.3.3 Compactação e sinterização

Para compactação dos cilindros a serem usinados na forma do rotor e estator, e para caracterização de propriedades foram empregadas duas matrizes, uma na forma de anel e outra na forma cilíndrica. Estas matrizes podem ser vistas na figura 30 com suas medidas. A compactação seguiu os mesmos valores do tópico 3.3. Logo após, no processo de sinterização os corpos de prova são aquecidos a uma taxa de 1  $^{\circ}\text{C}/\text{min}$  até a temperatura de 1100  $^{\circ}\text{C}$ , mantendo esta por uma hora. Depois resfriou-se em forno lentamente (Bittencourt, S.D.; 2012).

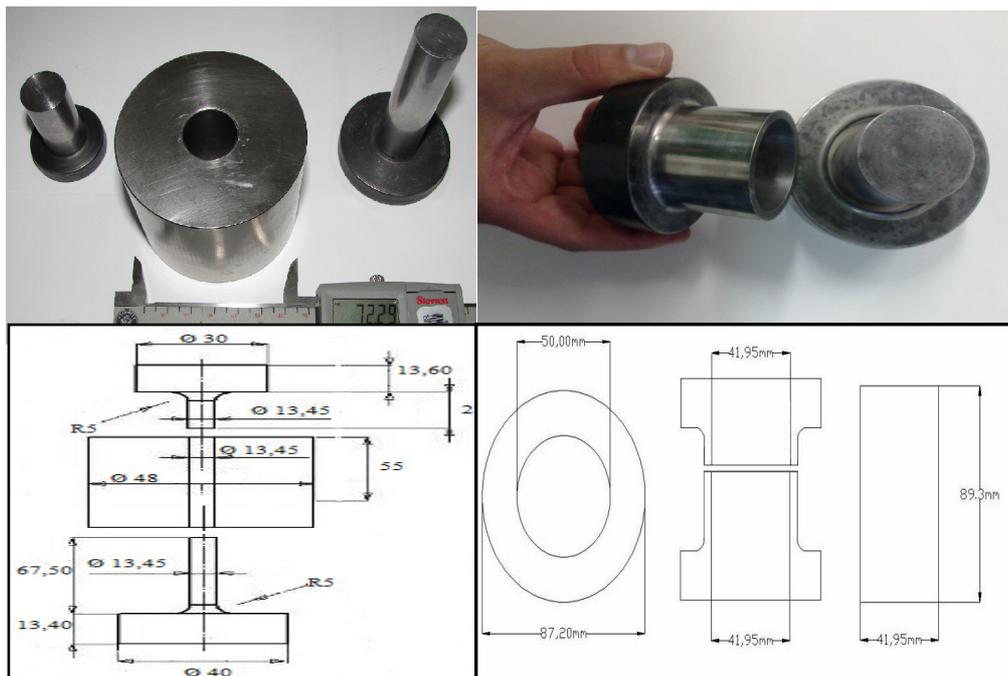


Figura 30 - Matrizes empregadas na compactação de ferro puro e FeNi50

A tabela 5 mostra as densidades dos corpos de prova a verde e após sinterizados.

Tabela 5. Densidades dos corpos de prova de ferro à verde e após sinterizados

Densidade ( $\rho$ ) ( $\text{kg/m}^3$ )	
Verde	Sinterizado
6577	6617
6553	6659
6611	6620
<b>6580</b>	<b>6632</b>

### 3.3.4 Propriedades dos Corpos de Prova

Foram obtidas as propriedades físicas do material, como resistividade elétrica, histerese magnética, curva de magnetização e ainda alguma propriedade mecânica.

#### 3.3.4.1 Resistividade Elétrica

A resistividade dos corpos de prova foi determinada a partir do cálculo da resistência elétrica. Para esta medição utilizou-se multímetro Minipa, modelo ET 2930, equipamento que mede a resistência elétrica. Para a verificação de resistência elétrica por ser muito baixa aplica-se uma tensão no corpo de prova e mede-se a corrente elétrica. Entretanto, utilizou-se um artifício, pois o inverso é mais prático, aplicou-se uma corrente no corpo de prova e mediu-se a tensão (GUSSOW, M.; 1997). O corpo de prova para determinação da resistividade deve ter área da secção transversal bem menor que seu comprimento, para isto, realizou-se um corte na secção do perímetro dos corpos de prova na forma de anel ficando com a secção segundo a figura 31 (BITTENCOURT, S.D.; 2012).

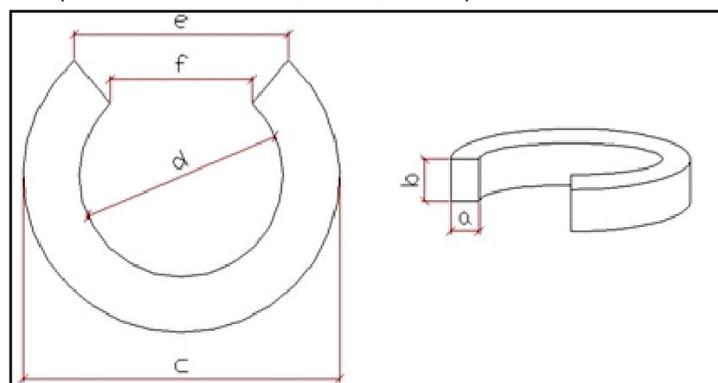


Figura 31 - Seção utilizada nos ensaios de resistividade

A corrente de valor constante foi fornecida por fonte  $V_{cc}$  Jomed, modelo PS – 2403D e mediu-se a tensão sobre o anel com o auxílio de voltímetro de precisão Minipa, modelo ET 2930. A resistividade elétrica foi calculada com a Equação 10, a partir da resistência elétrica dos corpos de prova em forma de anel (BERNARDI, L. O.; 2012).

$$\rho = R \times (l / A) = (V / i) \times (l / A) \quad (10)$$

Considerando:

$\rho$  - Resistividade Elétrica ( $\Omega.m$ )

R – Resistência ( $\Omega$ )

l – Comprimento do Anel (m)

A – Área da Seção Transversal ( $m^2$ )

V – Tensão Elétrica ( V )

i – Corrente Elétrica Aplicada (A)

A Tabela 6 mostra os resultados obtidos.

Tabela 6 – Resistividade ( $\rho$ ) dos corpos de prova de ferro puro  
(BITTENCOURT, S.D.; 2012)

Material	Resistividade $\rho$ ( $\Omega.m$ )
Fe puro	1,56E-07
Fe puro	1,59E-07
Fe puro	1,56E-07
Média	1,57E-07

### 3.3.4.2. Curva de Histerese e Magnetização

Para a obtenção da curva de histerese e magnetização, tendo como base a norma ASTM A773/A 773M-01 onde foram confeccionados os anéis de Rowland (Figura 32), a partir dos corpos de prova compactados e sinterizados. Inicialmente, os anéis obtidos da tabela 5 foram isolados com fita isolante e, em seguida, bobinados com fio de cobre AWG 26 (0,41mm de diâmetro). Posteriormente, foram isolados novamente com fita adesiva e bobinados com fio de cobre AWG 23 (0,57mm de diâmetro). Os enrolamentos foram padronizados para 270 espiras no

secundário e 160 espiras no primário. Os anéis de Rowland foram, então, conectados ao equipamento traçador de histerese.



Figura 32 – Anéis de Rowland prontos para ensaios magnéticos

O equipamento e o programa para a aquisição dos dados (campo magnético e indução magnética) utilizados foram o Global Mag, modelo TLMP-FLX-D, sendo também o programa chamado Global Mag. Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5A e frequência de 0,05Hz. Os dados de entrada para a obtenção da curva de histerese foram:

- ( $N_1$ ) Densidade de espiras do primário (nº de voltas/m).
- ( $N_2$ ) Número de espiras do secundário.
- (R) Resistência do fio de cobre (padrão – 0,2  $\Omega$ ).
- (A) Área secção Transversal ( $m^2$ ).
- ( $\rho$ ) Densidade do material ( $kg/m^3$ ).

### 3.3.5 Usinagem de acabamento dos núcleos

- A eletroerosão a fio é um método para cortar materiais condutivos com um fino eletrodo que segue um caminho programado.
- Há ausência de forças de corte e tensões comuns dos processos convencionais de usinagem, pois não há contato físico entre o fio e

peça; rápida dissipação de calor, pelo fato de que a peça permanece submersa em fluido refrigerante.

- A dureza do material da peça não tem efeito negativo na velocidade de corte.

Para a fabricação do mini motor por este processo, as peças do rotor e do estator partiram de um material sinterizado com forma cilíndrica de diâmetro 10,0 mm. O mesmo passou pelo processo de torneamento CNC, onde usinou-se os topos e os rebaixos, e após o torneamento um pré-furo tanto no material do estator como no do rotor para a passagem do fio de latão. Fio esse que é usado na máquina de Eletroerosão Corte a fio, Fanuc modelo Alpha 01D, que pelo processo de destruição de partículas metálicas por meio de descargas elétricas. Dessa forma é feita a usinagem do perfil interno e externo do rotor e também o perfil interno do estator. Perfis extremamente complexos, com baixíssima rugosidade e de altíssima precisão são construídos da mesma forma. A figura 33 mostra as peças usinadas por eletroerosão a fio.

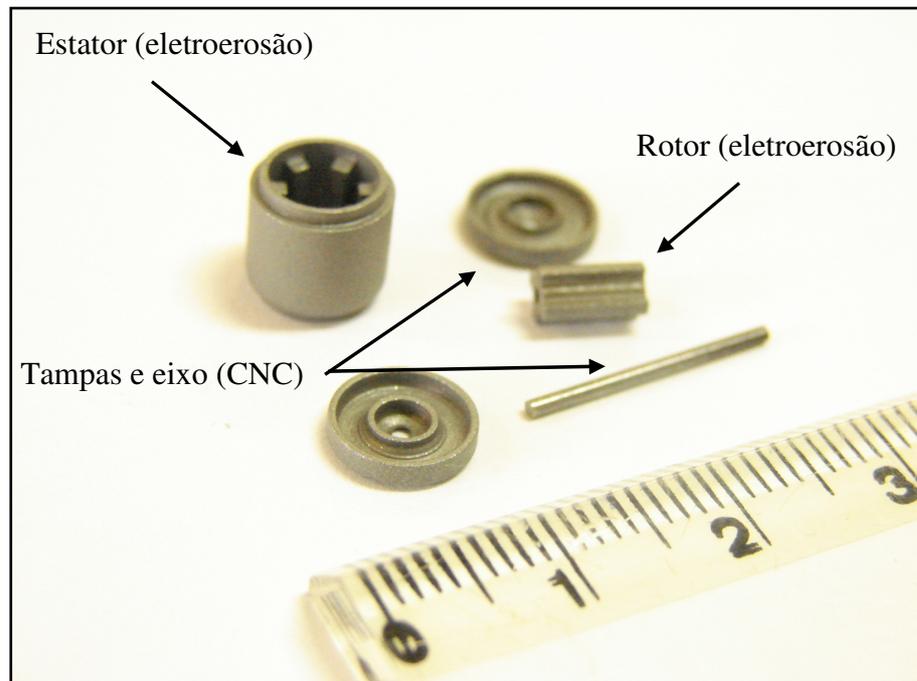


Figura 33 - Mini motor usinado por eletro-erosão a fio

### 3.3.6 Montagem do Mini Motor obtido por MP

Após a bobinagem o minimotor foi fechado com duas tampas (aparecem na figura 33) de material também sinterizado e o eixo do rotor mancalizado nas

mesmas, com bucha polimérica. Optou-se por buchas, pois não seria possível o ajuste de um mini rolamento ou a confecção destes seriam de valor muito elevado. Uma das tampas foi furada para a passagem dos fios e estes conectados em um sistema de imobilização (placa de circuito) para com a manipulação não quebrarem.

### **3.4 Liga FeNi50 a partir da M/P**

Por se tratar de análises em torno de pós metálicos, além do processo de injeção, foram coletados os dados com o material pela rota da metalurgia do pó convencional. Na compactação utilizou-se a liga ferro-níquel obtida por mecâno síntese e procedeu-se da seguinte maneira:

- 1- Mistura-se a liga com 1% de ácido esteárico
- 2- Compactação
- 3- Sinterização
- 4- Análise micrográfica
- 5- Levantamento de curvas de histerese magnética
- 6- Verificação de resistividade elétrica

#### **3.4.1 Moagem da liga FeNi50**

Inicialmente foram processados pós elementares de FeNi50 de granulometria inicial de 44  $\mu\text{m}$ , onde foram levados ao moinho atritor por 4 horas em uma frequência de giro de 800 rpm com esferas de aço inox de diâmetro de 4,1 mm imersos em etanol, e após, sua granulometria foi medida por difração de raios laser (figura 34). Após esse procedimento obteve-se a comprovação da eficiência do método pela diminuição significativa das partículas, porém com formas de flocos, o que permitiu utilizá-lo por MP convencional, pois para injeção não é uma boa morfologia.

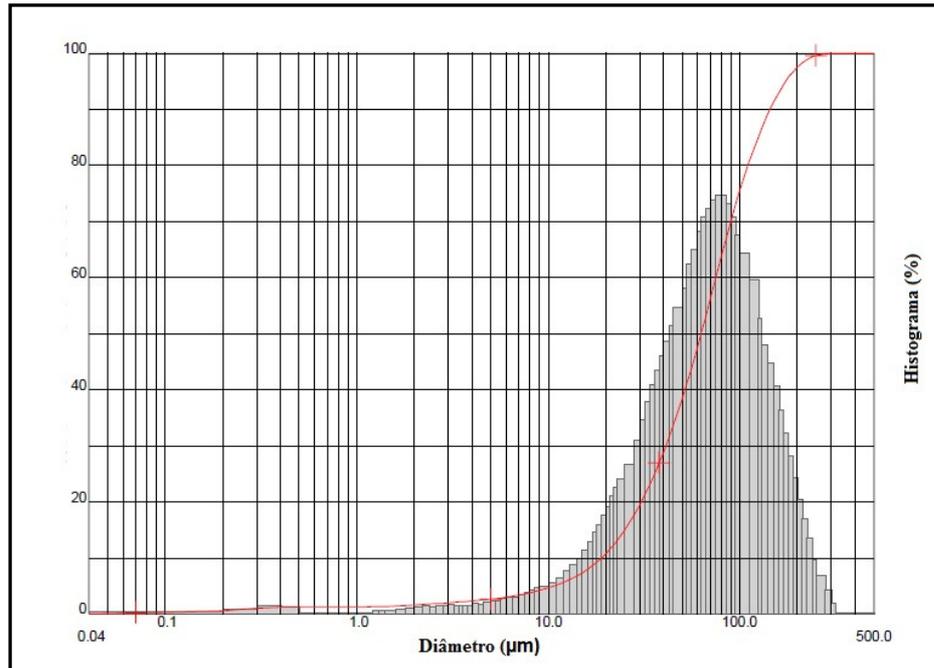


Figura 34 - Distribuição granulométrica de pós de FeNi50

A liga ferro-níquel também foi testada por um tempo anterior de 6 horas para formação de liga por mecânico síntese do qual foram analisadas, após serem compactadas. A sua microestrutura, propriedades elétricas e magnéticas estão apresentados no capítulo resultados.

### 3.4.2 Granulometrias

Nas análises granulométricas seguiu-se a seguinte ordem: com pequena quantidade de pó obteve-se uma mistura em etanol e adicionou-se em um granulômetro de raios laser marca Cilas modelo 1064 onde a mistura é submetida aos raios e através dos padrões de difração obtem-se a distribuição de tamanhos de partículas. Entre os principais cuidados para minimizar erros está em amostrar diversas vezes obtendo dados probabilísticos e também amostrar uma parte mais homogênea.

### 3.4.3 Microscopia Eletrônica de Varredura

Para a análise no microscópio eletrônico, os pós foram colados em fitas de carbono auto adesiva dupla face, onde as mesmas eram fixadas sob suporte de alumínio, como mostrado na figura 35.



Figura 35 - Amostras de pós metálicos prontos para observação em M.E.V.

O equipamento utilizado foi o da marca Jeol modelo JSM-6510 com programa de navegação nomeado SEM Navigator.

#### **3.4.4 Metalografias**

Na preparação metalográfica, usou-se técnica convencional de acordo com a norma ABNT NBR 13284/1985. Inicialmente os corpos de prova foram embutidos em baquelite e passaram pelas lixas desde granulometrias 100 até 1000 e polimentos com alumina de 5  $\mu\text{m}$  em feltro. Logo após, com a superfície totalmente livre de imperfeições, foram utilizados 2 tipos de ataques químicos ambos por imersão a frio sendo rapidamente secos com algodão e soprador térmico, logo observados e fotografados em um microscópio óptico metalúrgico invertido marca OLYMPUS DP modelo GX-51. Os dois reagentes utilizados foram o MARBLE (4 g de  $\text{CuSO}_4$  +20 mL de HCl + 20 mL de água destilada) e NITAL 3% (3 mL  $\text{HNO}_3$  Concentrado + 100 mL de álcool etílico).

#### **3.4.5 Compactação da Liga FeNi50**

No processo de compactação do FeNi50 foi utilizada uma prensa manual com capacidade de 300 kN e aplicou-se sobre os pós uma pressão de aproximadamente 500 MPa em uma matriz já apresentada anteriormente na figura 30. O pó metálico foi adicionado a cavidade com 3% de ácido esteárico, por apresentar dificuldade na extração. Foi utilizado o total preenchimento da matriz como dosagem. As dimensões médias dos anéis obtidos (10 amostras) estão apresentados na tabela 7.

Tabela 7 Medidas médias dos corpos de prova para ensaios magnéticos a) antes de sinterizados b) depois de sinterizados

a) Amostra - FeNi50%	Características
Diâmetro Externo (mm)	50,11
Diâmetro Interno (mm)	41,88
Altura (mm)	3,88
Massa (g)	13,739
Volume (cm <sup>3</sup> )	2,259
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	6,080

b) Amostra FeNi50%	Características
Diâmetro Externo (mm)	47,55
Diâmetro Interno (mm)	39,56
Altura (mm)	3,61
Massa ( g)	13,688
Volume (cm <sup>3</sup> )	1,973
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	6,930

### 3.4.6 Sinterização da liga FeNi50

Na sinterização das amostras tanto de ferro puro como Fe50Ni (compactados) utilizou-se o patamar de temperatura de 1150 °C sendo tempos de 115 minutos para rampa e 40 minutos de patamar. Estão representados no gráfico da figura 36 onde mostra a taxa de aquecimento foi de 10 °C/min.

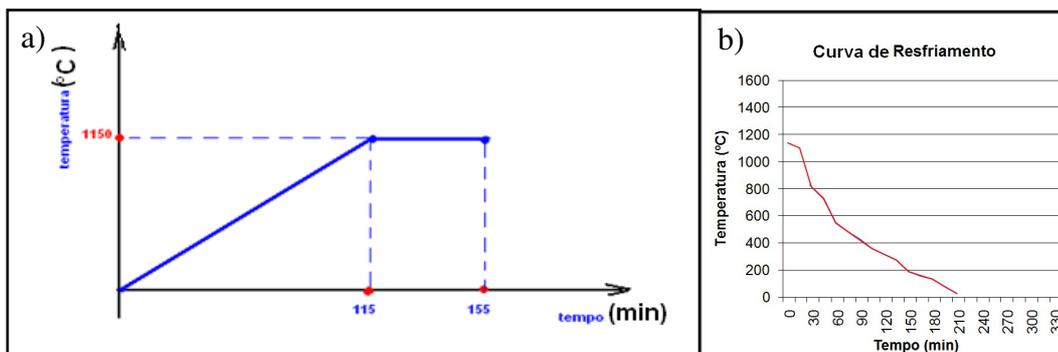


Figura 36 - Curvas da sinterização a) Aquecimento e patamar b) Resfriamento

O forno elétrico utilizado foi um do tipo tubular vertical marca Sanchis com controlador modelo N1100. As amostras após submetidas a temperatura de 1150 C durante 40 min, em atmosfera de gás marrom (25% H<sub>2</sub> + 75%N<sub>2</sub>), resfriaram ao forno com a taxa variável entre 5 e 10 %/min apresentada também no gráfico da figura 36.

### 3.5 Características técnicas da Injetora Utilizada

Para o processo de injeção foi utilizada a máquina injetora marca Arburg modelo Allrouder 170s 125 -30 e possui unidade de fechamento com disposição horizontal. Deve ser utilizada somente se estiver hde acordo com sua designação de uso. A segurança se faz com o conhecimento e consciência dos usuários, tendo conhecimento do perigo de acordo com seu manual. Os equipamentos mínimos de proteção pessoal requerido são: Luvas contra calor, protetor ocular, calçados de proteção e proteção respiratória. A sala terá que possuir valores específicos de temperatura e umidade numa faixa entre 25 à 55 C e com umidade relativa do ar mínima de 20% a máxima de 80%. A figura 37 mostra uma sequência de um ciclo de injeção e alguns ícones de trabalho.

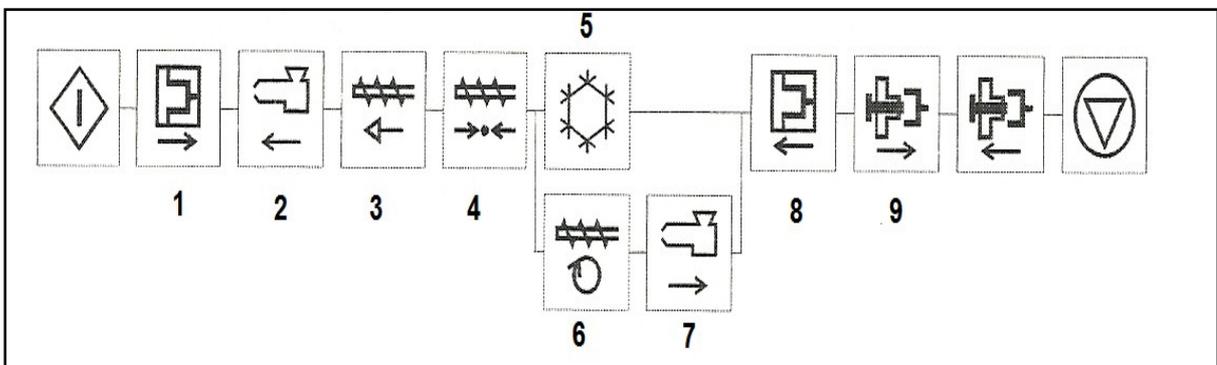


Figura 37 - Ciclo básico de injeção da máquina utilizada

Esta máquina é específica para injeção de pequenas peças tendo as seguintes cotas de sua placa de fixação de molde conforme a figura 38.

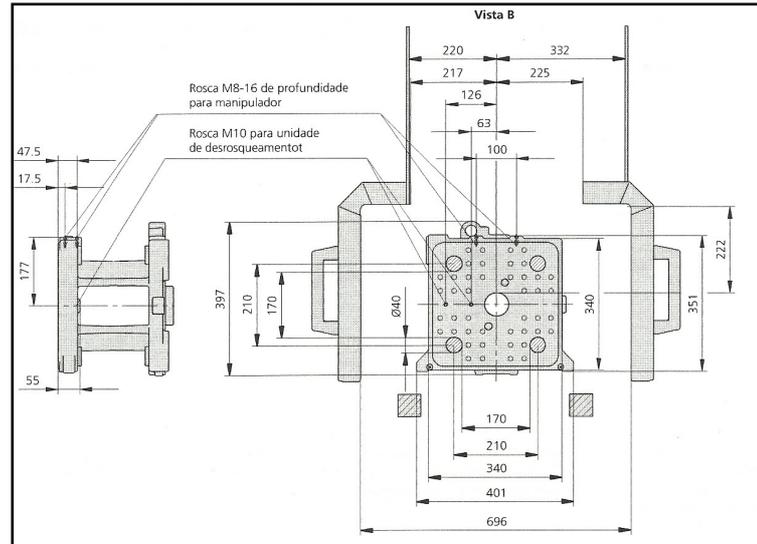


Figura 38 - Placa de fixação do molde (Parte móvel)

Os dados técnicos do equipamento estão apresentados na tabela 8.

Tabela 8 Dados técnicos do equipamento utilizado

<b>Unidade de Fechamento</b>		
Força de Fechamento	kN máx.	125
força de deslocamento	kN máx.	16
Força de abertura	kN máx.	10
Percurso de abertura	mm máx	200
Altura de montagem do molde	mm min	150
Distância entre placas	mm máx	350
Distância entre colunas	mm	170
Placas de fixação	mm	275 x 275
Força do Extrator	kN máx.	16
Percurso do extrator	mm máx	75
<b>Unidade de Injeção</b>		
Diâmetro da rosca	Mm	18
Comprimento da rosca	C/D	17,7
Percurso da rosca	mm máx	60
Volume do cilindro	cm <sup>3</sup> máx	15,3
Peso de injeção	g máx	14
Pressão de injeção	bar máx	2200
Torque da rosca	Nm máx	60
Força do encosto do bico	kN	40

### 3.5.1 Desenvolvimento da matriz dos corpos de prova

Foi desenvolvida e desenhada uma matriz que tivesse as quatro cavidades desejadas para a análise das propriedades, sendo um cilindro, um anel, uma barra retangular e um CP de formato próprio para ensaio de tração. As geometrias dos canais bem como a forma das cavidades estão apresentadas no desenho das figuras 39 e 40.

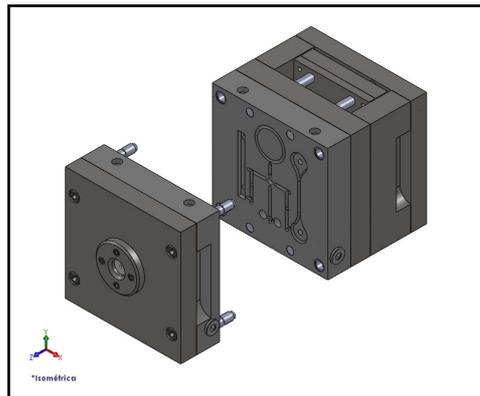


Figura 39 - Matriz dos corpos de prova injetados

Pode-se melhor observar o sistema da matriz na figura 43 e nota-se o canal central de seleção de cavidades com algumas dimensões dos corpos de provas.

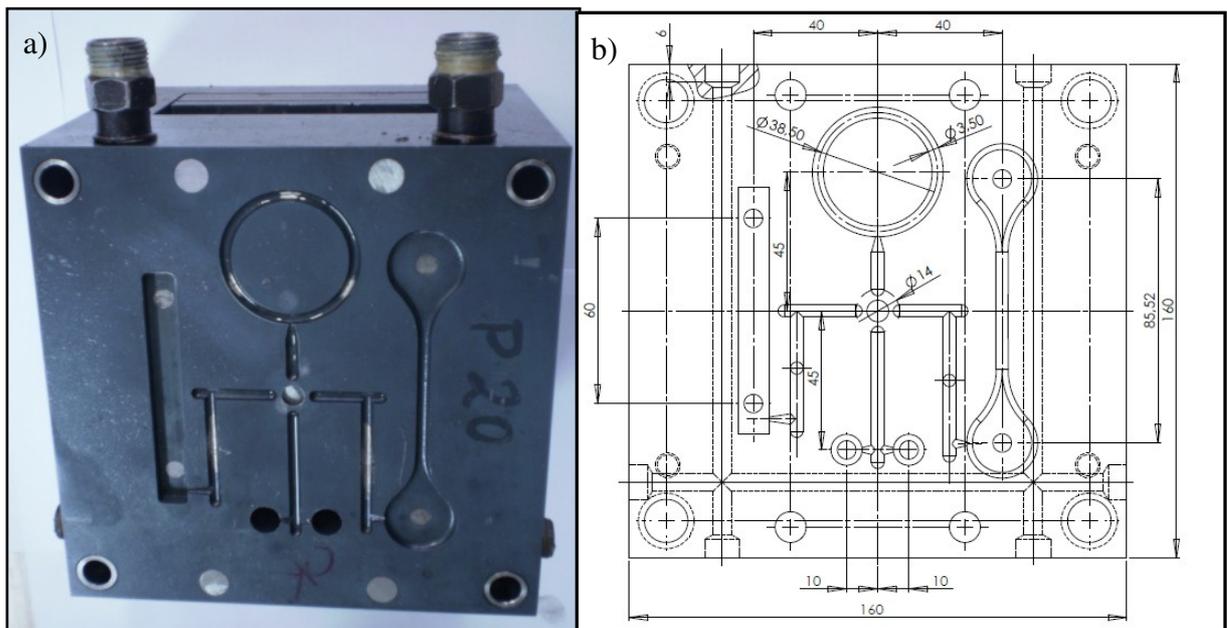


Figura 40 - Desenho e detalhamento da matriz de injeção a) Matriz dos CPs  
b) Desenho e medidas

### 3.6 Cargas preliminares da liga FeNi50 injetada

Foram preparadas diversas formulações de cargas preliminares com FeNi50 para análise dos equipamentos e testes de preenchimento de cavidades e também ajuste de parâmetros. Estas foram testadas fazendo o passo a passo do processo de injeção. Não obteve-se corpos de prova que apresentassem características desejadas, pois no momento da extração química já apresentavam problemas como desmoronamento e bolhas. Também na sinterização obteve-se resultados ruins e peças distorcidas, porém ajustou-se valores de taxa de aquecimento e temperatura de sinterização para evitar tais problemas.

As matrizes utilizadas nas diversas injeções preliminares foram diretamente projetadas por empresa de usinagem que atua somente fazendo moldes para indústria e pesquisas universitárias. Nota-se os detalhes conforme a figura 41. A figura 41-a mostra uma vista em perspectiva do formato dos corpos de prova injetados, onde se pode visualizar quatro cilindros e dois anéis. A figura 41-b mostra a forma da cavidade da matriz.

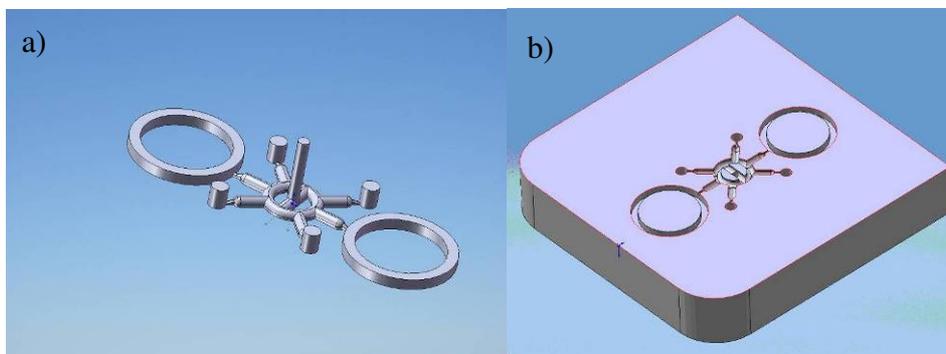


Figura 41 – Matriz para corpos de prova a) Formato dos corpos de prova ; b) Forma da cavidade da matriz

#### 3.6.1 Mistura da carga injetável preliminar e formulada

As cargas injetáveis, mais comumente chamadas de “Feedstock”, foram produzidas como segue. Utilizou-se de um misturador tipo horizontal com pás em “Z”(figura 42), com aquecimento e atmosfera controlados, foram misturados os componentes na sequência: polímeros (EVA e PP) com o pó metálico e levados a aproximadamente 180 °C esperando sua total liquefação e, ainda, adiciona-se cera parafina. Depois de 1 hora de processamento vazou-se o conteúdo em uma bandeja

a temperatura ambiente obtendo uma massa dura e única com aparência próxima a de um polímero como também mostrado na figura 42 e logo mais foi peletizada em um moinho de facas onde foi adicionada em pedaços menores e processada durante 30 minutos:

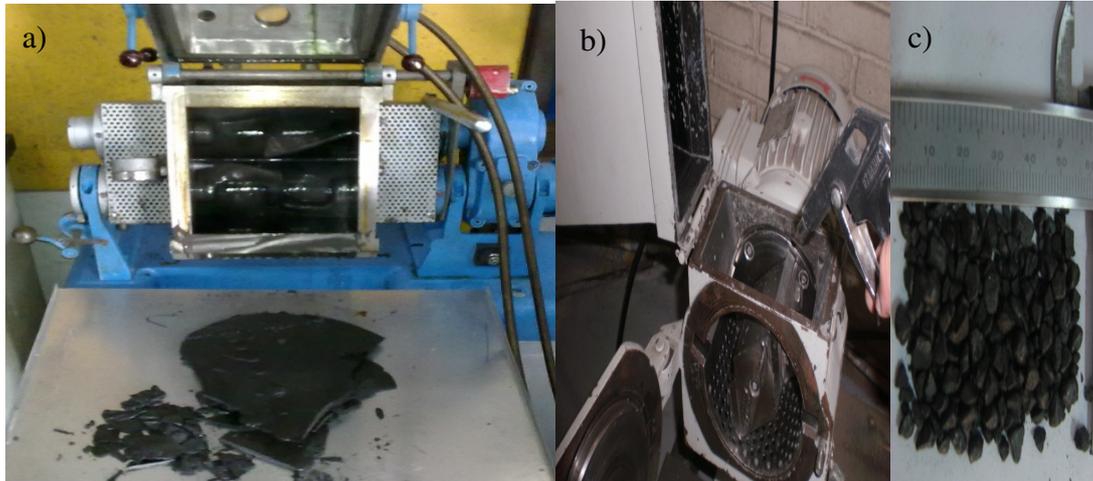


Figura 42 – Mistura de carga injetável preliminar a) Misturador com pás em Z b) moinho de facas c) carga injetável peletizado

Após análise das primeiras misturas chegou-se a conclusão não ser adequado o processo neste misturador citado, com quantidades menores que 2 kg de pó. Não houve cisalhamento necessário para homogeneização e efetivação da mistura. Foi então solucionado utilizando-se um misturador com câmara pequena, de um reômetro de torque apresentado na figura 43.

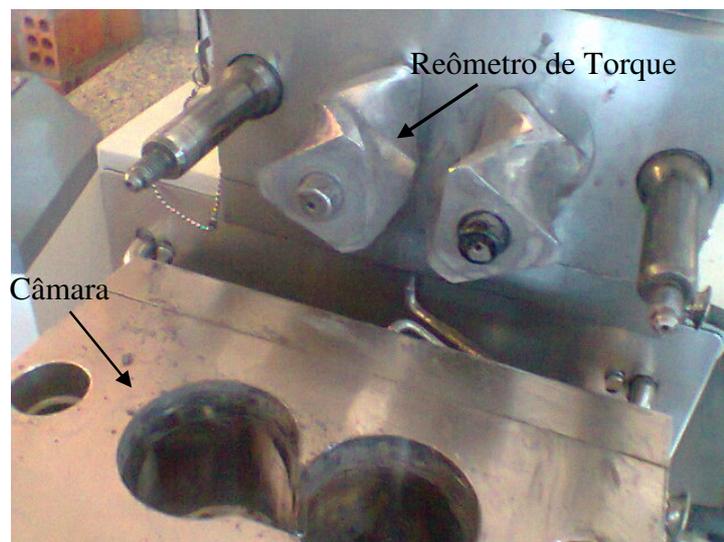


Figura 43 - Câmara de mistura de um reômetro de torque

Com as medidas da tabela 9 preenchia-se a câmara do reômetro pela qual programava-se a temperatura de 120°C e rotação de 80RPM. Após uma hora de processamento já era o suficiente para homogeneização e a consumação da carga.

Tabela 9 Medidas utilizadas na carga final formulada

	Massa (g)	Percentual (%)
Pó metálico FeNi50	182	91
PE baixa densidade	11,7	5,80
Parafina	5,76	2,88
Ácido esteárico	0,54	0,27

As misturas efetivas foram testadas reológica e termicamente, e são parte dos resultados mostrados a seguir no capítulo 4.

### 3.6.2 Parâmetros preliminares de injeção

Foram definidos dados de injeção preliminares e utilizou-se de pós de ferro-níquel. Também fez-se cálculos de volume e dosagem conforme a cavidade a ser utilizada. Nos testes preliminares os principais parâmetros utilizados na injeção dos anéis foram:

Temperatura de injeção: 180°C

Temperatura do molde: 100°C

Tempo total do ciclo: 8,2 s

Pressão Recalque: 250 bar

Velocidade injeção: 13 cm<sup>3</sup>/s

Volume CP anel: 5,9 cm<sup>3</sup>

### 3.6.3 Injeção dos Corpos de Prova

Para a injeção dos corpos de prova procedeu-se da seguinte maneira: liga-se a injetora juntamente com seu sistema de refrigeração (circulação de água), logo aciona-se a bomba de seu sistema hidráulico e ajusta-se as temperaturas do cilindro de injeção aguardando o aquecimento ao ponto desejado. Após a liberação do próprio equipamento pela chegada aos valores ajustados, inseriu-se o carregamento da carga injetável, fazendo o preenchimento do cilindro. Com a antecipada programação apenas pressiona-se o botão de partida fazendo que a máquina tome o ciclo pré-ajustado. São muitas as variáveis que podem indicar sucesso ou não nas

peças, então faz-se necessário avaliar os primeiros CPs para conferir se os valores pré ajustados não precisam de formatação.

### 3.7 Corpos de prova a partir de uma carga comercial

Uma carga adquirida da empresa Basf denominada Catamold FN8 cuja especificações aparecem na tabela 10, foi testada e injetada para referência de dados do equipamento e utilizada como forma de comparação de materiais, em termos de propriedades como viscosidade e temperaturas de transformação. Por problemas diversos nas formulações das cargas injetáveis à serem utilizadas. Fez-se a utilização do equipamento de injeção e testes subsequentes da obtenção das propriedades necessárias à serem obtidas com pós de FeNi50.

Tabela 10 . Dados da carga injetável comercial

<b>Atmosfera de Sinterização</b>	<b>C %</b>	<b>Ni %</b>	<b>Fe %</b>
H <sub>2</sub>	≤0.1	7.5–8.5	Balance
N <sub>2</sub>	0.4–0.6	7.5–8.5	Balance

#### 3.7.1 Topologia dos corpos de prova injetados

Os corpos de prova injetados tiveram suas topologias definidas, a partir das definições das propriedades a serem obtidas. As cavidades podem ser selecionadas através de um canal de injeção móvel. A figura 44 mostra as geometrias aproximadas dos corpos de prova.



Figura 44 - Geometrias dos Corpos de provas injetados

### **3.7.2 Injeção, Extração e Sinterização dos corpos de prova**

As amostras feitas a partir das cargas preliminares, foram injetadas em uma máquina da marca Himaco modelo Apta 80 onde os principais parâmetros utilizados foram: - Temperaturas do cilindro de injeção (zonas e bico) 140 °C;

- Pressão de injeção 40 MPa;
- Temperatura do molde 90 °C;

Os CPs, a partir da carga comercial, foram obtidos em um forno contínuo onde passavam por uma esteira em uma região de temperatura aproximada a 120 °C em atmosfera de 3% de ácido nítrico num processo chamado de extração catalítica. Tal processo é realizado em reatores especiais que asseguram as taxas apropriadas de alimentação de ácido e taxas de fluxo apropriadas de nitrogênio. O ligante remanescente, por exemplo, o a polietileno, provê resistência ao componente (peça) para manuseio após a extração. Este polímero remanescente é degradado no ciclo de sinterização. Seguindo então para uma zona com temperatura de 1150 °C.

### **3.7.3 Propriedades Físicas dos Corpos de Prova**

Assim como o material compactado (ferro puro e FeNi50) as propriedades físicas (magnéticas e elétricas) necessárias, foram obtidas a partir de um injetado comercial de FeNi8 por caráter da utilização dos equipamentos necessários e também para saber características de uma carga comercial e aproximar assim propriedades reológicas ótimas para o processo. Também a análise térmica serviu no desenvolvimento pois descobria-se o número de componentes utilizados, pois esta análise apresenta patamares de degradação de cada material.

### **3.7.4 Análise Térmica (TGA / DSC)**

Para análise e otimização das cargas a serem desenvolvidas, obteve-se as características térmicas do material comercial testado, que já possui certificação e grandes produções consumadas. O equipamento utilizado é da marca TA Instruments, analisador termogravimétrico modelo Q600 e realiza simultaneamente os dois ensaios TGA e DSC. A curva da figura 45 mostra a perda de massa em função do acréscimo da temperatura (TGA) da amostra em questão.

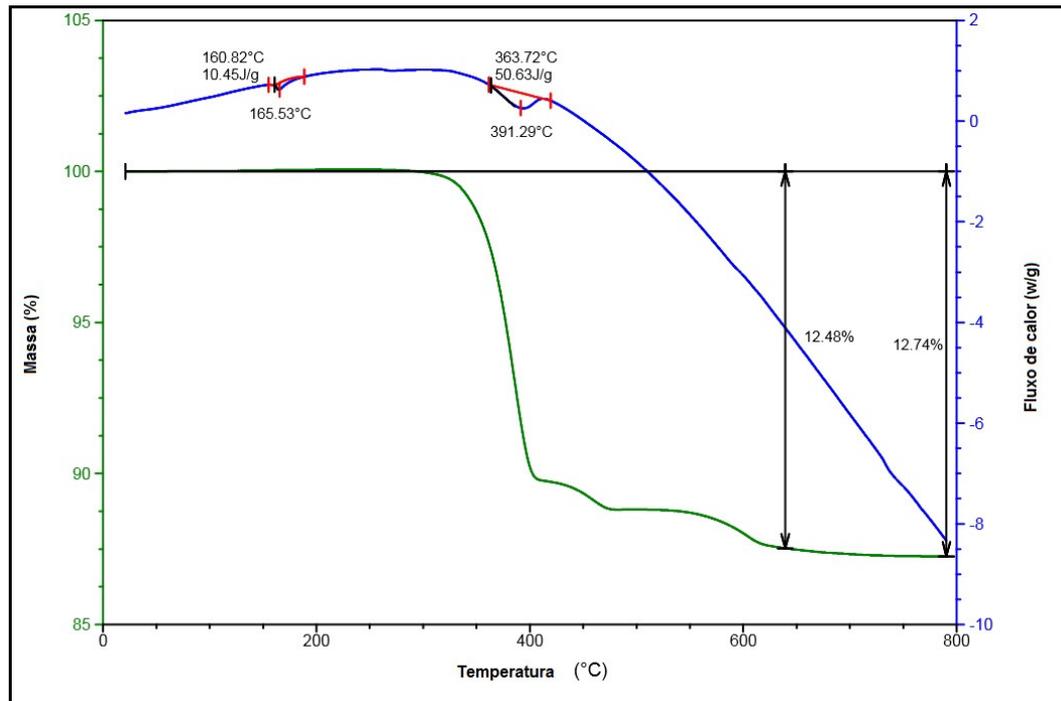


Figura 45 - TGA/ DSC de amostra FeNi8 comercial

### 3.7.5 Propriedades Reológicas

Pode-se verificar os dados reológicos da carga comercial conforme a figura 46 que segue, e assim observando valores a serem buscados no desenvolvimento de novas cargas.

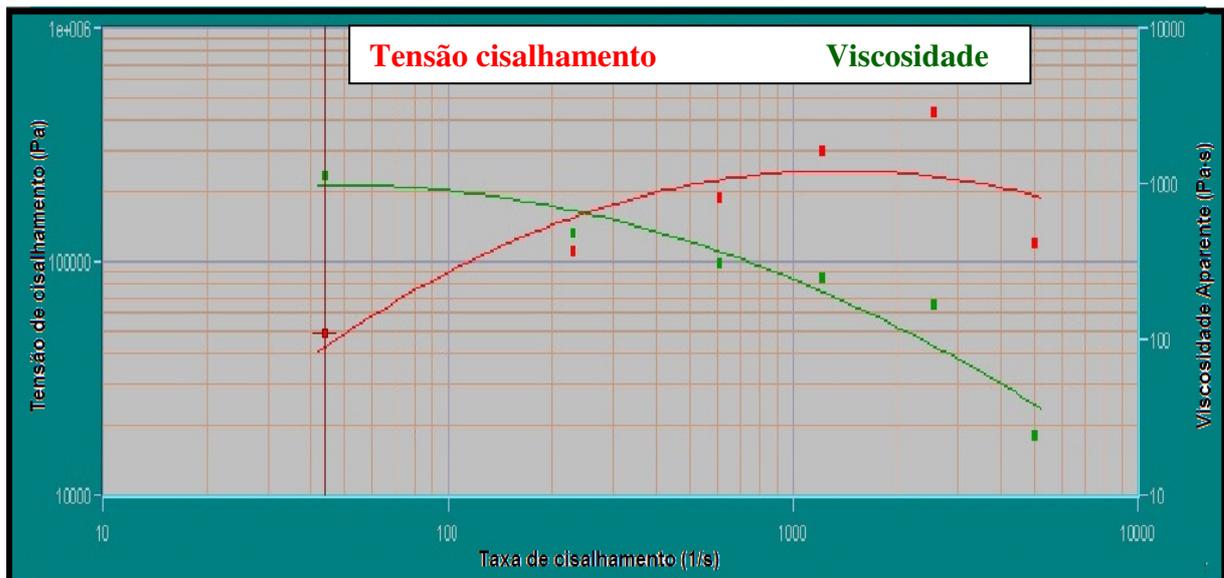


Figura 46 - Viscosidade x tensão de cisalhamento x taxa de cisalhamento do FeNi8

### 3.8 Simulações de injeção

Foi simulado um processo de injeção com as cavidades propostas. Esta é uma análise por elementos finitos e os resultados gráficos mostram diversos parâmetros do processo, entre eles, melhor ponto do canal principal e tempo de injeção que estão apresentados na figura 47.

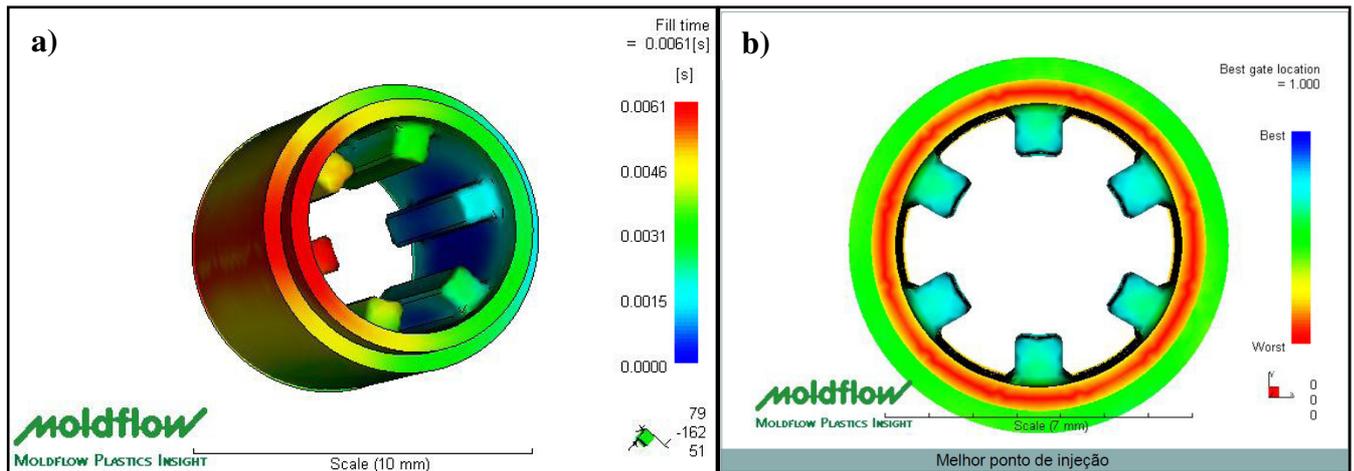


Figura 47 – Simulações de Injeção a) Tempo de injeção do estator

b) melhor ponto do canal principal

Após obter a carga de injeção com os pós micrométricos, testes de reologia e análise térmica foram realizados para entrar com dados reais no programa. Desta forma saber quanto a prática se aproxima da teoria, ou ver para futuras simulações qual o grau de confiança dos testes.

### 3.9 Idealização de um dispositivo endoscópico

A partir de algumas considerações retiradas dos tradicionais endoscópios e de estudos de pesquisadores sobre o tema, foi idealizado um dispositivo para inspeção visual de partes como laringe, faringe, traqueia e estômago. Foi construída uma maquete, apresentada na figura 48, juntamente com o dispositivo físico de acionamento já apresentado anteriormente (3.2.2) com o esquema elétrico.

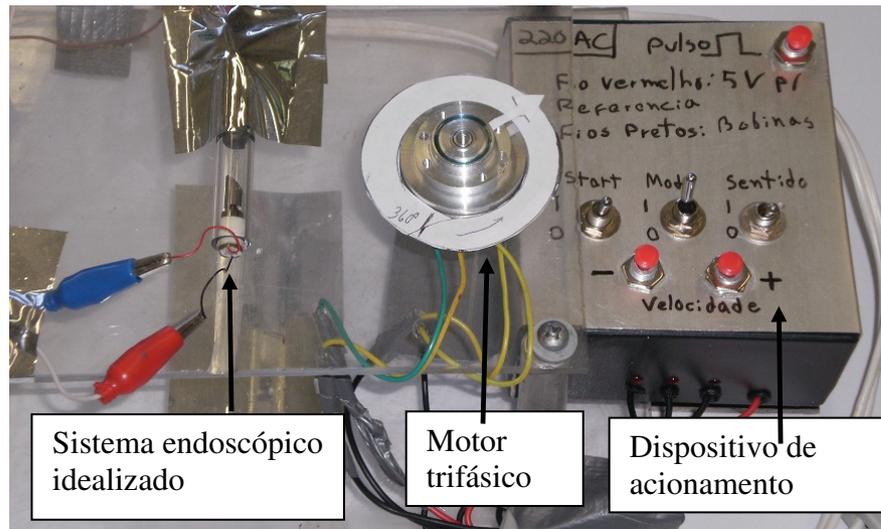


Figura 48 - Maquete do sistema endoscópico idealizado

O dispositivo da figura 48 visa conduzir a luz através de um prisma espelhado que será rotacionado com o funcionamento do mini motor de passo, e que devido ao acionamento aos passos pode-se obter imagens de  $360^\circ$  ao redor do tubo endoscópico sem precisar girar fisicamente dentro do paciente ou retirá-lo e introduzi-lo novamente. Ainda no mesmo dispositivo, nota-se o acionamento elétrico desenvolvido ligado a um motor trifásico com ligação semelhante ao mini motor desenvolvido.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo foram avaliados todos os resultados de montagem e funcionamento do mini motor. Também, dados obtidos nas moagens de pós metálicos e formação de liga. Ainda trabalhou-se com preparação de uma carga injetável. Por fim analisou-se, principalmente as propriedades magnéticas e elétricas dos materiais empregados.

### 4.1 Mini motor preliminar a partir do ferro puro sinterizado

Inicialmente, o ferro puro foi utilizado pelo método convencional de metalurgia do pó, ou seja, compactação e sinterização a partir de pós de dimensões micrométricas ( $\sim 10\mu\text{m}$ ). Houve comparação dos materiais injetados. Também, foi avaliado qual teve melhores propriedades para o fim desejado. Através de difração de raios laser obteve-se a granulometria inicial do ferro utilizado, conforme figura 49.

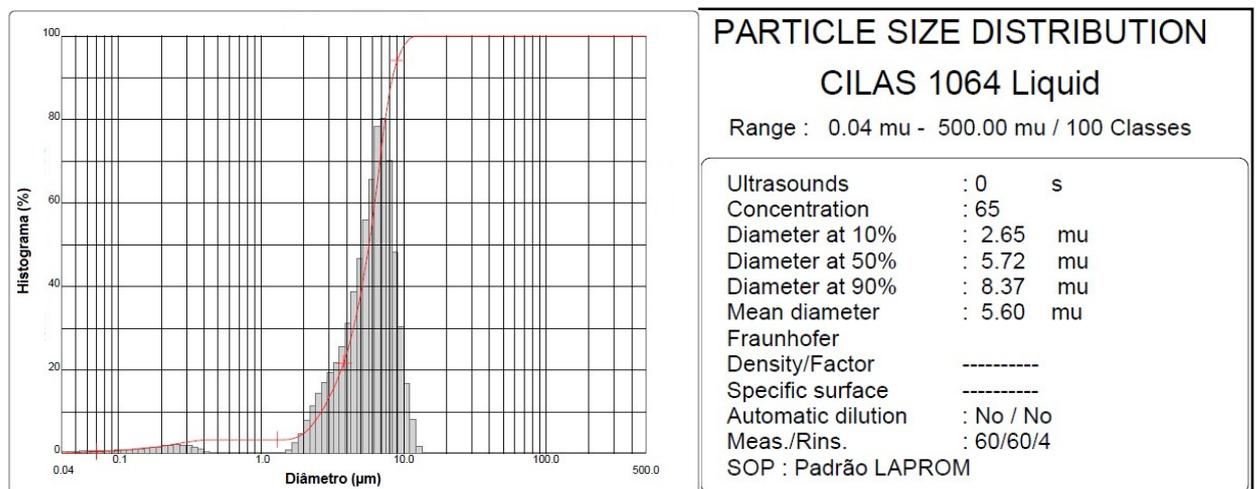


Figura 49 - Distribuição granulométrica do pó de Ferro puro

Após o procedimento de eletro-erosão a fio nos cilindros sinterizados, obtiveram-se as geometrias do projeto conforme mostrado na figura 50. O bobinamento utilizado foi manual com o auxílio do dispositivo mostrado na figura 28 onde utilizou-se o fio AWG 33 com um número de espiras de 10 voltas.

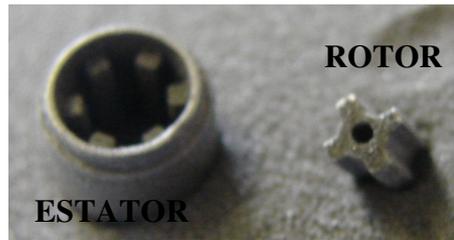


Figura 50 - Rotor e estator do mini motor preliminar

Houve um problema de projeto. Os dentes do estator eram retangulares e possuíam cantos vivos, o que ocasionava a quebra do isolamento gerando curto com a carcaça em alguma das espiras. Os testes mostraram que podia-se mover o rotor, mas só parcialmente, pois o curto mencionado em alguns dos polos fazia a máquina elétrica parar. Pode-se ver o bobinamento parcial na figura 51.



Figura 51 - Mini motor preliminar com bobinamento

Os resultados da compactação, as densidades dos cilindros e anéis estão mostrados na tabela 5 (pag. 53), e figura 52 mostra o mini motor em escala 3x maior sendo testado sobre uma placa, com seu driver montado.



Figura 52 - Teste do Mini motor preliminar em escala

## 4.2 Liga FeNi50 a partir da MP convencional

Após o processo de formação de liga (amostragens de 5h e 25h de processamento em moinho atritor de alta energia), e posterior moagem dos pós de FeNi50(4h) visualizou-se sua granulometria e também sua morfologia através de microscopia eletrônica de varredura, observado na figura 53. A efetiva formação de liga com a difração de raios-X pode ser vista na figura 54 onde claramente notamos na figura 54-B o pico da liga FeNi em aproximadamente  $45^\circ$  e na figura 54-A esta aparece em menor intensidade. Isto nos aponta que 25 horas seja o tempo suficiente para formar a liga por mecânico síntese em moinho atritor de alta energia.

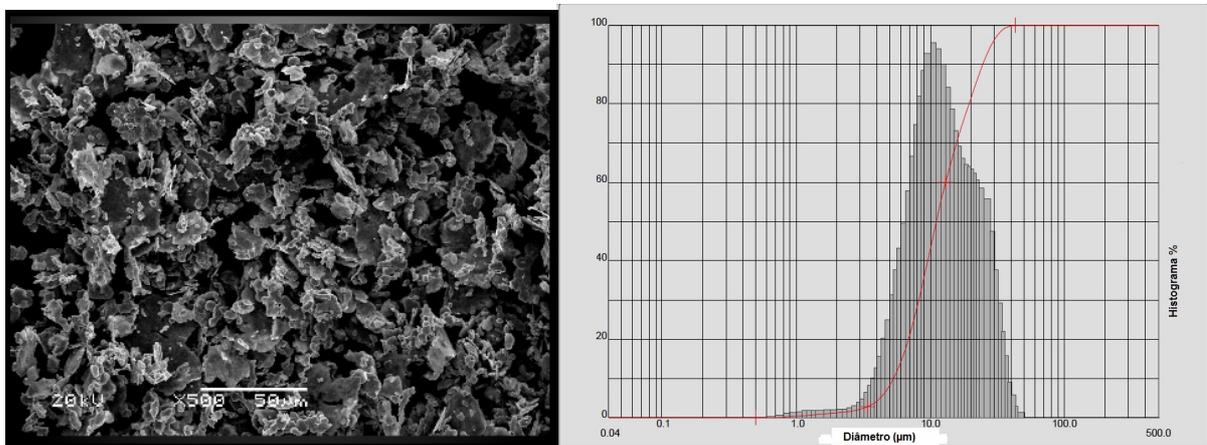


Figura 53 - Formato das partículas de FeNi50 em MEV e distribuição granulométrica

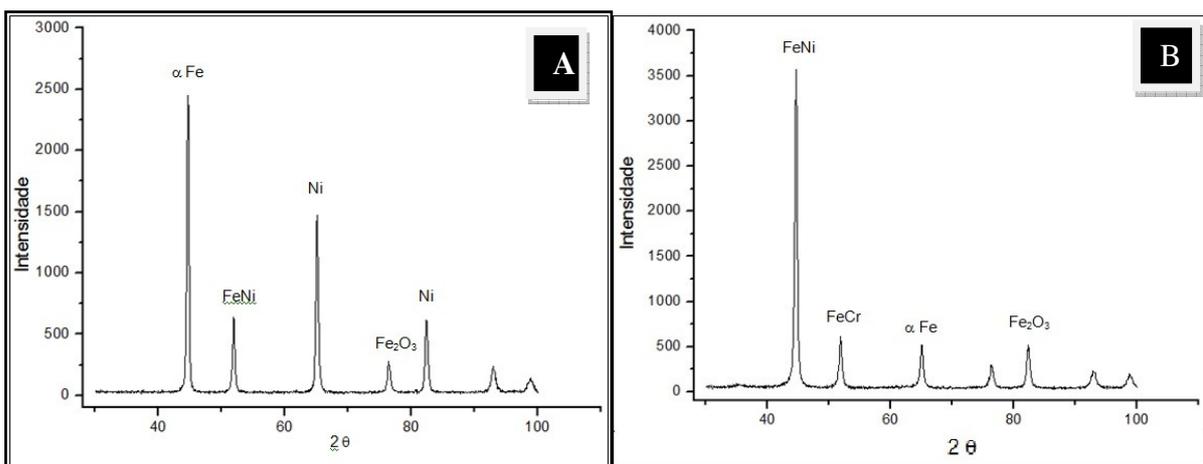


Figura 54 - Difração de raios-X para amostras de pós de FeNi50 após moagem em diferentes tempos A) 5h B) 25h

Observa-se ainda alguma formação com cromo proveniente das esferas de aço inoxidável e da câmara de moagem, fato pelo qual não seja desejado porém inevitável neste tipo de processo.

A microestrutura encontrada para o FeNi50 sinterizado está na figura 55 e cabe salientar que os “pites” (pequenos buracos) que aparecem foram causados pelo ataque químico (Marble - 4 g de  $\text{CuSO}_4$  +20 mL de HCl + 20 mL de água destilada).

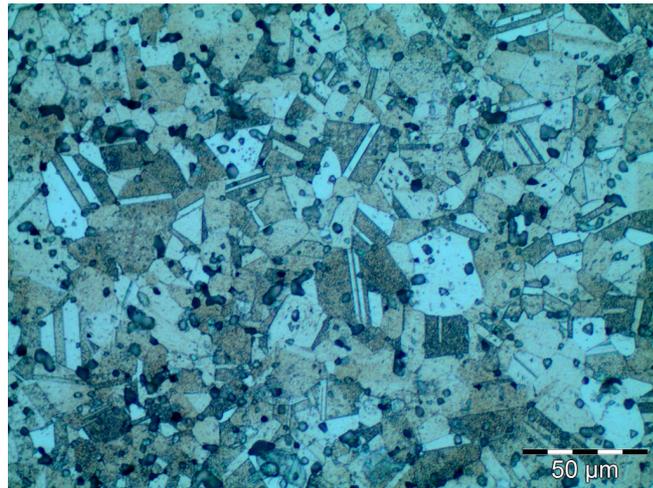


Figura 55 - Microestrutura de FeNi50 compactado e sinterizado (Marble)

Fazendo as comparações com o material injetado e o material compactado pode-se afirmar que haverá um ganho (0,3 T na magnetização) no sentido de propriedades magnéticas. Teoricamente o injetado tem menos inclusões e vazios do que o material compactado e isso fica explicitado na figura 56.

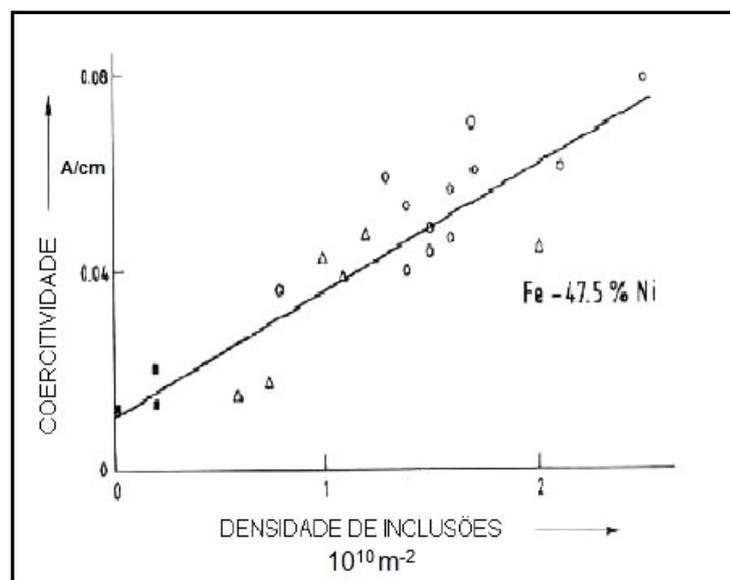


Figura 56 - Relação entre densidade de inclusões e coercitividade (ARNDT, M.C.; 2002.)

Após todas as etapas de preparação dos CPs foram feitos os ensaios magnéticos e elétricos utilizando anéis bobinados e um arco do anel, respectivamente, conforme as figuras 57, 58 e 59.

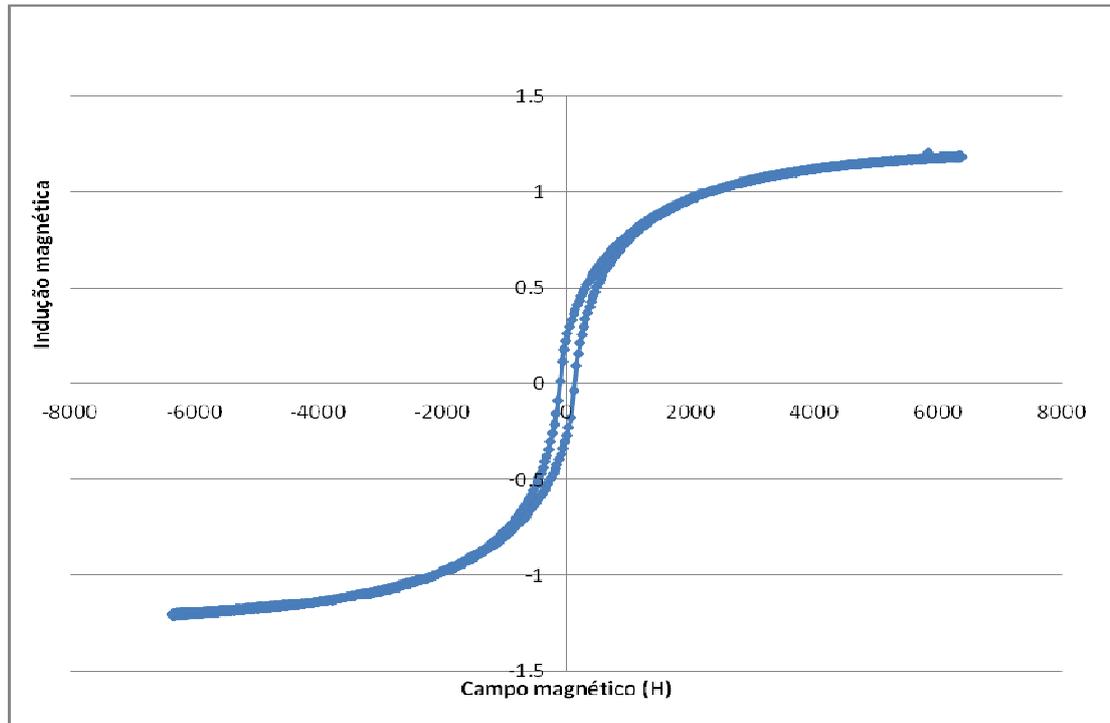


Figura 57 - Curva de Histerese da liga FeNi50 via Metalurgia do Pó convencional

Houve um comportamento magnético satisfatório para aplicação desejada, indicando material magnético mole. Mostra-se acima as perdas por histerese serem muito pequenas frente a materiais já utilizados em motores. O mercado dos materiais magnéticos macios é dominado basicamente pelos aços de baixo carbono e aços silício, utilizados, principalmente, para produção de motores elétricos e transformadores (Arndt, M.C.; 2002). Os materiais magnéticos macios sinterizados vêm ganhando mercado, principalmente pela demanda de peças para indústria automobilística.

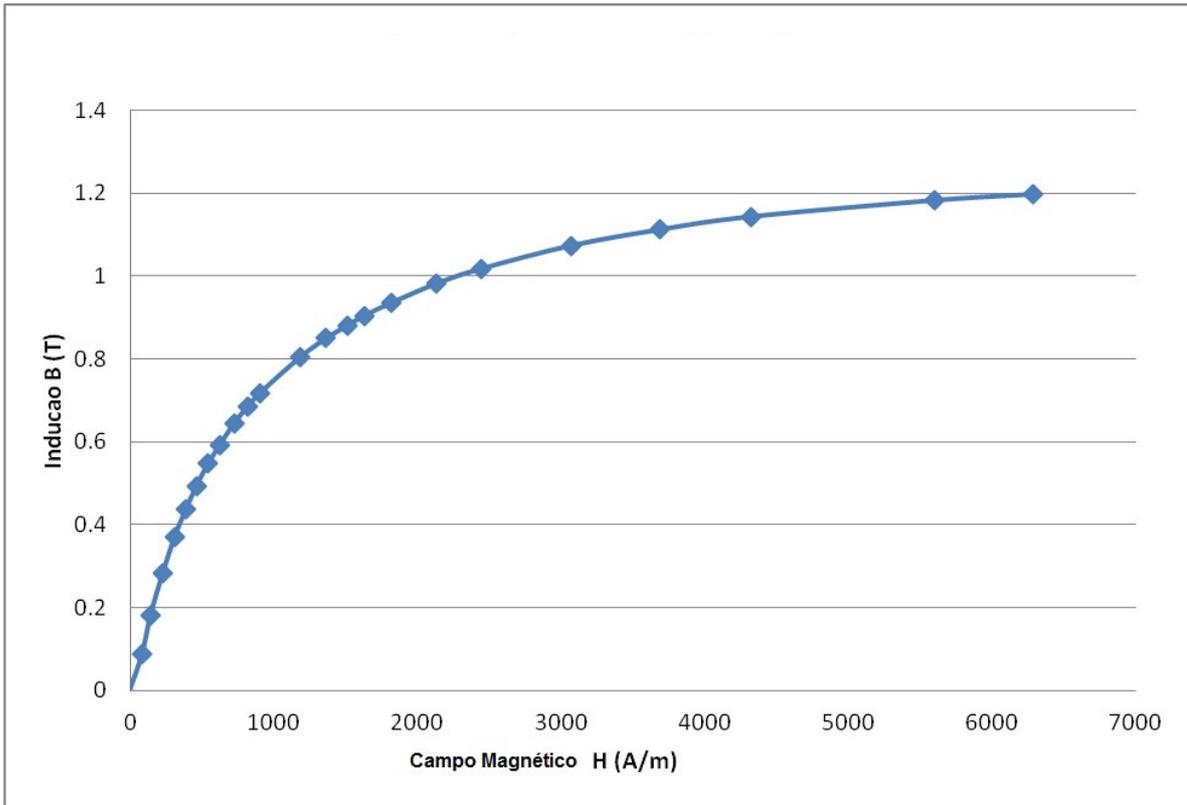


Figura 58 - Curva de magnetização do FeNi50 sinterizado

Obeve-se indução máxima de aproximadamente 1,2 T, e uma magnetização remanente de 0,3T, mostrando assim caracterizando uma liga de comportamento magnético mole.

Ensaio de Resistividade														
	Medidas Geométricas (mm)													
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3	D1	D2	D3	E	F
AmostraX	3.90	3.90	3.80	6.60	6.50	6.70	50.10	50.10	50.10	42.10	42.10	42.10	50.10	42.10

	Medidas Geométricas (mm)		Medidas de Tensão (mV)				Valores	
	Área (m²)	Comprimento (m)	1,5 (A)	2 (A)	2,5 (A)	3 (A)	R (Ω)	ρ (Ω.m)
AmostraX	2.5520E-05	0.0724	2.20	2.90	3.60	4.30	0.0014	5.1013E-07

Verificação de Acerto de Valores

R1	R2	R3	R4	p1	p2	p3	p4
0.001467	0.00145	0.00144	0.001433	5.1E-07	5.1E-07	5.1E-07	5.1013E-07

R1, R2, R3 e R4 devem ser iguais, assim como p1, p2, p3 e p4.

Legenda das Dimensões a Serem Efetuadas.

Figura 59 Ensaio de resistividade do FeNi50 com medidas e resultados

Nos ensaios de resistividade seguiu-se os procedimentos do t3pico 3.3.4.1 obtendo-se o valor de  $5,1 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ .

### 4.3 Corpos de prova injetados à partir de carga comercial

Por problemas diversos nas formulações das cargas injetáveis reais a serem utilizados (FeNi50), usou-se a carga comercial FeNi8 que é referente a liga 8 % de níquel em ferro, isso para utilização do equipamento de injeção e testes subsequentes do levantamento das propriedades necessárias ainda a ser obtidas com pós de FeNi50 em carga desenvolvida na tese. Também serviu como base de propriedades reológicas, degradação e extração polimérica, otimizando valores a serem alcançados também no desenvolvimento. A matriz utilizada foi a apresentada no t3pico 3.5.1.

#### 4.3.1 Resistividade elétrica

Os resultados de resistividade do FeNi8 estão apresentados na figura 60 onde seguiu-se os passos do item 3.3.4.1. A média das medidas apresentada para esta liga foi de  $3,06 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ .

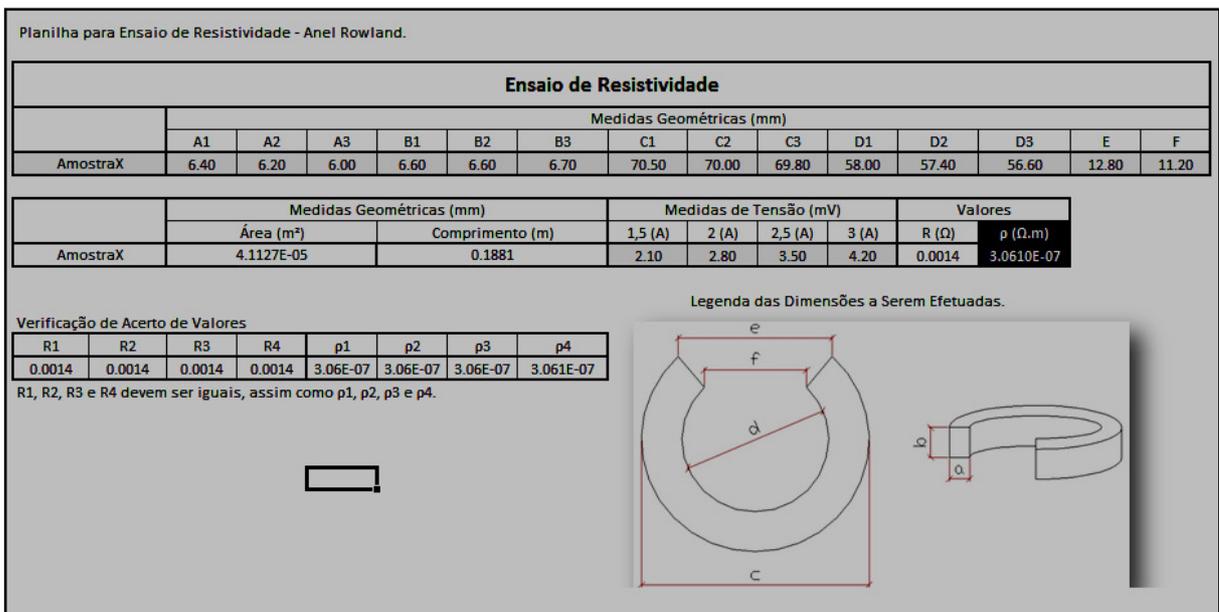


Figura 60 - Geometria utilizada nos ensaios de resistividade e dados experimentais

### 4.3.2 Dimensões dos corpos de Prova Injetados

Todos as medidas dos corpos de prova injetados estão na tabela 10 e são de grande importância para os estudos dimensionais de confecção de matrizes, pois para obter precisão das peças, precisa-se dados estatísticos das contrações em um número elevado de testes.

Tabela 10 Dimensões dos corpos de prova à verde e sinterizados

Anéis	Diâmetro Externo médio(mm)	Diâmetro Interno Médio (mm)	Massa (g)	Altura(mm)
1	47,7 - 39,4	33,1 - 27,3	21,744 - 19,024	6 - 4,98
2	48,2 - 39,6	32,3 - 26,9	23,62 - 20,549	6 - 5
3	47,8 - 39,5	32,4 - 26,9	23,2 - 20,267	6 - 4,9

Cilindros	Diâmetro médio (mm)	Massa (g)	altura	
1	12,26 - 10	8,345 - 7,3	15 - 12,2	
2	12,3 - 10	8,345 - 7,3	15 - 12,2	
3	12,26 - 10	8,375 - 7,32	15 - 12,3	

### 4.3.3 Curva de Histerese e Magnetização

Os resultados para a liga FeNi8 estão mostrados nas figuras 61 e 63, bem como uma discussão da literatura na figura 62, que atesta estes resultados.

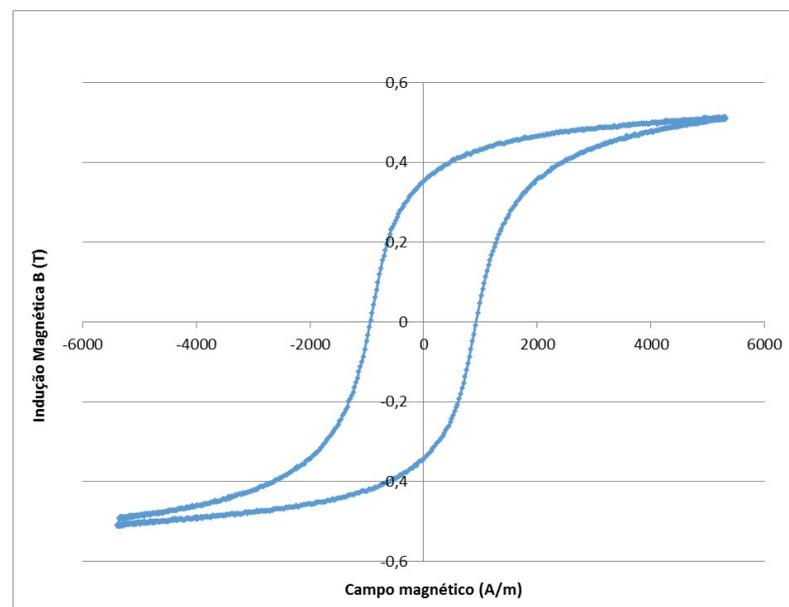


Figura 61 - Curvas de histerese de FeNi8 comercial injetado

Pode-se notar, já em comparação com o FeNi50 obtido por metalurgia do pó convencional, uma baixa magnetização máxima da ordem de 0,6 T, sendo exatamente a metade do FeNi50 sinterizado. A permeabilidade magnética da liga ferro níquel tem o comportamento segundo a figura 62 (JILES, D.;1998).

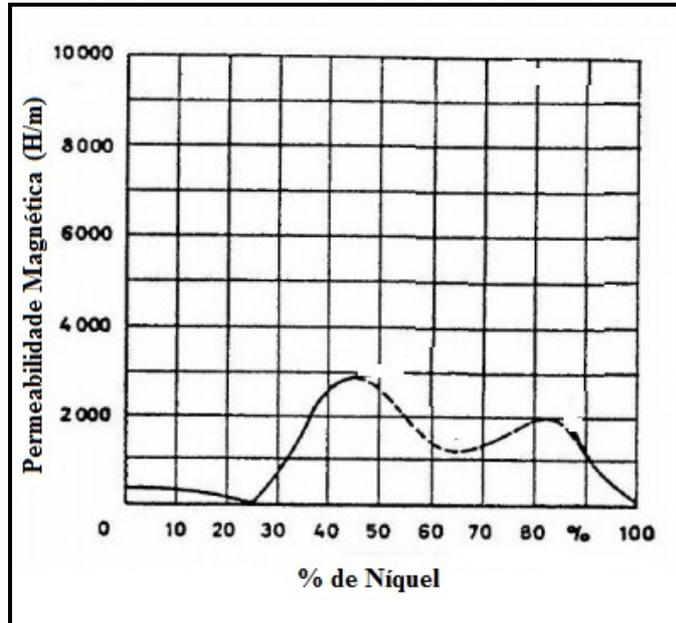


Figura 62 Variação da permeabilidade magnética em função da composição da liga Adaptado de, (JILES,D.; 1998)

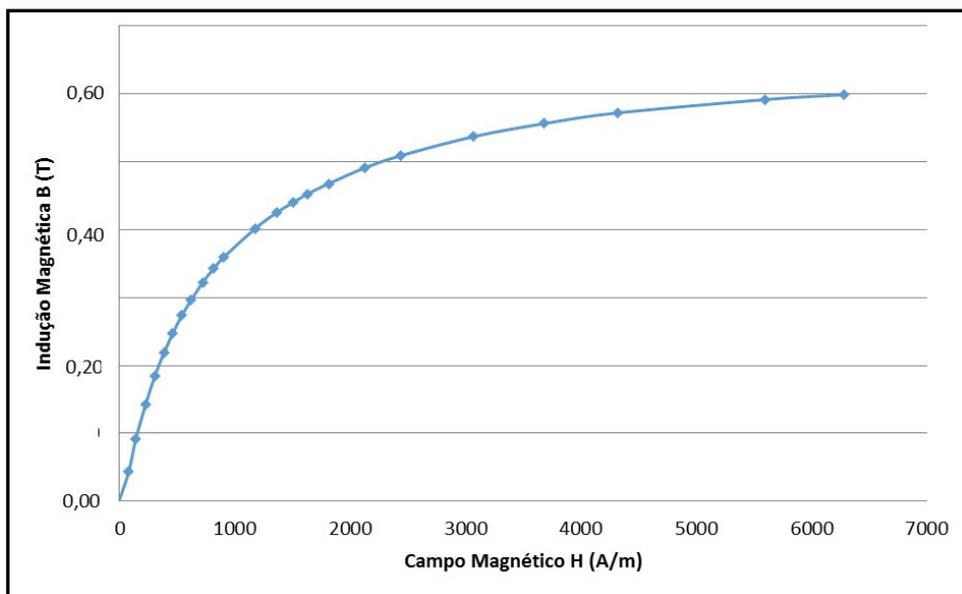


Figura 63 - Curva de magnetização do FeNi8 injetado

O FeNi8 apresentou baixa magnetização máxima (0,6T) com um campo magnético de 6000 A/m. Em comparação aos outros materiais estudados e também

a materiais magnéticos moles empregados na fabricação de motores e transformadores.

#### 4.4 Corpos de prova injetados à partir de carga formulada

O principal material envolvido nos estudos, foi o a partir de carga desenvolvida dentro do laboratório, com o pó da liga FeNi50 pré ligada no processo de atomização.

##### 4.4.1 Resultados da obtenção da carga injetável

Na preparação de uma carga injetável efetiva para o processo, procurou-se usar materiais já consumados na confecção de cargas injetáveis, como parafina, cera de carnaúba, polietileno, e ácido esteárico, bem como, um pó metálico esférico com diâmetro médio 10  $\mu\text{m}$ . Em um primeiro teste foi utilizado um sistema manual de mistura, conforme figura 64.



Figura 64 - Sistema manual desenvolvido para mistura de cargas injetáveis

A carga formulada de maneira manual não apresentou características favorável, mostrando pós finos soltos ao meio polimérico. O sistema com pás não aquecidas não permitiu uma boa homogeneização e, também, não obteve-se controle exato de temperatura da manta térmica. Em uma nova tentativa, houve

êxito, utilizando um reômetro de torque, onde utilizava-se sua câmara de mistura com os seguintes parâmetros: 80 RPM, 140 °C durante 1 hora de mistura.

Os corpos de prova foram injetados em uma máquina (item 3.6.2) com capacidade de injeção de peças micrométricas. Diversos parâmetros como volume de dosagem, pressão de injeção e temperatura das zonas, foram monitorados e utilizados conforme métodos preliminares (CAP 3). Como resultado da injeção obteve-se uma amostra vista na figura 65, em comparação com a mesma após sinterizada.



Figura 65 – Corpos de prova em forma de anel

A carga mostrou-se efetiva (figura 67) para os procedimentos de moldagem por injeção. Na extração química e térmica, obteve-se uma redução linear de aproximadamente 13 %. A microestrutura obtida pode ser notada na figura 66 em um aumento de microscópio óptico de 200x.

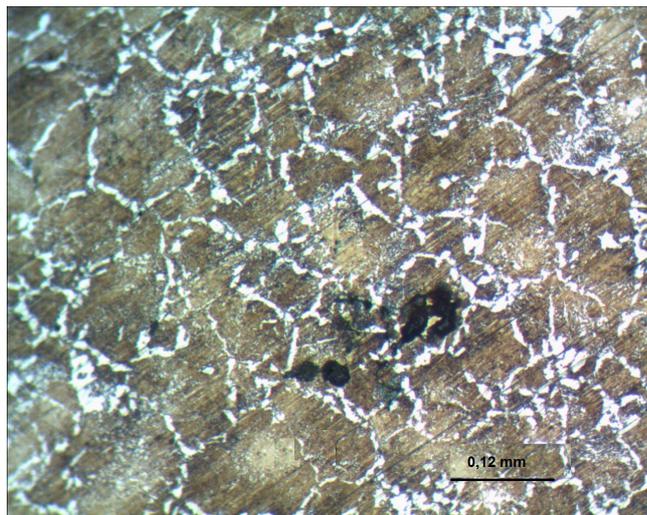


Figura 66 Microestrutura do FeNi50 sinterizado a partir da carga formulada (nital 5%)

A estrutura mostrou formar duas fases, possivelmente ferrita no contorno de grão. Nota-se poros que são inerentes do processo MPI, mas, porém estão em pequena proporção sendo isto já esperado. Foram medidas as durezas para análise de resistência do material onde encontrou-se uma média de 60 HRB.

#### 4.4.2 Análises reológicas da carga injetável de FeNi50

Para analisar a viscosidade da carga usou-se o reômetro capilar citado no capítulo 3. Os valores podem ser analisados na figura 67, conforme taxa de cisalhamento e tensão de cisalhamento. Encontram-se dentro dos padrões de cargas comerciais, onde trabalha-se com taxas de cisalhamento de até 1000 Pa/s, e viscosidade de 100 Pa.s.

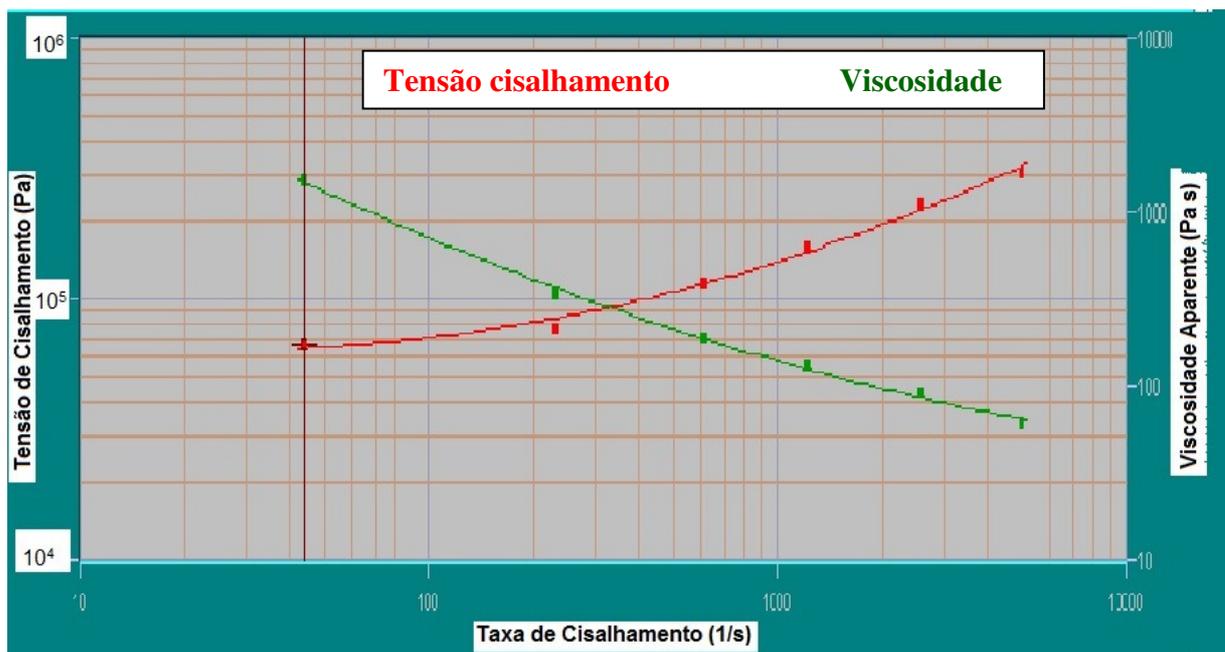


Figura 67 - Análise reológica de carga formulada de FeNi50

#### 4.4.3 Análise Térmica (TGA/DSC) do FeNi50 formulado

Os dados revelaram muito bem os componentes da carga desenvolvida como mostrado na figura 68.

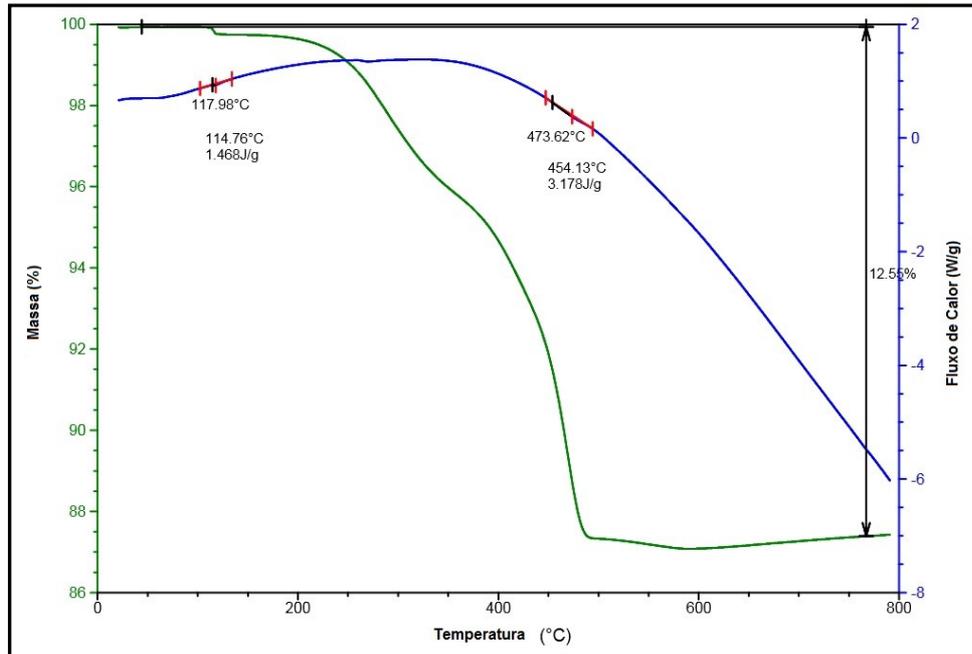


Figura 68 - TGA/DSC da liga FeNi50

Na curva verde, apresentada, nota-se claramente a perda da cera parafina em aproximadamente 117 °C e o polietileno de baixa densidade em 473 °C. A análise de degradação do material fica clara com as inflexões da curva.

#### 4.4.4 Extração química, térmica, e Sinterização

Os resultados da extração química foram de extrema importância para o sucesso da sinterização do injetado porque havia a possibilidade de fazer-se somente por extração térmica da mistura de polímero e cera. Utilizou-se apenas cera parafina e polietileno de baixa densidade, ambos com temperaturas de perda de massa totalmente distintas. Mas mesmo usando-se taxas de aquecimento muito baixas, da ordem de 0,1 °C/min a amostra perdeu a integridade de forma, e se partiu ao sinterizar heterogeneamente. Após o CP passar por uma imersão em hexano a 65°C em banho maria por 6h, obteve-se uma extração térmica satisfatória. Conseguiu-se integridade da peça conforme figura 65 numa sinterização efetiva adquirindo as propriedades desejadas.

#### 4.4.5 Histerese do FeNi50 Injetado

O material desenvolvido apresentou comportamento magnético macio onde obteve indução magnética máxima de 1,5 T, conforme figura 69.

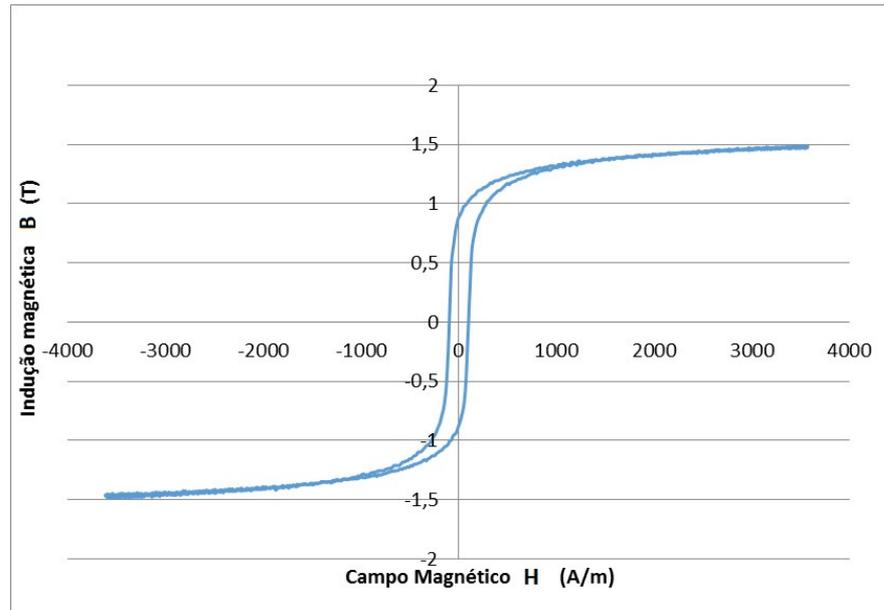


Figura 69 - Histerese magnética do FeNi50 injetado

Além dos dados magnéticos, ainda analisou-se a resistividade da liga. Seguindo os procedimentos do item 3.3.4.1 chegou-se ao resultado médio de  $5,06 \cdot 10^{-7} \Omega\text{m}$ , o que atestou ainda mais a utilização do material em motores elétricos que necessitam alta permeabilidade, alta resistividade e poucas perdas por histerese magnética

#### 4.5 Comparações dos materiais utilizados na pesquisa

Não só na análise da empregabilidade dos materiais em questão para uso em mini motores, também analisou-se suas estruturas e suas respectivas propriedades magnéticas e elétricas. A figura 70 apresenta a comparação das magnetizações da liga FeNi8 e da liga FeNi50.

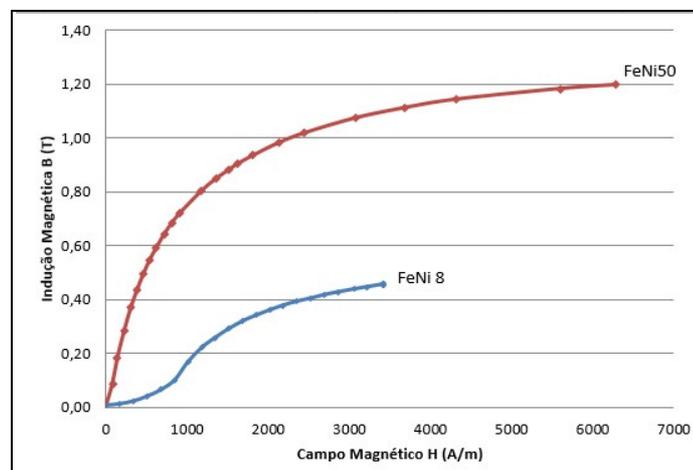


Figura 70 - Comparações de curva de magnetizações do FeNi8 e FeNi50

Nota-se que a adição de níquel no ferro aumentou suas propriedades magnéticas, com a máxima magnetização do FeNi50 apresentando uma diferença de aproximadamente 60%, em relação a indução magnética  $B$  (T) para o ferro com porcentagens menores de Ni.

Mostra-se na figura 71 alguns materiais ferrosos e suas curvas de magnetização. O aço silício é um dos materiais mais empregados em transformadores e motores por motivo de ter baixas perdas por histerese magnética e alta permeabilidade magnética. Na análise o material injetado de FeNi50 mostrou comportamento muito semelhante a estes materiais, e muito se aproxima do Aço-silício.

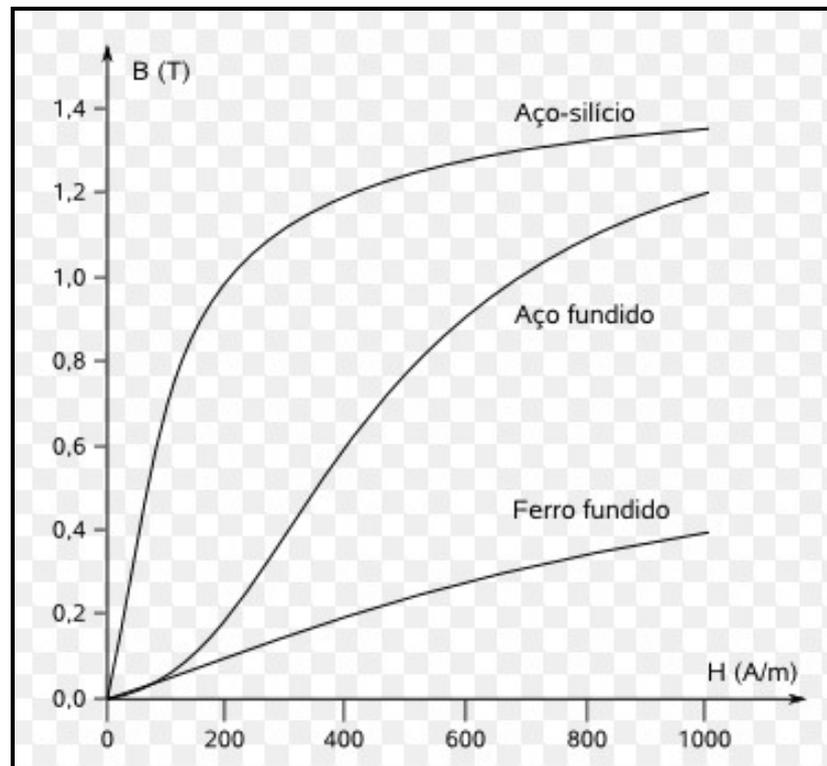


Figura 71 Curvas de magnetização de materiais ferrosos (EDMINISTER, J. A.;1980)

Na figura 72 as comparações das curvas de histerese referentes aos materiais testados no trabalho.

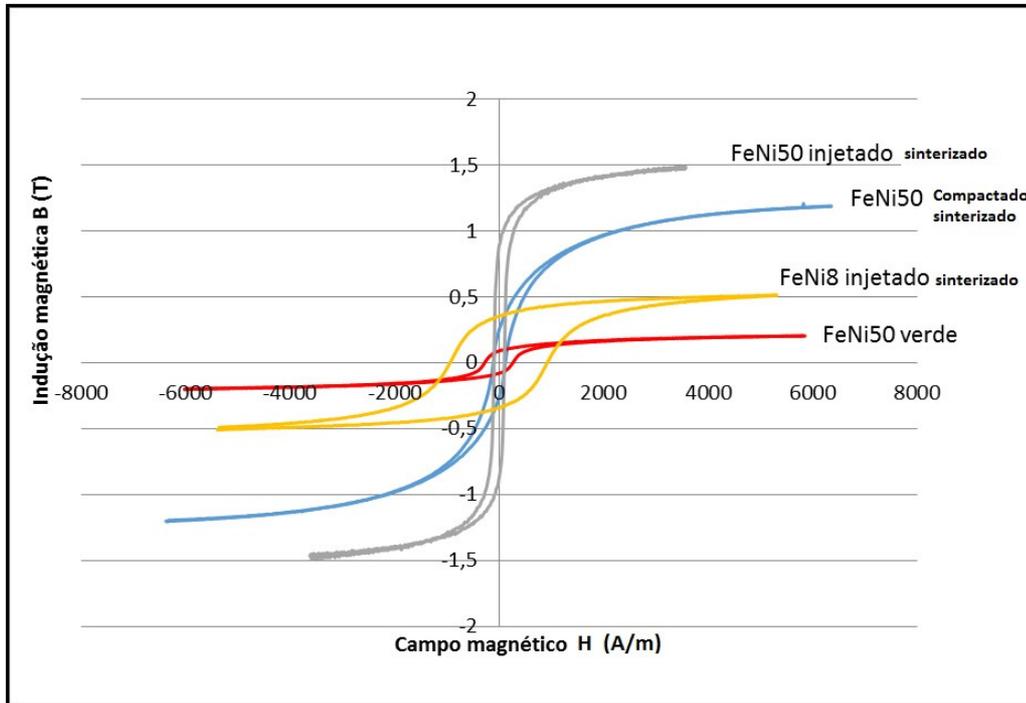


Figura 72 - Comparações das histereses magnéticas dos materiais estudados

O FeNi50 injetado foi o melhor material magnético macio dos estudados, apresentando pequena energia de perdas de inversão de polaridade magnética e baixa força coercitiva. O FeNi50 compactado e sinterizado obteve ótimos resultados também, com uma menor magnetização residual e um forte campo magnético para uma indução magnética menor do que o injetado. A liga FeNi50, tem propriedades especiais que permitem a construção de aparelhos magnéticos com eficiências impossíveis de obter com outros materiais (PINHO, L.C.A.B.; 2009). Estas ligas são selecionadas para aplicações, nomeadamente que exijam perdas muito reduzidas, assim como valores de permeabilidade, inicial e máxima, elevadas para valores de indução relativamente baixos. Além disso, algumas destas ligas possuem propriedades especiais, tais como permeabilidade constante ou ciclo histerético retangular com apenas um tipo de tratamento térmico de recozimento com campo induzido, conforme mostra a figura 73.

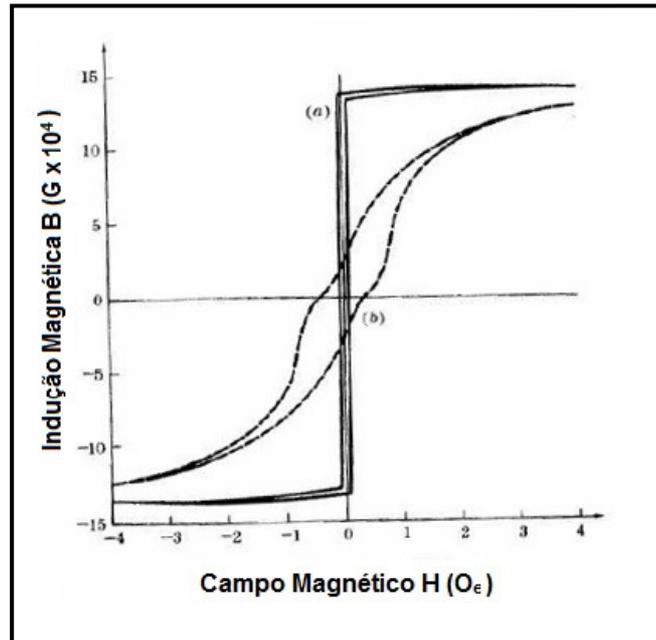


Figura 73 - Efeito de Recozimento em ciclo histerético do FeNi65 a) Ciclo retangular  
b) Ciclo do material sem tratamento (SMITH, W.; 1998).

De um modo geral, pode-se considerar três grupos de ligas de FeNi, sendo compostas por níveis de cerca de 80%, 50% e entre 30 a 40% de Ni. Dependendo da aplicação, a escolha depende sobretudo das seguintes propriedades: o grupo com cerca de 80% de Ni é aquele que registra maior permeabilidade; para aplicações em que a saturação de magnetização seja crucial a escolha recai sobre o grupo de 50% de Ni; o grupo que possui maior resistividade é o de 30% (JILES, D.; 1998).

#### 4.6 Motor com FeNi50 injetado e testes de acionamento

O motor, por fim, foi construído com FeNi50 injetado, pois mostrou ser o material, dentre os estudados, com características necessárias ao uso em mini máquinas elétricas. Devido ao custo elevado de um molde para injeção, para produção de poucas peças, houve a necessidade fazer o mini motor por eletro-erosão a fio a partir de cilindros injetados de FeNi50. A figura 74 apresenta o motor de passo montado em um dos acionamentos desenvolvidos em paralelo na rede de pesquisa, visto ter sido desenvolvido após o início deste trabalho um protótipo com dimensões 3 vezes maiores. Este mostrou movimentos satisfatórios e o esquema elétrico do dispositivo de acionamento está mostrado na figura 75.

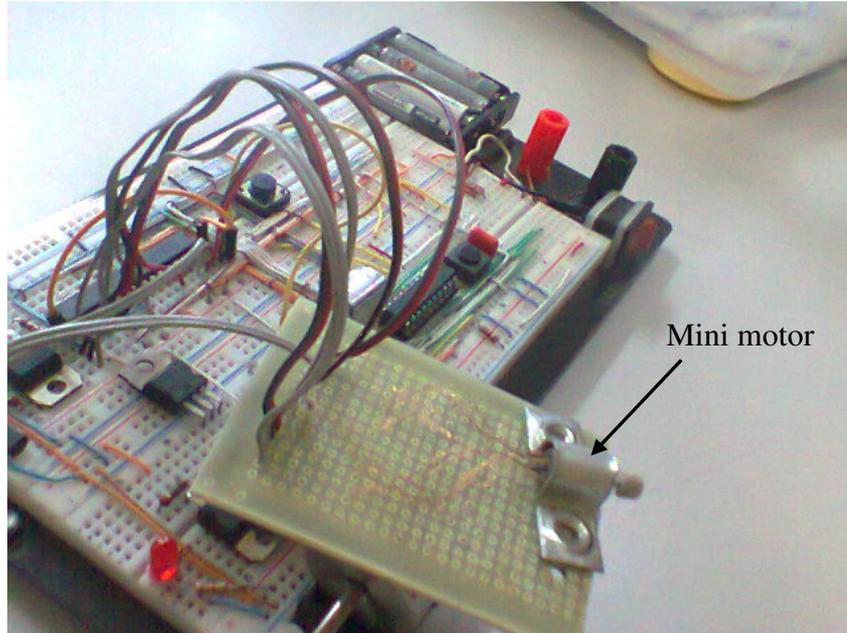


Figura 74 - Mini motor de FeNi50 em teste de acionamento final

Obteve-se o torque necessário, suficiente para o fim idealizado (girar um prisma em um tubo endoscópico). Este tipo de motor faz uso da mínima energia elétrica possível para motores elétricos, por ser acionado aos passos e ter dimensões minúsculas. O primeiro dispositivo utilizado nos testes preliminares está apresentado no tópico 3.2.2 mas os testes finais foram no dispositivo da figura 74.

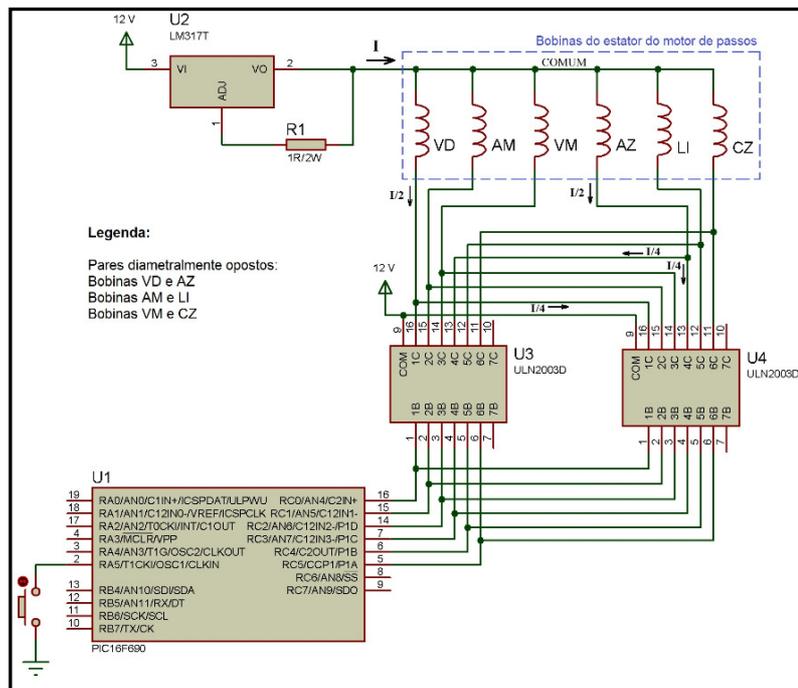


Figura 75 Esquema elétrico do dispositivo de acionamento dos testes finais

O mini motor foi bobinado como unipolar, possuindo seis bobinas com um condutor comum, no qual uma das extremidades das bobinas foi conectada. O comando foi concebido para acionar duas bobinas de uma mesma fase. Assim, o mesmo pode ser considerado um motor de passos de relutância unipolar trifásico, com duas bobinas diametralmente opostas por fase.

## 5 CONCLUSÕES

A carga desenvolvida com uso do pó de FeNi50 atomizado pré-ligado, apesar de ter composição simples da mistura de ligantes (parafina, polietileno). Apresentou características adequadas para o processo de injeção (boa moldabilidade e poucas variações nas contrações. Foi o material que mostrou melhores propriedades para o fim desejado, dentre os estudados. Obteve-se baixa retentividade, alta indução de saturação e alta resistividade. Também o FeNi50 injetado teve comportamento magnético macio comprovado na curva de histerese magnética. Esta liga FeNi50 é pode ser empregada em motores elétricos, mesmo utilizando-se da metalurgia do pó convencional, pois muito se aproximou do resultado com o material injetado. Os pós de Fe, FeNi8 e FeNi50 utilizados nas técnicas de metalurgia do pó citadas nesta tese, mostraram-se efetivos para consumação das peças. Obteve-se propriedades desejáveis, como boa dureza, propriedades elétricas e magnéticas desejáveis ao fim. Os sistemas de acionamento apresentados, atenderam as condições de funcionamento ao caso idealizado em questão (mover aos passos sistema de obtenção de imagens endoscópicas).

O sistema de moagem de pós metálicos de Fe e Ni, com moinho atritor de bolas de alta energia foi efetivo na formação de liga metálica por mecâno síntese. Em 20h de processamento para o FeNi50 formou 99% da liga.

Através da comparação da resistividade entre a liga FeNi50 desenvolvido por injeção e o material tradicionalmente utilizado FeNi50 laminado, pode-se notar uma grande semelhança ficando os dois com valores médios da ordem de  $5,1 \cdot 10^{-7} \Omega m$  e  $7 \cdot 10^{-7} \Omega m$  respectivamente.

É possível a construção de mini motores elétricos de passo, à partir de moldagem por injeção. Além de não apresentar grandes perdas por correntes parasitas, uma produção em massa é possível, em período curto de tempo.

## 6 REVISÃO DA LITERATURA

ARNDT, M.C.; **Obtenção de material magnético macio de Fe-Si pelo processo de injeção de pós metálicos**, Dissertação de mestrado, PPGEM – UFRGS, 2002.

ACARNLEY, P.; **Stepping Motors a guide to theory and practice**, First edition. London: The Institution of Engineering and Technology, 2007, p.14. (IET Control Engineering Series 63).

BARABAS, Z. A.; MORAR, A.; **High performance microstepping driver system based on five-phase stepper motor (sine wave drive)**, Procedia Technology; V.12 p. 90-97; 2014.

BARRIÈRE, T.; RENAULT, D.; GELIN, J.; DUTILLY, M.; **Moulage par injection de poudres métalliques**, Expérimentation, modélisation et simulation; Mec. Ind.1, p.201-212, 2000.

BITTENCOURT, S.D.; **Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação em núcleo de máquinas elétricas rotativas**, Dissertação de mestrado; PPGEM3M, UFRGS, 2012.

BERNARDI, L. O.; PANTANO, R.; **Medição da resistividade elétrica em condutores metálicos**, Revista Intellectus, n. 19, p. 55-69, 2012.

BOHUU, D. ; XUANHUI, Q. ; MINGLI, Q.; SHIBO, G.; **Powder injection molding of Fe-Ni soft magnetic alloys**, RARE METALS; Vol. 25, p. 440; 2006.

BOSE, A.; **Advances in Particulate Materials**, 1 ed., Newton: Butterworth-Heinemann, 1995.

CALLISTER, JR. W.D.; **Ciência e Engenharia de materiais Uma Introdução**, 5 Ed.; Salt Lake City, 1999.

CASTILLO O, MELIN P.; **A Hybrid fuzzy-fractal approach for time series analysis and plant monitoring**, Int. J. Int. Syst 17(8): p.751–765, 2002.

CASTILLO, O.; MELIN P.; **Soft Computing for Control of Non-Linear Dynamical Systems**, Springer-Verlag, Heidelberg, Germany, 2001.

CASTILLO, O.; MELIN P.; **A new Fuzzy-Fractal-genetic method for automated mathematical modelling and simulation of robotic dynamic systems**, Proc. of FUZZ'98, Anchorage, Alaska, V2, p.1182–1187, 1998.

CHAPMAN, S. J.; **Electric Machinery and Power Systems**, 1ª edição. McGraw Hill, 2002.

CHRIFI-ALAOUI, L.; LEBRUN, A.; **H-infinity feedback control of a permanent magnet stepper motor**, In: 23rd international conference on industrial electronics, control and instrumentation, vol. 1, p.108–13, 1997.

DE OLIVEIRA, J. G. S. M.; **Materiais usados na construção de motores elétricos**, Seminário Técnico Departamento de Engenharia Elétrica, PUC-RS, 2009.

DIAS, M.M.; DIAS, A.M.; CEZAR, J.L.; SCHAEFFER, L.; **Novas perspectivas das máquinas elétricas trifásicas a partir da utilização de materiais magnéticos macios sinterizados**, Revista Liberato; Vol. 6, 2005.

DIAS, M.M.; SCHAEFFER, L.; RODRIGUES, D.; LANGRAF, F.J.G.; **Materiais magnéticos produzidos por metalurgia do pó**, M & M Metalurgia e Materiais; p. 625, 1999.

DIAS, M. M.; **Construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado**, tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, p.62,1999.

EDMINISTER, J. A.; **Eletromagnetismo**, 2º edição, Makron Books / Mcgrawhill, São Paulo, 1980.

- FITZGERALD, R.; KINGSLEY JR., C.; **Electric Machinery**, 6° edição, McGraw-Hill, New York, 2003.
- GALIO, A.F.; **Produção de Implantes de Titânio Via Moldagem Por Injeção de Pós de Hidreto de Titânio**, tese de doutorado, UFRGS, 2004.
- GERMAN, R.M.; Bose, A.; **Powder Injection Molding of Metals and Ceramics**, Ed. MPIF; p.410, USA, 1997.
- GERMAN, R.M.; Bose, A.; **Powder Injection Molding**, Ed. MPIF; p.520, USA, 1990.
- GIERAS, J. F.; **Advancements in electric machines**, Power Systems, p.135-156, 2008.
- GILIO, A. S.; **Máquinas de Indução Trifásicas**, 9ª edição. Érica, 2003.
- GRIFFITHS, C.A.; DIMOV, S.S.; BROUSSEAU, E.B.; Hoyle, R.T.; **The effects of tool surface quality in micro-injection moulding**, Journal of Materials Processing Technology 189, p.418–427, 2007.
- GUSSOW, M.; **Eletricidade Básica**, Makron Books, 2 ed., p. 566, 1997.
- IMBABY, M.; JIANG, K.; CHANG, I.; **Fabrication of 316-L stainless steel micro parts by softlithography and powder metallurgy**, Materials Letters, V. 62, p.4213–4216, 2008.
- ISHIKAWA, T.; TAKAKUSAGI, R.; MATSUNAMI, M.; **'Static torque characteristics of permanent magnet type stepping motor with claw poles'**, *IEEE Transactions on Magnetics*, **36**(4), p. 1854–1857, 2000.
- JANG, J.S.R.; SUN, C.T.; MIZUTANI, E.; **Neuro-fuzzy and soft computing**, Prentice Hall New York, NY, USA, 1997.

JANG, J.S.R.; **ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference systems IEEE Trans Systems**, Man and Cybernetics V23, p.665–685; 1993.

JANSSON, P.; **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**, Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, p. 63-66, 1992.

JANSON, P.; **Soft Magnetic Composites – from DC to MHz with Iron Powder**, in PM World Congress, p.332, 1998.

JILES, D.; **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**, Chapman & Hall, 2ª Edição, Londres ,1998.

JILES, D.; **Introduction to Magnetismo and Magnetic Materials**, London, Chapman and Hall, .p.440,1991.

JUFER, M.; **Perspectives on electrical motors**, Modern Electrical Drives, p. 215-235, 2000.

KENJO, T.; SUGAWARA A.; **Stepping motors**, Oxford Science Publications, London, Great Britain, 1999.

KONG, X.; QUINARD, C.; BARRIERE, T.; GELIN, J.C.; MICHEL, G.; **Micro Injection Molding of 316L Stainless Steel Feedstock and Numerical Simulations**, Miniaturization & Nanopowders, Euro PM, 2009.

KRAUS, J.D.; CARVER, K.R.; **Eletromagnetismo**, Rio de Janeiro, Guanabara, p.780,1978.

LALL, C. ; **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**, Princeton, New Jersey: Metal Powder Industries Federation, p.141, 1992.

LANDGRAF, F. J. G.; **Propriedades Magnéticas de Aços para fins Elétricos**, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2004.

LENEL, F. V.; **Magnetic Applications**, Metals Handbook, v. 7, p. 638-641, 1984.

LI, Y.F.; LIU, S.; QU, X.; HUANG, B.; **Termal Debinding processing of 316-L stainless steel powder injection molding compacts**, Journal of Materials Processing Technology, V 46, p.75-84, 2003.

LI, Y.F.; LAU, CC; **Developments of fuzzy algorithms for servo systems IEEE Control**, System Magazine, V9, p.65–72, 1989.

MELIN, P.; CASTILLO, O.; **Intelligent control of a stepping motor drive using a hybrid neuro-fuzzy approach**, Soft Computing; v. 8 ; p. 546–555; 2004

MELIN, P.; CASTILLO O.; **Adaptive model-based control of non-linear dynamical systems with a neuro-fuzzy-genetic approach**. International Journal Smart Engineering System Design V4(1), p.41–47, 2002.

MELIN, P.; CASTILLO, O.; **Modelling, simulation and control of non-linear dynamical systems**, Taylor and francis publishers, London, Great Britain, 2002.

MILKE, A.R.; **O projeto de moldagem de pós por injeção aplicado na fabricação de peças de aço**, Dissertação de mestrado – PPGEM/UFRGS, 2000.

MORAR, A.; **Unipolar fixed – current chopper – 4 phase stepper motor driver system**, Procedia Technology, V.12, p. 75-82, 2014.

NOVAK, M. A.; **Introdução ao magnetismo**, IF-UFRJ, 2003.

OLIVEIRA, R.V.B.; **Moldagem por Injeção de Pós Cerâmicos: Remoção da Parafina e do Polipropileno Utilizados como Veículo Orgânico**, Polímeros: Ciência e Tecnologia, vol. 14, n° 3, p. 150-155, 2004.

PEREIRA, L. A.; **Aplicação de Materiais Sinterizados em Máquinas Elétricas**, Trabalho de Publicação Interna. Depto Eng. Elétrica, PUC-RS, 2000.

PINHO, L.C.A.B.; **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**, Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

PIOTTER, V.; BAUER, W.; KNITTER, R.; MUELLER, M.; MUELLER, T.; PLEWA, K.; **Powder injection moulding of metallic and ceramic micro parts**, *Microsyst Technol*, V.17, p.251–263, 2011.

PIOTTER, V.; BAUER, W.; HANEMANN, T.; M. HECKELE; C. MÜLLER: **Replication Technologies for HARM Devices - Status and Perspectives**, *Journal of Microsystems Technology*, Vol. 14, No. 9-11; p.1599-1605, 2008.

PIWILL I.E.; EDIRISINGHE M.J.; BEVIS, M.J.; **Development of temperature–heating rate diagrams for the pyrolytic removal of binder used for powder injection moulding**, *J. Materials Science*, V. 27 p.4381–4388, 1992.

QUINARD, C.; SONG, J.; BARRIERE, T.; GELIN, J.C.; **Elaboration of PIM feedstocks with 316L fine stainless steel powders for the processing of micro-components**, *Powder Technology*, V32, p. 213-318, 2010.

RAHMAN M.F.; POO, A.N.; **An application oriented test procedure for designing micro-stepping step motor controllers**. *IEEE Trans Indust Electron* v.35, p.253–7, 1998.

REBORA, G.; **La Construcción de Máquinas Eléctricas**, Barcelona, Hoepli - Editorial Científico-Médica, p.999, 1969.

REIS, S.G.; **Moldação por injeção de pós: Estudo de Formulações Compósitas Pó/Ligante Polimérico**, Tese de doutorado; Universidade de Coimbra; 2011.

RICHARDSON, D.V.; **Rotating electric machinery and tranformer technology**, Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., p.636, 1982.

SELK, G.A.; VOSSOUGH, G.R.; **Real-time parameter identification of two phase hybrid stepper motor in micro-stepping operation**, In: 6th Iranian manufacturing engineering conference, SMEIR., p.22–25, dezembro, 2003.

SETASUWON, P.; BUNCHAVIMONCHET, A.; DANCHAIVIJIT, S.; **The effects of binder components in wax/oil systems for metal injection molding**, Journal of Materials processing Technology; V.96, p. 94-100, 2008.

SHA, B.; DIMOV, S.; GRIFFITHS, C.; PACKIANATHER, M.S.; **Investigation of micro-injection moulding: Factors affecting the replication quality**, Journal of Materials Processing Technology, V.183 p. 284, 2007.

SMITH, W.; **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**, McGraw Hill, 3ª Edição, USA, 1998.

SOTOMAYOR, M.E.; VAREZ, A.; LEVENFELD, B.; **Influence of powder particle size distribution on rheological properties of 316 L powder injection moulding feedstocks**, Powder Technology, V.200, p.30-36, 2010.

SURYANARAYANA, C.; **Mechanical alloying and milling**, Progress in Material Science, n 46, p. 1-184, 2001.

WICHT, H.; BOUCHAUD, J.; **NEXUS Market Analysis for MEMS and Microsystems III 2004 – 2009**, Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Commercialization of Micro and Nano Systems, Baden-Baden August, p. 188-191, 2005.