

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

Utilização do processo de moldagem por injeção de pós metálicos nanométricos (MIM) para
o desenvolvimento de rotor e estator em servomotor aplicado à área médica

Vinícius Martins

Tese para obtenção do título de Doutor em Engenharia

Porto Alegre
2015

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

Utilização do processo de moldagem por injeção de pós metálicos nanométricos (MIM) para o desenvolvimento de rotor e estator em servomotor aplicado à área médica

Vinícius Martins
Tecnólogo em Fabricação Mecânica

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

Área de Concentração: Processos de fabricação

Porto Alegre
2015

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do título de Doutor em Engenharia, área de concentração de Processos de fabricação e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: Prof. Dr. Ing. Lírío Schaeffer

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Eng. José Carlos Krause de Verney – ULBRA

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias – FEEVALE

Prof. Dr. Ing. Paulo Antônio Pereira Wendhausen – UFSC

Dr^a. Kétner Bendo Demétrio – UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGE3M

Ao meu grande amor Márcia Fernanda Corrêa Pacheco Martins, pelos muitos momentos de compreensão, por incontáveis finais de semanas e feriados que dormimos no laboratório para eu conseguir fazer meus experimentos. Quero lhe agradecer por suportar meus defeitos, tolerar meus humores e, principalmente, por me entender e apoiar sem restrições, pelo carinho e aconchego nas horas de cansaço e, é claro, pelo amor verdadeiro juntamente com o seu companheirismo. Sendo que, ao seu lado me torno uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pois sem Ele nada é possível;

Ao professor Lírio Schaeffer, pela orientação dedicada e objetiva, pela confiança e grande ajuda em momentos de pouca disponibilidade de tempo, pelo trabalho sério e dinâmico, pela sua diária demonstração de persistência e tenacidade na obtenção de recursos financeiros e estímulos a pesquisa de novas tecnologias, além do incentivo pessoal e amizade.

Ao meu pai Luiz Carlos Martins (*In memoriam*) e a minha mãe Norma Conceição de Fraga Martins, pelo amor e apoio incondicional, que sempre me incentivaram a continuar estudando mesmo frente a tantas dificuldades.

Aos colegas Alberto Moreira Guerreiro Brito, Alex Fabiano Bueno, Ângela Selau Marques, Luana De Lucca de Costa, Maiquel Emersom Pflingstag, Wilson Corrêa Rodrigues pelas sugestões e observações valiosas.

Aos Colegas André Carvalho Tavares, Conrado Pedro Uribarri Carro, Camila Ferreira Escobar, Diego Pacheco Wermuth, Felipe Guimarães Ramos, Moises de Mattos Dias, Monir Göethel Borba, Paulo Mariot, Raul Favieiro de Mesquita, Rodrigo Gonzatti e Sherdil Khan pelas sugestões, observações valiosas e ajuda em alguns experimentos.

Ao Doutor Wilberth Harold Deza Luna pelas sugestões e observações valiosas.

Aos técnicos Luís Eduardo Pinow Ribas e Marco Aurélio Villanova.

Aos acadêmicos: André Rosiak, Eduardo Costa Braga (Feevale), Robson Nunes e Silmar do Nascimento Castro, por todos os trabalhos prestados que me auxiliaram na pesquisa, pelas conversas descontraídas e suas amizades sinceras.

À Professora Doutora Gelsa Edith Navarro Hidalgo, por todos os trabalhos prestados que me auxiliaram na pesquisa, pelas conversas descontraídas e suas amizades sinceras.

Ao professor Doutor Carlos Pérez Bergmann por ceder os equipamentos do LACER – Laboratório de Cerâmica.

Ao professor Doutor Ály Ferreira Flores Filho, por empréstimo dos equipamentos do LMEAE.

À Mestra Alini Luísa Diehl Camacho da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, pela ajuda na interpretação dos difratogramas.

Ao Mestre Régis Fabiano do Amaral e ao Professor Doutor Vinicius Karlinski de Barcellos do Laboratório de fundição - LAFUN

Aos funcionários do Centro de tecnologia da UFRGS, demais colegas e professores do programa de pós-graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, mais precisamente representada pelo Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia pela disponibilidade dos recursos materiais e tecnológicos juntamente com o Laboratório de Processamento Mineral - LAPROM, o Laboratório de Biomateriais e Cerâmicas Avançadas - Labiomat, Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia - LMEAE, e ao Centro de Microscopia Eletrônica - CME.

A CAPES pelo apoio através da bolsa de estudos e dos recursos para compra material e equipamentos vinculados ao Projeto NANOBIOTEC 009/2009 intitulado “Desenvolvimento de órtese e implantes a partir de pós nanométricos aplicados à fabricação de microcomponentes”.

Aos colegas, amigos e professores do IFSul – Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Sul-Rio-Grandense, Campus Sapucaia do Sul. Em especial, aos professores: Carmen Iara Walter Calcagno, Durval de Barba, Ênio Cesar Machado Fagundes, Maria Helena Polgati, Marcos Vinicius Farret Coelho.

E a todos que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho e contribuíram no esforço da conclusão deste trabalho, o meu sincero e efusivo agradecimento.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	18
LISTA DE SÍMBOLOS	20
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	24
RESUMO	26
ABSTRACT	27
1. INTRODUÇÃO	28
2. REVISÃO DE LITERATURA	32
2.1. Metalurgia do pó.....	32
2.2. Moldagem de pós Metálicos por Injeção - MIM.....	33
2.2.1. Obtenção e características do pó.....	33
2.2.2. Aditivos do processo de injeção.....	33
2.2.3. Polímeros aplicados em cargas injetáveis.....	35
2.2.4. Preparação de cargas injetáveis.....	36
2.2.5. Reologia de cargas metálicas.....	37
2.2.6. Simulação do processo de Injeção.....	37
2.2.7. Moldes de injeção de moldagem de pós metálicos.....	38
2.2.8. Parâmetros de moldagem de pó metálico.....	39
2.2.9. Extração química.....	41
2.2.10. Extração térmica.....	42
2.2.11. Sinterização.....	42
2.2.12. Micro moldagem de pós metálicos por injeção (μ -MIM).....	42
2.2.13. Obtenção e características de pós nanométricos.....	44
2.2.14. Problema e defeitos no processo de μ -MIM.....	44
2.3. Nanotecnologia.....	46
2.3.1. Nanomateriais.....	47
2.3.2. Materiais nanoestruturados.....	48
2.3.3. Aplicações gerais dos materiais nanométricos.....	48
2.4. Conceitos de magnetismo.....	49
2.4.1. Curvas de magnetização.....	51
2.4.2. Curvas de histerese magnética.....	52
2.4.3. Efeito nano-magnético.....	53
2.5. Materiais magnéticos duros e moles.....	55
2.5.1. Materiais tradicionais da metalurgia do pó.....	56
2.5.2. Propriedades magnéticas e elétricas de ligas macias.....	60
2.5.3. Perdas.....	65

2.6. Motor elétrico	68
2.6.1. Motor de passo.....	69
2.6.2. Máquinas elétricas obtidas por Metalurgia do pó	69
2.7. Projeto de motores	74
2.7.1. Sistema CAD/CAE/CAM	74
2.7.2. Introdução ao Método de Elementos Finitos	74
2.7.3. Simulação computacional de máquinas elétricas	75
2.7.4. Motor aplicado na área médica	76
2.8. Pesquisas recentes vinculadas ao trabalho	78
3. MATERIAIS E MÉTODOS	79
3.1. Obtenção dos pós químicos elementares micrométricos	82
3.2. Determinação do tamanho de partícula micrométrica	83
3.2.1. Microscópio eletrônico de varredura - MEV	83
3.2.2. Granulometria por difração de laser.....	83
3.3. Avaliação da composição química orgânica.....	83
3.4. Mistura por balanço de massa dos pós micrométricos	84
3.5. Homogeneização dos pós micrométricos	84
3.6. Densidade aparente dos pós micrométricos	84
3.7. Obtenção dos pós nanométricos	85
3.7.1. Moinho atritor	85
3.8. Determinação do tamanho de partícula nanométrica.....	86
3.8.1. Microscopia eletrônica de transmissão	86
3.9. Compactação dos pós micrométricos	86
3.10. Preparação da Carga Injetável	87
3.10.1. Mistura da Carga Injetável.....	88
3.10.2. Reologia da Carga Injetável.....	89
3.11. Moldagem de pós por Injeção.....	90
3.12. Densidade à verde	90
3.13. Calorimetria Diferencial de Varredura e Análise termogravimétrica.....	91
3.14. Extração Química e Térmica	91
3.15. Densidade marrom.....	92
3.16. Sinterização.....	92
3.17. Caracterizações físicas e mecânicas das amostras sinterizadas	92
3.17.1. Determinação de densidade e contração volumétrica	92
3.17.2. Ensaio de tração	93
3.17.3. Dureza e microdureza	93
3.17.4. Microscopia ótica e eletrônica	94

3.17.5. Análise via EDS.....	94
3.17.6. Difração de raios-X.....	94
3.17.7. Espectrometria de emissão ótica	95
3.18. Propriedades magnéticas do material	95
3.19. Propriedades elétricas do material	97
3.20. Projeto em CAD/CAE/CAM	98
3.21. Utilização do FEMM 4.2	98
4. RESULTADOS EXPERIMENTAIS	Erro! Indicador não definido.
4.1. Fase 1 – Metalurgia do pó convencional	Erro! Indicador não definido.
4.1.1 Visualização da partícula micrométrica	Erro! Indicador não definido.
4.1.2. Granulometria das partículas micrométricas.....	Erro! Indicador não definido.
4.1.3. Análise elementar do pó de ferro	Erro! Indicador não definido.
4.1.4. Análise de difração de Raios-X do pó de ferro	Erro! Indicador não definido.
4.1.5. Preparação das composições e homogeneização dos pós	Erro! Indicador não definido.
4.1.6. Compactação.....	Erro! Indicador não definido.
4.1.7. Caracterizações físicas e mecânicas das amostras sinterizadas....	Erro! Indicador não definido.
4.1.8. Caracterizações magnéticas e elétricas das amostras sinterizadas	Erro! Indicador não definido.
4.2. Fase 2 – Moldagem de pós metálicos micrométricos por injeção	Erro! Indicador não definido.
4.2.1. Estudo da relação do lubrificante e polímero estrutural	Erro! Indicador não definido.
4.2.2 Caracterização da carga metálica injetável Fe-3%Si comercial....	Erro! Indicador não definido.
4.2.3. Caracterização com a carga injetável micrométrica de ferro puro laboratorial...	Erro! Indicador não definido.
4.2.4. Caracterização com a carga injetável micrométrica de Ferro-3%Silício	Erro! Indicador não definido.
4.3. Fase 3 – Moldagem de pós metálicos nanométricos por injeção.	Erro! Indicador não definido.
4.3.1 Obtenção do pós nanométricos	Erro! Indicador não definido.
4.3.2. Análise de difração de Raios-X de pferro puro nanométrico.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.3. Caracterizações física e mecânica das amostras sinterizadas.....	Erro! Indicador não definido.
4.3.4 Caracterização com a carga injetável de ferro puro nanométrico .	Erro! Indicador não definido.
4.3.5 Carga injetável de ferro micrométrico com 25% nanométrico	Erro! Indicador não definido.
4.4. Fase 4 – Obtenção das peças do mini-servomotor.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.1 Modelamento do mini-motor de passo.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.2 Utilização do FEMM para geometria final do mini-motor de passo.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.3 Utilização do Plastic Simulation para definir injeção do mini-motor	Erro! Indicador não definido.
4.4.4 Projeto e fabricação do molde de injeção do mini-motor de passo	Erro! Indicador não definido.

4.4.5 Injeção do mini-motor de passo	Erro! Indicador não definido.
4.4.6 Propriedades físicas e mecânicas do mini-motor de passo.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.7. Análise elementar dos mini-motores.....	Erro! Indicador não definido.
4.4.8 Custo de fabricação dos componentes do mini-motor de passo.....	Erro! Indicador não definido.
5. DISCUSSÕES DOS RESULTADOS	Erro! Indicador não definido.
5.1 Discussão dos Resultados da Fase 1	Erro! Indicador não definido.
5.2 Discussão dos Resultados da Fase 2	Erro! Indicador não definido.
5.3 Discussão dos Resultados da Fase 3	Erro! Indicador não definido.
5.4 Discussão dos Resultados da Fase 4	Erro! Indicador não definido.
6. CONCLUSÕES.....	100
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	102
REFERÊNCIAS	103
Apêndice I - Detalhamento do Molde de Ensaio para a obtenção do corpo de prova. ..	130
Apêndice II - Dureza Brinell das composições compactadas e sinterizadas.	131
Apêndice III - Microdureza Vickers das composições compactadas e sinterizadas.....	132
Apêndice IV - Microdureza e dureza das composições injetadas e sinterizadas.....	133
Apêndice V - Evolução da moagem do pó de ferro.....	133
Apêndice VI - Microdureza e dureza de ferro nanométrico injetado e sinterizado.....	134
Apêndice VII - Microdureza e dureza de ferro micrométrico com 25% nanométrico. ...	134
Apêndice VIII - Microdureza e dureza de ferro micrométrico com 25% nanométrico...	134
Apêndice IX - Drive de Acionamento do mini-motor de passo	135

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de bloco que sumariza a rota da pesquisa.	30
Figura 2: Micrografia de uma carga injetável de ferro.	37
Figura 3: Micro peças simulada (A), injetada e sinterizada (B).....	38
Figura 4: Cavidade de um molde para injetabilidade.....	39
Figura 5: Geometria para determinação de parâmetros de injeção.	39
Figura 6: Geometria para determinação de parâmetros de injeção	40
Figura 7: Separação de pó ligante durante a mudança de direção de fluxo.....	41
Figura 8: Diferença entre o MIM e o μ -MIM.....	44
Figura 9: Defeitos de micro peças injetadas.....	45
Figura 10: Defeitos de micro peças injetadas	46
Figura 11: Evolução tecnológica em função da escala dimensional métrica	46
Figura 12: Materiais nanocristalino	47
Figura 13: Demonstração do momento magnético em relação a órbita elétrica	49
Figura 14: Magnetização de saturação X Temperatura do Fe, Co, Ni	51
Figura 15: Curva de magnetização inicial	51
Figura 16: Configurações de domínios durante várias fases de magnetização	52
Figura 17: Curva de histerese magnética para diversos materiais.....	53
Figura 18: Explicação do efeito superparamagnético	54
Figura 19: Diagrama de Fase Ferro - Silício	58
Figura 20: Curva de histerese para ferro puro (b) e ferro3%silício (a).....	60
Figura 21: Máxima permeabilidade e força coerciva X densidade	62
Figura 22: Máxima permeabilidade X densidade – Materiais sinterizados	62
Figura 23: Princípio das correntes de Foucault	68
Figura 24: Tipo de Motores	68
Figura 25: Minimotor de passo comercial Vexta	69
Figura 26: Motor elétrico com pólos de garras obtidos por Metalurgia do Pó	71
Figura 27: Motores de fluxo axial com ímã permanente (AFPM)	72
Figura 28: Motores de fluxo axial com ímã permanente (AFPM) aplicado a turbinas.....	73
Figura 29: Transformador e rotor de quatro polos obtidos por Metalurgia do Pó.	73
Figura 30: Variáveis de entrada através MEF de materiais magnéticos para saída	75
Figura 31: Geometria do servomotor e linhas de fluxo magnético	76
Figura 32: Características de um mini-motor comercial aplicado a área médica.....	77

Figura 33: Mini-motor comercial aplicado à área médica.....	77
Figura 34: Diagrama de blocos do trabalho em Metalurgia do Pó convencional - Fase 1.....	79
Figura 35: Diagrama de blocos de moldagem de pós metálicos por injeção - Fase 2.....	80
Figura 36: Diagrama de blocos da moldagem por injeção de pós nanométricos - Fase 3	81
Figura 37: Diagrama de blocos da fabricação e validação do mini-motor - Fase 4.	82
Figura 38: Moinho atritor horizontal NETZSCH LMZ05.	85
Figura 39: Ferramental de compactação cilíndrica (A) toroidal (B) e anéis compactados. ...	87
Figura 40: Molde de injeção dos corpos de prova.	90
Figura 41: Etapas para montagem dos anéis para determinação das propriedades.	95
Figura 42: Traçador de curva de histerese e a conexão dos fios da bobina completa.	96
Figura 43: Aparato para realização do ensaio de resistividade	97
Figura 44: Micrografia de ferro puro.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 45: Micrografia do silício puro.	Erro! Indicador não definido.
Figura 46: Granulometria a laser do ferro.	Erro! Indicador não definido.
Figura 47: Granulometria a laser do silício.	Erro! Indicador não definido.
Figura 48: Espectro de difração de raios X do pó micrométrico.	Erro! Indicador não definido.
Figura 49: Microscopia da mistura dos pós de ferro e de silício.	Erro! Indicador não definido.
Figura 50: Curva de compressibilidade do ferro puro e do ferro-silício. Erro! Indicador não definido.	
Figura 51: Densidade do ferro puro a verde e sinterizado.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 52: Densidade do ferro-1%silício a verde e sinterizado.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 53: Densidade do ferro-2%silício a verde e sinterizado.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 54: Densidade do Ferro-3%Silício a verde e sinterizado.	Erro! Indicador não definido.
Figura 55: Densidade do Ferro puro e do Ferro-silício sinterizado.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 56: Metalografia do ferro puro (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 57: Metalografia do ferro-1%silício (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%. .	Erro! Indicador não definido.

Figura 58: Metalografia do ferro-2% silício (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%. . **Erro! Indicador não definido.**

Figura 59: Metalografia do ferro-3% silício sem ataque (A) região central (B) periferia. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 60: Metalografia do ferro-3% silício atacado com nital 2%. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 61: Dureza em função da composição das ligas e da pressão de compactação. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 62: Microdureza em função da composição das ligas e pressão de compactação. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 63: Curva de histerese do ferro puro, freq. 0,05 Hz. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 64: Curva de magnetização do ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 65: Curva de histerese e magnetização do ferro-1% silício **Erro! Indicador não definido.**

Figura 66: Curva de histerese do ferro-2% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 67: Curva de magnetização do ferro-2% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 68: Curva de histerese do ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 69: DSC/TGA do polipropileno. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 70: DSC/TGA do polietileno de baixa densidade linear. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 71: DSC/TGA do polimetil-metacrilato. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 72: DSC/TGA do etileno-acetato de vinila. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 73: DSC/TGA da parafina. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 74: DSC/TGA da cera de abelha. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 75: DSC/TGA da cera de carnaúba. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 76: DSC/TGA do ácido esteárico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 77: DSC/TGA da mistura de 25% de cera de abelha + 75% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 78: DSC/TGA da mistura de 50% de cera de abelha + 50% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 79: DSC/TGA da mistura de 75% de cera de abelha + 25% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 80: DSC/TGA da mistura de 25% de cera de carnaúba + 75% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**

- Figura 81: DSC/TGA da mistura de 50% de cera de carnaúba + 50% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 82: DSC/TGA da mistura de 75% de cera de carnaúba + 25% de parafina. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 83: Avaliação reológica do PP **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 84: Avaliação reológica do PEBDL..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 85: Avaliação reológica do PMMA. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 86: Avaliação reológica do EVA. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 87: Avaliação reológica de 75% PP – 180°C. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 88: Avaliação reológica de 75% PEBDL a 180 °C. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 89: Avaliação reológica do PEBDL com a adição de cera. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 90: Avaliação reológica do PEBDL com a adição de cera de abelha e parafina. . **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 91: Avaliação reológica do PEBDL com a adição de cera de carnaúba e parafina. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 92: PEBDL com a adição de parafina e cera de carnaúba ou abelha. . **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 93: DSC/TGA da carga injetável comercial de ferro-silício..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 94: Avaliação reológica da carga injetável comercial de ferro-3% silício..... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 95: Micrografia da carga injetável de ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 96: Metalografia do ferro-3% silício (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%. . **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 97: Metalografia do ferro-3% silício atacada com nital 2%. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 98: Espectro de difração de raios-X de peça injetada Ferro3% Silício comercial. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 99: Curva de histerese do ferro-3% silício comercial. .. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 100: Curva de magnetização do ferro-3% silício comercial. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 101: Carga injetável com 66% (volume) de pó de ferro puro micrométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 102: Carga injetável com 64% (volume) de pó de ferro puro micrométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 103: Carga injetável com 60% (volume) de pó de ferro puro micrométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 104: Micrografia da carga injetável de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 105: DSC/TGA da carga injetável laboratorial de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 106: Avaliação reológica da carga injetável de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 107: Avaliação reológica da carga injetável de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 108: Micrografia da carga injetável de ferro puro extraído quimicamente. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 109: Micrografia da carga injetável de ferro puro extraído termicamente. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 110: DSC/TGA da cera de carnaúba extraída termicamente das amostras. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 111: Metalografia do ferro puro (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 112: Metalografia das amostras de ferro puro atacada com 2% nital. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 113: Microdureza da amostra de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 114: Dureza da amostra de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 115: Ensaio de tração do ferro puro injetado. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 116: Espectro de difração de raios X da peça de ferro micrométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 117: Curva de histerese e magnetização do ferro puro injetado. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 118: Micrografia da carga injetável de ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 119: Metalografia de ferro-3% silício (A) sem ataque (B) atacado com nital 2%. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 120: Metalografia das amostras de ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 121: Microdureza da amostra injetada de ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 122: Dureza da amostra injetada de ferro-3% silício. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 123: Ensaio de tração do ferro-3% silício micrométrico injetado e sinterizado. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 124: Espectro de difração de raios-X da peça de ferro 3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 125: Curva de histerese do ferro-3% silício. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 126: Micrografia de ferro puro com (A) 2 horas e (B) 6 de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 127: Micrografia de ferro puro com (A) 10 horas e (B) 14 de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 128: Micrografia de ferro puro com (A) 18 horas e (B) 28 de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 129: Micrografia de ferro puro com (A) 32 horas e (B) 36 de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 130: Micrografia de ferro puro com (A) 43 horas e (B) 47 de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 131: Evolução da moagem do pó de ferro. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 132: Micrografia de ferro puro após 53 horas de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 133: Micrografia de ferro puro após 53 horas de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 134: Micrografia de ferro puro após 53 horas de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 135: Micrografia de ferro puro após 53 horas de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 136: Micrografia de ferro puro após 53 horas de moagem. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 137: Análise no MET de ferro puro nanométrico **Erro! Indicador não definido.**

Figura 138: Espectro de difração de raios X do pó nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 139: Adição de ferro puro nanométrico em ferro micrométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 140: Metalografia do ferro micrométrico com 10% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 141: Metalografia do ferro micrométrico com 20% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 142: Metalografia do ferro micrométrico com 30% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 143: Metalografia do ferro micrométrico com 40% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 144: Metalografia do ferro micrométrico com 50% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 145: Metalografia do ferro micrométrico com 60% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 146: Metalografia do ferro micrométrico com 70% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 147: Metalografia do ferro micrométrico com 80% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 148: Metalografia do ferro micrométrico com 90% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 149: Microdureza das amostras com adição de pó de ferro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 150: Densidade do ferro puro nanométrico à verde e sinterizado. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 151: Metalografia do ferro nanométrico (A) sem ataque (B) atacado. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 152: Metalografia do ferro puro nanométrico atacado com nital 2%. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 153: EDS da região escura da metalografia do ferro puro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 154: Reometria da carga injetável I. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 155: Reometria da carga injetável III. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 156: Micrografia da carga injetável de ferro puro nanométrico (MEV). **Erro! Indicador não definido.**

Figura 157: Micrografia da carga injetável de ferro puro extraído quimicamente. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 158: Micrografia da carga injetável de ferro puro extraído termicamente..... **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 159: Barra de tração de ferro nanométrico injetada. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 160: Barra de tração e flexão de ferro nanométrico extraída quimicamente. **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 161: Anel de ferro nanométrico extraída com 100% de hexano. . **Erro! Indicador não definido.**

Figura 162: Barra de flexão de ferro nanométrico extraída com THF. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 163 Barra de flexão de ferro nanométrico em *Wick Debinding*... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 164: Barra de tração de ferro nanométrico extraída com *Wick Debinding*..... **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 165: Barra de tração de ferro nanométrico extraída com percentual de hexano... **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 166: Anel de ferro nanométrico extraída com percentual de hexano . **Erro! Indicador não definido.**

Figura 167: Metalografia da barra de tração T 03 sem ataque atacada com nital 2%..... **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 168: Microdureza da amostra injetada de ferro nanométrico HV 0,1. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 169: Dureza da amostra injetada de ferro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 170: Ensaio de tração da amostra T 03 do ferro nanométrico injetado..... **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 171: Espectro de difração de raios-X da peça injetada pó nanométrico. **Erro!**
Indicador não definido.

Figura 172: Curva de histerese e magnetização do ferro puro nanométrico. . **Erro! Indicador não definido.**

Figura 173: Reometria da carga injetável III com ferro micrométrico e 25% nanométrico.
 **Erro! Indicador não definido.**

Figura 174: Metalografia da barra de tração T 03 sem ataque atacada com nital 2%..... **Erro!**
Indicador não definido.

- Figura 175: Microdureza da amostra de ferro micrométrico com percentual nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 176: Dureza da peça ferro micrométrico com percentual nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 177: Ensaio de tração do ferro micrométrico com 25% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 178: Curva de histerese e magnetização do ferro micrométrico c/ 25% nano. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 179: Mini-servomotor montado no Solidworks®. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 180: Mini-servomotor de passo montado em vista explodida. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 181: Detalhamento do mini-servomotor de passo no Solidworks®. .. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 182: Rotor 0 e rotor 1 com a malha gerada pelo FEMM. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 183: Rotor 2 e rotor 3 com a malha gerada pelo FEMM. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 184: Rotor 3 arredondado e rotor 4 com a malha gerada pelo FEMM. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 185: Rotor 5 e rotor 6 com a malha gerada pelo FEMM. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 186: Rotor 0 com 2 circuitos e rotor 1 com 1 circuito ligado. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 187: Rotor 2 e rotor 3 com 2 circuitos ligados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 188: Rotor 3 arredondado e rotor 4 com 2 circuitos ligados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 189: Rotor 5 e rotor 6 com 2 circuitos ligados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 190: Vetores da densidade de fluxo magnético do rotor 0. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 191: Densidade de fluxo máxima no entreferro com fio AWG 26. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 192: Torque com fio AWG 26. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 193: Densidade de fluxo máxima no entreferro com fio AWG 30. **Erro! Indicador não definido.**

- Figura 194: Torque com fio AWG 30. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 195: Densidade de fluxo máxima no entreferro com fio AWG 42. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 196: Torque com fio AWG 42. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 197: Comparativo de torque dos mini-motores de passo. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 198: Estator e rotor com a malha gerada pelo *Plastic Simulation*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 199: Preenchimento do estator gerado pelo *Plastic Simulation*. ... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 200: Preenchimento do estator gerado pelo *Plastic Simulation*. ... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 201: Temperatura da frente de fluxo gerado pelo *Plastic Simulation*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 202: Tempo de preenchimento gerado pelo *Plastic Simulation*. ... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 203: Tensão de cisalhamento gerado pelo *Plastic Simulation*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 204: Preenchimento do rotor gerado pelo *Plastic Simulation*. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 205: Distribuição das cavidades e canais de alimentação. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 206: Molde com insertos montados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 207: Insertos das cavidades superior e inferior. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 208: Distribuição dos extratores das peças. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 209: Molde montado do mini-servomotor. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 210: Inseto montado do mini-servomotor no molde... **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 211: Mini-servomotores de passo injetados e sinterizados. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 212 Metalografia do estator 30% de contração para visualização. **Erro! Indicador não definido.**
- Figura 213: Metalografia do estator 30% de contração (A) sem ataque (B) atacada. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 214: Metalografia do rotor 30% de contração para visualização. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 215: Metalografia do rotor 30% de contração para visualização porosidade. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 216: Metalografia do estator 30% de contração para visualização. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 217: Metalografia do estator 30% de contração para visualização porosidade. ... **Erro! Indicador não definido.**

Figura 218: Metalografia do estator de pó nanométrico com 30% de contração. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 219: Metalografia do estator 30% de contração sem ataque atacada com nital. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 220: Microdureza do estator 30% de contração. **Erro! Indicador não definido.**

Figura 221: Esquema elétrico do sistema de acionamento135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características e conteúdos do sistema aglutinante proposta	36
Tabela 2: Propriedades magnéticas para materiais por M/P em correntes contínua	56
Tabela 3: Propriedades magnéticas para peças de ferro puro por M/P.	57
Tabela 4: Propriedades físicas e magnéticas de chapas Fe-Si	58
Tabela 5: Propriedades físicas, magnéticas e elétricas de ligas macias SMC	61
Tabela 6: Propriedades Magnéticas para vários ferros puros por M/P	63
Tabela 7: propriedades do material pela variação na composição ou parâmetros.	65
Tabela 8: Curva de magnetização X perdas do AccuCORE®	71
Tabela 9: Cargas injetáveis utilizadas	88
Tabela 10: Teores de elementos orgânicos no pó de ferro puro.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 11: Densidades, densificação e contração volumétrica do sinterizado.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 12: Propriedades magnéticas das amostras compactadas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 13: Densidades, densificação e contração volumétrica do sinterizado.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 14: Peças injetadas para ensaio de tração, flexão e propriedades magnéticas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 15: Peça sinterizadas para ensaio de tração, flexão e propriedades magnéticas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 16: Dados das peças injetadas e sinterizadas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 17: Microdurezas e durezas das amostras sinterizadas de ferro-3%silício.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 18: Propriedades mecânicas das amostras sinterizadas no ensaio de tração.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 19: Espectrometria das amostras de ferro-silício comercial.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 20: Amostras injetadas para ensaio de tração, flexão e propriedades magnéticas.	Erro! Indicador não definido.
Tabela 21: Amostras sinterizadas de ferro puro p/ ensaio de tração, flexão e magnetismo.	Erro! Indicador não definido.

Tabela 22: Propriedades mecânicas das amostras sinterizadas no ensaio de tração **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 23: Espectrometria das amostras injetadas de ferro puro. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 24: Amostras de ferro-3%silício para ensaio de tração, flexão e magnetismo. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 25: Amostras de ferro-3%silício para ensaio de tração, flexão e magnetismo. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 26: Dados das peças injetadas e sinterizadas **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 27: Propriedades mecânicas das amostras ferro-3%silício no ensaio de tração. ... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 28: Espectrometria das amostras de ferro-silício **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 29: Espectrometria das amostras compactadas de ferro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 30: Amostras injetadas para ensaio de tração, flexão e propriedades magnéticas. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 31: Amostras para ensaio de tração, flexão e propriedades magnéticas. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 32: Dados das peças injetadas e sinterizadas **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 33: Propriedades mecânicas das amostras ferro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 34: Espectrometria das amostras injetadas de ferro puro nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 35: Peças injetadas para ensaio de tração e propriedades magnéticas. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 36: Peças sinterizadas de ferro micrométrico com percentual nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 37: Amostras inj. e sint. de ferro micrométrico com 25% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 38: Propriedades mecânicas das amostras ferro 25% nanométrico. ... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 39: Espectrometria das amostras injetadas de ferro 25% nanométrico. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 40: Estatores injetadas na matriz de 30% de contração de pó micrométrico..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 41: Estatores injetadas na matriz de 30% de contração extraídos e sinterizadas.. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 42: Rotores injetados na matriz de 30% de contração de pó micrométrico..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 43: Rotores injetados na matriz 30% de contração extraídos e sinterizadas. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 44: Estatores injetados na matriz de 30% de contração..... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 45: Estatores injetadas 30% de contração extraídos e sinterizadas. ... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 46: Estatores injetados de pó nanométrico com 30% de contração.... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 47: Estatores injetadas 30% extraídos e sinterizadas... **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 48: Teores de elementos orgânicos nos mini-motores. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 49: Avaliação comparativa dos custos laboratoriais dos estoques. **Erro! Indicador não definido.**

Tabela 50: Avaliação comparativa dos custos industriais dos estatores. **Erro! Indicador não definido.**

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[cm ²]
At	Área da seção transversal	[mm ²]
B	Densidade de fluxo magnético	[T]
B _{máx}	Densidade de fluxo magnético máximo	[T]
B _s	Indução de saturação (máxima indução)	[T]
B _r	Retentividade magnética	[T]
CV	Contração volumétrica	[%]
D	Tamanho de grão ou cristalito	[μm]
dAP	Densidade aparente do pó	[g/cm ³]
d _{ext}	Diâmetro externo do anel	[mm]
d _{int}	Diâmetro interno do anel	[mm]
d _S	Diâmetro de Secção	[mm]
<i>e</i>	Constante magnética	[-]
EFF _n	Eficiência energética	[%]
F	Carga de Escoamento	[N]
<i>f</i>	Frequência do campo aplicado	[Hz]
FC	Fluxo de Calor	[W/g]
F _d	Faixa de degradação	[°C]
F _{máx}	Carga máxima	[N]
h	Altura	[cm]
H	Intensidade de campo magnético	[A/m]
H _c	Coercitividade magnética ou força coercitiva (S.I)	[A/m]
H _c	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[Oe]
H _{máx}	Intensidade de campo magnético máximo	[A/m]
<i>i</i>	Corrente elétrica aplicada	[A] ou [mA]
J	Polarização	[T]
K ₁	Anisotropia magnetocristalina	[-]
l	Comprimento (Perímetro)	[m]
L	Largura da peça	[mm]
RT	Limite de Resistência a Tração	[MPa]
m	Massa	[g]
m _i	Massa do injetado	[g]

mq	Massa extraída quimicamente	[g]
mt	Massa extraída termicamente	[g]
ms	Massa do sinterizado	[g]
<i>M</i>	Magnetização	[$\mu\text{m/g}$]
<i>Ms</i>	Magnetização de Saturação	[$\mu\text{m/g}$]
m/m	Percentual em massa x 100	[%]
<i>n</i>	Rotações por minuto	[RPM]
<i>n</i>	Constante magnética	[-]
<i>Np</i>	Número de espiras no enrolamento primário	[-]
<i>P</i>	Peso	[mg]
<i>P</i>	Peso na calorimetria diferencial	[%]
<i>Pe</i>	Potência elétrica	[W] ou [mW]
<i>Pi</i>	Pressão de Injeção	[MPa]
<i>Pc</i>	Pressão de compactação	[MPa]
<i>Ptot</i>	Perda total de energia	[W]
<i>Qext</i>	Quadrado externo	[mm]
<i>r</i>	Raio da esfera	[cm]
<i>R</i>	Resistência elétrica	[Ω]
<i>R₁</i>	Curvaturas da superfície das partículas	[L]
<i>R₂</i>	Curvaturas da superfície das partículas	[L]
<i>RT</i>	Limite de resistência à tração	[MPa]
<i>T</i>	Temperatura	[°C]
<i>Ti</i>	Tempo de injeção	[s]
<i>Tc</i>	Temperatura de Curie	[K]
<i>Tf</i>	Temperatura de fusão	[°C]
<i>Tm</i>	Temperatura de molde	[°C]
<i>Tn</i>	Torque	[mNm]
<i>Ts</i>	Temperatura de sinterização	[°C]
<i>V</i>	Tensão Elétrica aplicada	[V]
<i>Vc</i>	Viscosidade	[Pa.s]
<i>Vi</i>	Volume do injetado	[cm ³]
<i>Vol</i>	Volume	[cm ³]
<i>Vs</i>	Volume do sinterizado	[cm ³]
<i>Vt</i>	Volume extraído termicamente	[cm ³]

W	Energia dissipada	[W]
WB/h	Perdas elétricas no ferro	[W/kg]
WB/f	Perdas elétricas no entreferro	[W/kg]
We	Perdas elétricas por correntes de Foucault (<i>Eddy current</i>)	[W/kg]
Wh	Perdas elétricas por histerese	[W/kg]
Wm	Perdas máximas	[kJ/m ³]
Wn	Perdas no núcleo	[W/kg]
Wr	Perdas elétricas residuais	[W/kg]
Wtot	Perdas elétricas totais	[W/kg]
x	Espessura da peça	[m]
$\dot{\gamma}$	Taxa de Cisalhamento do polímero	[1/s]

SÍMBOLOS GREGOS

γ	Tensão superficial	[mN/m]
δ	Alongamento	[%]
μ	Permeabilidade magnética	[H/m]
μ_0	Permeabilidade magnética no vácuo	[H/m]
μ_{in}	Permeabilidade magnética inicial	[H/m]
$\mu_{m\acute{a}x.}$	Permeabilidade magnética máxima	[H/m]
$\mu_{cm\acute{a}x}$	Permeabilidade magnética calculada máxima	[H/m]
$\mu_{sm\acute{a}x}$	Permeabilidade magnética dada pelo <i>programa</i> máxima	[H/m]
μ_r	Permeabilidade relativa	[-]
π	Pi da matemática (3,14159)	[-]
ρ	Densidade	[g/cm ³]
ρ_e	Resistividade elétrica	[Ω .m]
ρ_r	Densidade relativa	[%]
ρ_s	Densidade do sinterizado	[g/cm ³]
ρ_v	Densidade a verde	[g/cm ³]
ρ_{mq}	Densidade marrom química	[g/cm ³]
ρ_{mt}	Densidade marrom térmica	[g/cm ³]
ρ_M	Densidade do material	[g/cm ³]
σ	Tensão	[MPa]
σ_p	Tensão da partícula	[MPa]

σ_e	Limite de escoamento	[MPa]
\varnothing	Diâmetro	[mm]
ε	Deformação	[mm/mm]

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	Tridimensional
μ -MIM	Micro Moldagem de pós metálicos por injeção
μ -PIM	Micro Moldagem de pós por injeção
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno (<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>)
AC	Corrente elétrica alternada
AFPM	Motores de fluxo axial com ímã permanente
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Sistema americano para a classificação dos aços)
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AWG	Escala americana normalizada - <i>American Wire Gauge</i>
CAD	Desenho assistido por computador (<i>Computer Aided Design</i>)
CAE	Engenharia assistida por computador (<i>Computer Aided Engineering</i>)
CAM	Manufatura assistida por computador (<i>Computer Aided Manufacture</i>)
CC	Corrente elétrica contínua
CCC	Estrutura cristalina Cúbica de Corpo Centrado
CIM	Moldagem de cerâmicas por injeção (<i>Ceramic Injection Moulding</i>)
DSC	Calorimetria diferencial de varredura
EAA	Etileno-ácido acrílico
EBA	Etileno-butil acrilato
EDS	Espectroscopia de energia dispersiva
EVA	Etileno-acetato de vinila
Fe α	Fase Microestrutural ferrita
FEMM	Método magnético de elementos finitos (<i>Finite Element Method Magnetics</i>)
GMR	Efeito magneto resistiva gigante
Hb	Motores híbridos (<i>Hybrid</i>)
HB	Dureza (<i>Hardness</i>) Brinell
HV	Dureza (<i>Hardness</i>) Vickers
HIP	Prensagem isostática a quente (<i>Hot Isostating Pressing</i>)
LACER	Laboratório de materiais cerâmicos
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica
LMEAE	Laboratório de máquinas elétricas, Acionamento e energia.
MAE	Moagem de alta energia

MEF	Método de Elementos Finitos
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MET	Microscópio eletrônico de transmissão
MEMS	Sistemas micro-eletromecânicos (<i>Micro-Electromechanical Systems</i>)
MIM	Moldagem de pós metálicos por injeção (<i>Metal Injection Moulding</i>)
M/P	Metalurgia do pó convencional
MPIF	Federação das indústrias de pó metálico (<i>Metal Powder Industries Federation</i>)
PA	Poliamida (náilon)
PEAD	Polietileno de alta densidade
PEBD	Polietileno de baixa densidade
PEBDL	Polietileno de baixa densidade linear
PEG	Polietileno glicol
PET	Poli (tereftalato de etileno)
PIM	Moldagem de pós por injeção (<i>Powder Injection Moulding</i>)
PM	Motores de ímã permanente (<i>Permanent Magnet</i>)
PMMA	Polimetil-metacrilato
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Cloreto de polivinila
R\$	Real (moeda brasileira)
SAED	Difração de elétrons de área selecionada (<i>selected area electron diffraction</i>)
SMC	Compósito magnético macio (<i>soft magnetic composite</i>)
TCH	Traçador de Curvas de Histerese
TFMs	Geradores de fluxo transversal
THF	Tetrahidrofurano
TGA	Análise termogravimétrica
VC	Carbeto de vanádio
VR	Motores de relutância variável (<i>Variable Reluctance</i>)
WC	Carbeto de tungstênio
ZnO	Óxido de zinco

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo geral a obtenção de rotores e estatores de mini-motor de passo, ambos aplicados na área médica, pelo processo de metalurgia do pó. A pesquisa é desenvolvida e dividida em quatro fases. Na **Fase 1**, as propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas do ferro puro e com adição de 1, 2, 3% de silício, obtidos por metalurgia do pó convencional, foram estudadas a partir da observação da morfologia das partículas por microscopia eletrônica e granulometria a laser. Ainda, foram realizadas a compactação e sinterização do ferro puro (9 µm) e ferro com adições de percentuais de silício e avaliadas as densidades. Realizaram-se ensaios de dureza e microdureza para determinação das propriedades mecânicas, traçaram-se as curvas de histerese e mediram-se a resistividade das amostras. A **Fase 2** destinou-se a determinar o polímero estrutural e o melhor lubrificante a serem utilizados no processo de injeção. Realizaram-se reologia e DSC/TGA dos seguintes polímeros: polipropileno, polietileno de baixa densidade linear, polimetil-metacrilato e etileno-acetato de vinila. Foi definido o Polietileno de baixa densidade linear como polímero estrutural e, parafina e cera de carnaúba como lubrificantes mais adequados ao processo. Ainda, injetou-se pó de ferro puro e pó de ferro com 3% de silício micrométrico e as propriedades físicas, mecânicas, magnéticas e elétricas foram quantificadas. Na **Fase 3** o pó de ferro foi moído por 53 horas em um moinho de alta energia obtendo partículas menores que 100 nanômetros. Avaliou-se o efeito da adição de pó nanométrico sobre o pó de ferro micrométrico através da análise de porosidade e de tamanho de grão, observados por metalografia e pelos resultados de microdureza. Com o pó de ferro 100% nanométrico determinou-se a curva de compressibilidade a partir de análises conjuntas de metalografia e microdureza. Produziu-se, ainda, carga injetável com o pó nanométrico. Injetaram-se corpos de prova e foram realizadas extrações químicas e térmicas, e sinterização. Posteriormente, caracterizou-se a densidade a verde, densidade marrom, densidade do sinterizado e contração volumétrica geral. Na **Fase 4** foi realizado o modelamento do mini-servomotor em CAD 3D (*SolidWorks*®) e simulado com o programa FEMM® 4.2, onde oito geometrias de rotores foram analisadas. O processo de injeção foi simulado com carga injetável caracterizada através da base de dados do “*Plastic Simulation*®”. Injetou-se o rotor e estator com pó de ferro micrométrico e também o estator com pó 25% nanométrico e pó 100% nanométrico. Mensurou-se a densidade a verde dos componentes microservomotor com pó micrométrico, marrom, contração volumétrica geral com média de 46%, sendo que a densidade dos sinterizados ficou com a média de 7,10 g/cm³ e foi caracterizada por metalografia. As contrações volumétricas gerais entre as peças injetadas e sinterizadas foram de 54,1%. O mini-servomotor com pó 100% micrométrico tem microdureza média de 102 HV, diminuindo com a adição de 25 % de pó nanométrico para o valor médio de 83 HV, e o pó 100% nanométrico aumentou significativamente a microdureza média para 152,5 HV. Este trabalho mostrou que é possível fabricar rotores e estatores de minimotores de passo por moldagem de pós por injeção de ferro puro e ligas de ferro-silício.

Palavras chave: Mini-servomotor, moldagem de pós por injeção, pós nanométricos, Fe puro, ferro1% silício, ferro2% silício, ferro3% silício e microMIM.

ABSTRACT

This work has as main objective the achievement of stators and rotors of mini-step motors, both applied in the medical field by powder metallurgy process. The research is developed and divided into four phases. In **Phase 1** the physical, mechanical, electrical and magnetic properties of pure iron and with the addition of 1, 2, 3% silicon, obtained by conventional metallurgy powder were studied from the observation of particle morphology by electron microscopy and laser particle size analysis. Thus, there were pure iron compaction and sintering (9 μm) and iron with percentage additions of silicon and evaluated the density. Were carried out microhardness and hardness test to determine the mechanical properties were traced hysteresis curves and were measured resistivity of the samples. **Phase 2** is designed to determine the structural polymer and the best lubricant to be used in the injection process. Were carried out rheology and DSC / TGA of the following polymers: Polypropylene, Linear low density polyethylene, Polymethyl methacrylate and Ethylene-vinyl acetate. The defined Linear low density polyethylene as a structural polymer, and paraffin wax, and carnauba wax as the most suitable process lubricants. Still, he injected pure iron powder and micrometer sized iron 3% silicon and the physical, mechanical, magnetic and electrical properties were quantified. In **Phase 3** the iron powder was milled for 53 hours in a high energy mill obtain particles smaller than 100 nanometers. We evaluated the effect of adding nano powder of the micrometer sized iron powder by analyzing the porosity and grain size observed by metallography and microhardness results. With the 100 % nanometer of iron powder was determined as compressibility curve of joint analysis of metallography and microhardness. Produced was also binder with nanometer powder, inject up specimens and were carried out chemical extraction, thermal and sintering subsequently, was marked green density, brown density, sintered density and general volumetric shrinkage. In **Phase 4** was carried the modeling of the mini-step motors out in CAD 3D (SolidWorks) and simulated with the FEMM ® 4.2 software, where eight geometries rotors are analyzed. The injection process was simulated with binder via characterized by Plastic Simulation database. The rotor and stator micrometer sized iron powder was injected, also, powder of 25% nanosized powder and 100% nanometer. It measured the density green of mini-step motors components with micrometer powder, brown, general volumetric shrinkage averaging 46%, and the density of sintered got an average of 7.10 g/cm^3 and was characterized by metallography. The general volumetric shrinkage between the injected and sintered parts was 54.1%. The mini-step motors with 100% micrometric powder has average hardness of 102 HV, decreasing with the addition of 25% nanosized powder to the average value of 83 HV, and 100% nano powder increased significantly, the average hardness for 152.5 HV.

Key words: Mini- step motors, metal injection moulding, nanosized powders, pure iron, iron1% silicon, iron2% silicon, iron3% silicon and microMIM.

1. INTRODUÇÃO

A área médica necessita de diversos motores de passo em pequenas dimensões para equipamentos de endoscopia, videolaparoscopia, coloscopia entre outros. No exemplo do endoscópio, um motor de passo permite a obtenção 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 (1).

Existem vários trabalhos envolvendo motores aplicados a sistemas micro-eletromecânicos - MEMS (*Micro-Electromechanical Systems*) (2), (3), (4), (5). Esses motores são também chamados de motores de pólos salientes (*salient-pole motors*) (6) e motores de passo (*step motors*) (7), (8), (9).

O motor de passo é um dispositivo eletro-mecânico com capacidade de converter pulsos elétricos em movimento de rotação, movimentando uma carga a incrementos precisos (7), (8), (9). Tradicionalmente os motores são construídos a partir de finas lâminas metálicas, na forma de chapas de espessura menor que 1 mm. Isto ocorre para redução das correntes parasitas que são causa de uma apreciável perda nos motores (10). Por se tratarem de motores muito pequenos e apresentarem uma forma de acionamento simples, podem-se empregar para confecções destes, processos alternativos ao tradicional conjunto de pacote de chapas laminadas em motores maiores (11).

O objetivo geral deste trabalho é o estudo, projeto, fabricação e caracterização de rotores e estatores de um motor de passo obtidos a partir do processo de Moldagem de Pós por Injeção (PIM) com partículas nanométricas para aplicação médica. Para obtenção das peças do estator e rotor foram utilizados pós de ligas ferromagnéticas como ferro puro e ferro com 1, 2 e 3% de silício com tamanho de partículas de 10 μm e menor que 0,1 micrometros, ou seja, de ordem nanométrica. Os objetivos específicos deste trabalho são divididos em 16 etapas:

- 1) O processamento das ligas ferromagnéticas supracitadas por metalurgia do pó convencional para avaliação prévia das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas.
- 2) Definição dos lubrificantes e polímeros estruturais através de ensaios reológicos, que nortearam a relação exata para a composição da carga injetável.
- 3) Comparação da combinação dos lubrificantes e polímeros estruturais com um sistema de aglutinante comercial para a validação da composição desenvolvida.

- 4) Determinação de parâmetros de processamento de injeção com a carga injetável das ligas dos pós micrométricos definidos.
- 5) Simulação numérica do processo de injeção da geometria do mini-motor.
- 6) Injeção dos corpos de prova com as composições supracitadas para determinação das propriedades físicas e magnéticas.
- 7) Estudo da degradação térmica para eliminação da carga polimérica e dos hidrocarbonetos através de DSC/TGA juntamente com a avaliação da curva de extração térmica.
- 8) Caracterização das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas das ligas ferromagnéticas injetadas.
- 9) Moagem de alta energia dos pós micrométricos com finalidade de obtenção de pó nanométricos.
- 10) Avaliação da interação do pó de ferro micrométrico com percentual de pó nanométrico para avaliação do preenchimento entre as partículas micrométricas e melhoria das propriedades.
- 11) Desenvolvimento do método de preparação da carga com pós nanométricos para o processamento por moldagem de pós por injeção.
- 12) Injeção dos corpos de prova de carga com pós nanométricos, extração química e térmica, juntamente com a sinterização para determinação das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas com suas devidas caracterizações.
- 13) Avaliação do efeito nanomagnético nas peças de ferro injetadas com pós nanométricos posterior a sinterização.
- 14) Simulação das propriedades magnéticas no modelo do mini-servomotor em desenvolvimento e determinação da melhor geometria.
- 15) Simulação para análise de desempenho como torque e fluxo de entreferro, usando um programa de elementos finitos FEMM.
- 16) Projeto e fabricação do inserto do molde do minimotor e injeção com carga injetável de pós-micrométricos para determinação de processamento adequado.
- 17) Injeção do estator e do rotor para o desenvolvimento de mini-servomotor com a carga injetável de pós parcial e totalmente nanométricos, extração química e térmica, juntamente com a sinterização.
- 18) Determinação das propriedades físicas, mecânicas com suas devidas caracterizações do estator e do rotor para o desenvolvimento de mini-servomotor.

A Figura 1 apresenta um diagrama de bloco em resumo da rota experimental adotada de obtenção dos componentes do micromotor de passo para o desenvolvimento deste trabalho.

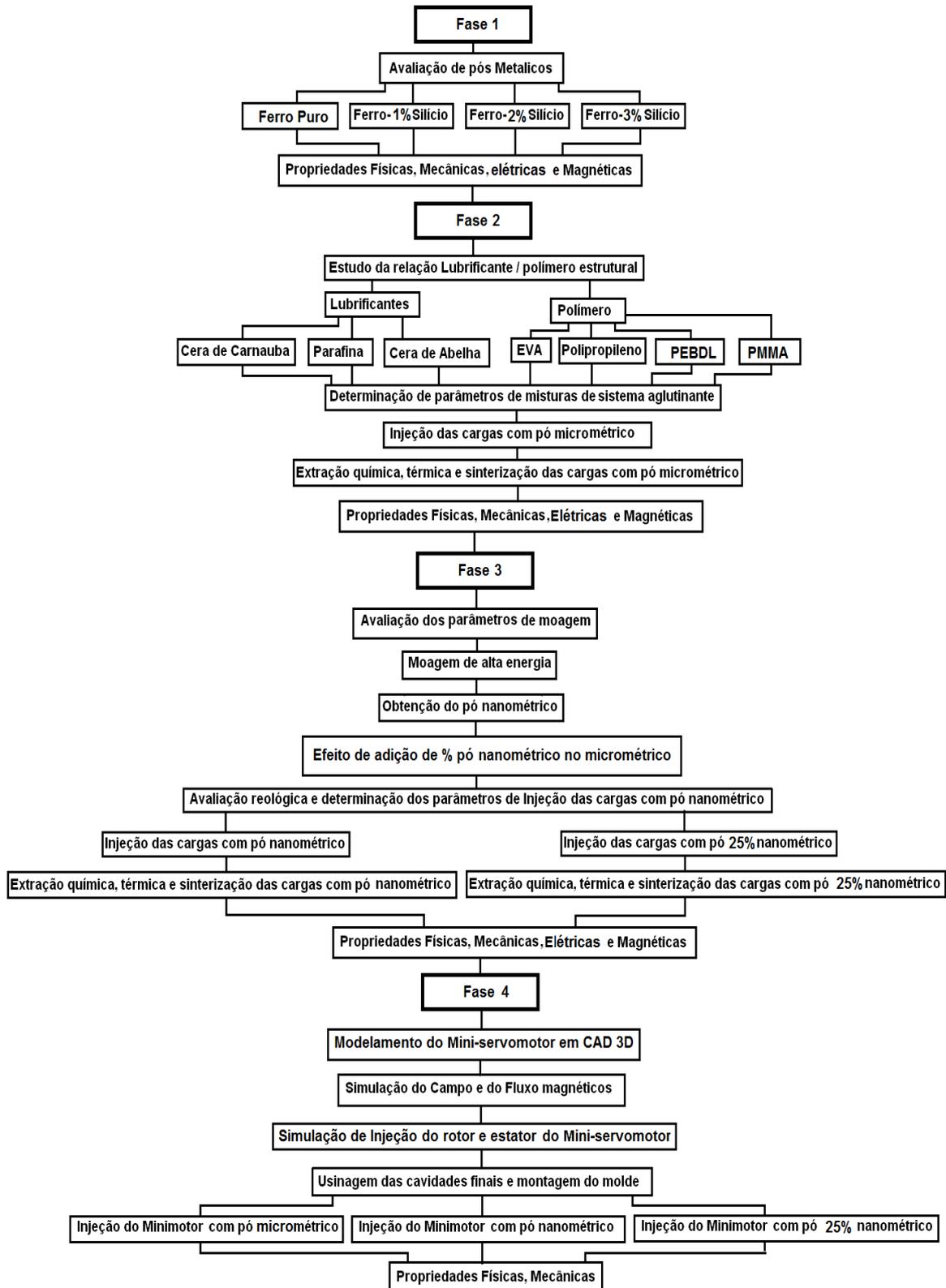


Figura 1: Diagrama de bloco que sumariza a rota da pesquisa.

Dadas as considerações anteriores, deve-se originalidade do tema no foco principal da fabricação de rotores e estatores de mini-servomotor produzido por micromoldagem de pós por injeção (μ MIM) com partículas nanométricas. E para este objetivo principal ser atendido outros aspectos de ineditismo relevantes neste trabalho devem ser levados em conta. O primeiro é a caracterização do comportamento entre os polímeros e as ceras para aplicação em cargas injetáveis com pós nanométricos. Juntamente com alteração das propriedades pela influência do processo de fabricação das peças com o mesmo material. O segundo aspecto foi a análise de viabilidade de fabricação dos componentes para o mini-servomotor produzido por um processo em expansão no mundo que é a moldagem de pós por injeção contra micromotores obtidos por sistemas micro-eletromecânicos e micro-usinagem (7), (8), (9).

Importante salientar que este projeto, integrou ao projeto de pesquisas na área de motores conveniados com FEEVALE, ULBRA e IFSUL junto a Capes que aportou o valor financeiro ao Projeto “Desenvolvimento de órteses e implantes a partir de pós nanométricos aplicados a fabricação de microcomponentes”. Desta forma, este trabalho traz benefícios para as empresas e avanço científico e tecnológico no desenvolvimento em nanotecnologia no Brasil.

Alguns trabalhos (12) desenvolveram a fabricação de motores pelo processo de moldagem de pós por injeção. Porém, a utilização da μ MIM, que nos últimos anos vêm ganhando um espaço cada vez maior e o pó nanométrico com sua difícil injetabilidade, juntamente com o objetivo de construir um mini-servomotor para área médica faz deste trabalho um avanço da pesquisa de qualidade e inédita na nanotecnologia mundial.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta diversos trabalhos que contribuíram para embasamento teórico os quais nortearam o desenvolvimento desta pesquisa.

2.1. Metalurgia do pó

A metalurgia do pó convencional consiste em conformar pós de metais, ligas metálicas e substâncias não metálicas ou cerâmicas em peças resistentes, no interior de uma ferramenta com formato desejado obtendo um "compactado à verde" por pressão mecânica, que é sinterizado. É adicionado lubrificante que tem a função de diminuir o atrito das partículas de pó entre si e o atrito destas com o ferramental de compactação. Peças fabricadas por metalurgia do pó possuem certa porosidade, que pode ser controlada através de fatores como pressão de compactação, temperatura e tempo de sinterização, tamanho e forma das partículas do pó, etc. (13). O efeito da morfologia dos pós de ferro sobre o seu comportamento de compactação foi estudada no caso de compactos com uma densidade final abaixo de 0,8 da densidade teórica (14).

A peça pronta apresenta bom acabamento superficial e adequada tolerâncias dimensionais. A metalurgia do pó tem o objetivo de transformar sem fusão efetiva com temperatura inferior ao ponto de fusão do material base do componente ou peça, pós metálicos ou não metálicos usando pressão e calor, através de um tratamento térmico chamado de sinterização permitindo obtê-los na sua forma final ou próximo dela (*near-net or net-shape*) (15).

Existem diversos processos que pertencem e complementam a metalurgia do pó como a compactação a quente (*warm compaction*) (16), a prensagem isostática a quente (*Hot Isostating Pressing - HIP*) (17), sinterforjamento (18), a moldagem de pós por injeção (*Powder Injection Moulding – PIM*) (19), entre outras técnicas.

Todas as vantagens fizeram a metalurgia do pó conquistar o mundo (20), (21), (22), (23). Cerca de 80% do PIM são componentes metálicos, ou seja, MIM (24). A moldagem de pós por injeção está dividida em dois grandes grupos que são a moldagem de cerâmicas por injeção (*Ceramic Injection Moulding – CIM*) (19) e a moldagem de pós metálicos por injeção (*Metal Injection Moulding – MIM*) (25).

2.2. Moldagem de pós Metálicos por Injeção - MIM

A partir de uma matéria-prima homogênea, com pós finos é produzida através da mistura com um agente aglutinante termoplástico. Este ligante serve para combinar um processo de fabricação, que é a capacidade de moldar a partir de materiais poliméricos com a tecnologia de sinterização do pó, ambas bem estabelecidas (26). Este processo permite injetar diversos metais como ferro e as ligas ferrosas, titânio e suas ligas (27), (28), Níquel e suas ligas (29), aço inoxidável (30), (31), materiais magnéticos (32) e até metais refratários com W e suas ligas (33). Desde o início do processo MIM a geração total de patentes ultrapassou 300, até o ano de 2000, mas nos últimos anos a taxa diminuiu e hoje existem cerca de 200 patentes ativas no momento.

As estimativas de custos, capacidade e fatores competitivos se mantêm em equilíbrio, mas as expectativas do MIM vão dobrar mais uma vez e chegar a US\$ 2 bilhões em vendas anuais até 2017. O MicroMIM para instrumentos cirúrgicos minimamente invasivos estão sendo vendidos de 2 a 15 dólares cada (24). O processo exige diversas etapas conforme segue:

2.2.1. Obtenção e características do pó

A Obtenção dos pós é proveniente de vários processos de fabricação de pó como, por exemplo, atomização à água e gás, moagem, *mechanical alloying*, eletrólise e métodos químicos, incluindo a redução de óxidos, entre outros (34), (35). As características do processo de atomização foram abordadas neste trabalho devido ao pó de ferro inicial ter sido obtido por este processo, que pode ser definida como a produção de pós metálicos pela fusão do metal ou liga, geração de um filete de material líquido e posteriormente a desintegração deste filete através de fluido pressurizado e classificação do produto particulado em gotas e a seu subsequente resfriamento em partículas sólidas (36), (37).

2.2.2. Aditivos do processo de injeção

Diversos pesquisadores concentraram-se no efeito da composição do ligante sobre as propriedades reológicas das matérias-primas, em particular os papéis de componentes dos ligantes e suas inter-relações permanecem obscuros (38), (39), (40). Foram comparados quatro tipos de cera como a parafina, cera de carnaúba e de polietileno, Acrawax, servindo, juntamente com o polietileno linear de baixa densidade - PEBDL, como um ligante para o aço inoxidável 304L. Eles demonstraram que as duas últimas ceras exibiram uma viscosidade mais

elevada e fluxo pseudoplástico mais apropriada, decorrente de suas características polares (carnaúba é éster de ácido alquílo e Acrawax é uma amida secundária) formam ligações de hidrogênio com o pó metálico (41).

Pesquisadores estudaram os três tipos de ligantes poliméricos em diferentes copolímeros (etileno-butil acrilato - EBA, etileno-acetato de vinila - EVA, etileno-ácido acrílico - EAA). Eles observaram que, como a concentração em volume de um componente sólido aumentou para 30% em volume, além disso, a influência da composição do ligante em particular diminuiu as propriedades de fluxo (42).

Além disso, utilizou-se o método estatístico de Anderson-McLean (43) para estudar o índice de fluidez (inverso da viscosidade) e a pseudoplasticidade¹ das 15 formulações de ligantes. A investigação sistemática resultou em mapas de contorno, demonstrando como fluidez e pseudoplasticidade variam de acordo com os componentes do ligante (44).

O ácido esteárico pode ser extraído de gordura animal ou vegetal, sendo que as gorduras sólidas rendem muito mais devido a estearina ser sólida. Funciona como ativador no sistema de aceleração com enxofre, quando combinado com o óxido de zinco (Ácido esteárico + ZnO = Estearato de zinco) sendo a reação reversível (45). O ácido esteárico funciona com agente de acoplamento entre as ligações polares e apolares da carga de injeção sendo muito utilizado em baixos percentuais do sistema aglutinante (46), (47).

A cera de carnaúba (*carnauba wax* – C₆₀-O₂-H₁₁₀) é extraída das folhas da carnaubeira, muito utilizada na fabricação de velas, pastas polidoras, vernizes, impermeabilização de papel e auxiliar de processo em composições de fluoroelastômeros (45). Sendo uma cera muito utilizada como lubrificante nas cargas injetável devido a sua alta molhabilidade nas partículas de pó (47). A viscosidade a 99 °C está na faixa de 30 a 40 mPas (48).

A Parafina (*paraffin wax*) é formada por hidrocarbonetos saturados (alcanos) de cadeia aberta, geralmente com mais de 18 carbonos na molécula, muito utilizada como lubrificante, (45), (46). Diversas pesquisas realizadas utilizam a parafina como lubrificante (49). Os resultados das medições do teor de oxigênio indicam que a principal causa da deterioração da matéria-prima é a oxidação dos componentes da pasta, particularmente a parafina durante a reciclagem (50). A viscosidade a 65 °C é de 5,53 mPas (51).

A cera de abelha (*Beeswax*) é uma cera natural produzido na colmeia de abelhas. Trata-se principalmente de ésteres de ácidos graxos e vários álcoois de cadeia longa. Excelente

¹**Pseudoplasticidade** é o fenômeno da Lei de Potência que ocorre com maior frequência. Nestes fluidos a viscosidade aparente diminui com o aumento da taxa de deformação.

lubrificante na constituição de cargas injetáveis, geralmente substitui a cera de carnaúba atuando junto com a parafina e um polímero estrutural, sendo muito utilizado em combinação com o EVA e o PE (52), (53).

2.2.3. Polímeros aplicados em cargas injetáveis

Os materiais poliméricos são compostos de elevada massa molecular resultantes de reações químicas de polimerização e constituem o grupo mais importante de materiais não metálicos utilizados em aplicações industriais. Os polímeros são constituídos de monômeros, que são unidades estruturais repetidas. Existem os copolímeros que são formados por monômeros de diferentes tipos. Estes são constituídos por longas cadeias de moléculas orgânicas que formam estruturas não cristalinas ou semicristalinas e podem ser classificados em plásticos e elastômeros. Os plásticos são divididos em termoplásticos e termorrígidos também chamados de termofixos (termoendurecíveis em Portugal) (54).

Os termoplásticos são plásticos, que no seu aquecimento provoca o enfraquecimento das forças intermoleculares, tornando-os flexíveis ficando rígidos novamente após o resfriamento. Sendo este ciclo supracitado repetido diversas vezes, tornando esta uma das maiores vantagens. Alguns destes materiais podem ser citados como o polietileno de alta densidade e baixa densidade (PEAD e PEBD), o polietileno linear de baixa densidade (PEBDL), cloreto de polivinila (PVC), poliestireno (PS), poliamida (náilon - *nylon*), polipropileno (PP), poli (tereftalato de etileno) (PET), polimetil-metacrilato também chamado de acrílico (PMMA), etileno-acetato de vinila (EVA) e muitos outros (55). Diversos termoplásticos são utilizados como polímeros estruturais nas cargas injetadas.

O polietileno linear de baixa densidade (PEBDL - *Linear low-density polyethylene* - LLDPE) é um polímero linear que está em quase todos os mercados do polietileno de baixa densidade devido a sua baixa viscosidade, este é muito utilizado como polímero estrutural no processo de moldagem de pó metálico por injeção (47), (56).

O polipropileno (PP - *Polypropylene*) é o termoplástico mais vendido no mundo com sua fórmula molecular $(C_3H_6)_n$, sendo um material muito utilizado como polímero estrutural para uma carga injetável, pois permite a injeção de diversos materiais metálicos e cerâmicos com excelente custo (46), (57). O etileno-acetato de vinila (EVA - *Ethylene Vinyl Acetate*) é um copolímero de etileno e acetato de vinila, que possui a temperatura de fusão de 100 °C (58). Diversas pesquisas utilizam o EVA para formulação de uma carga injetável (*binder*) para utilização no processo MIM (59) e μ -MIM com uma carga injetável de 50% em volume de

60% EVA e 40% parafina (60). O EVA juntamente com a cera de abelha indicam que a viscosidade da cera pode reduzir a viscosidade da mistura em 2 a 3 vezes a ordem de grandeza. Isto sugere que a cera é um componente muito eficaz para reduzir a viscosidade global de matéria-prima para o processo MIM (61). A Tabela 1 apresenta algumas propriedades dos constituintes do sistema aglutinante. Sendo P de Polímero e A de Aglutinante.

Tabela 1: Características e conteúdos do sistema aglutinante proposta (47).

Código	Ligante	Densidade (ρ) [g/cm ³]	Temperatura de fusão (Tf) [°C]	Faixa de degradação (Fd) [°C]
P1	PP	0,90	160~165	350~470
P2	PEBDL	0,93	130	320~480
P3	PPMA	1,23	165	300~420
P4	EVA	0,94	120	300~400
A1	Parafina	0,91	58~60	180~320
A2	Cera de Carnaúba	0,99	83~91	250~440
A3	Cera de Abelha	0,96	62~65	250~440
A4	Acido esteárico	0,86	70.1	263~306

2.2.4. Preparação de cargas injetáveis

As misturas de variados pós para produzir a composição desejada e promover a homogeneização da matéria prima são realizadas em misturadores em “V”, “Y” ou duplo cone, que são próprios para a metalurgia do pó ou em misturas mais difíceis de homogeneizar pode ser usado o moinho de esferas (62).

A menor quantidade possível de aglutinante deve ser utilizada, mas a fração de pó em volume apropriado depende das características do pó, que na prática industrial varia de cerca de 0,5 a 0,7%. Vários tipos diferentes de misturadores estão disponíveis como os de lâmina Z (*Z blade*) e misturadores planetários.

Quando a quantidade de mistura é grande, sendo necessário assegurar a homogeneidade de matéria prima, utiliza-se extrusoras dupla rosca para a preparação final. O objetivo mais importante é assegurar que a totalidade da superfície de cada partícula seja revestida com ligante. Por vezes, o pó é pré-processado, a fim de facilitar e intensificar o contato entre a superfície das partículas e ligante (63), (64). A Figura 2 apresenta uma carga injetável homogênea de ferro micrométrico com 25% de pó nanométrico (65).

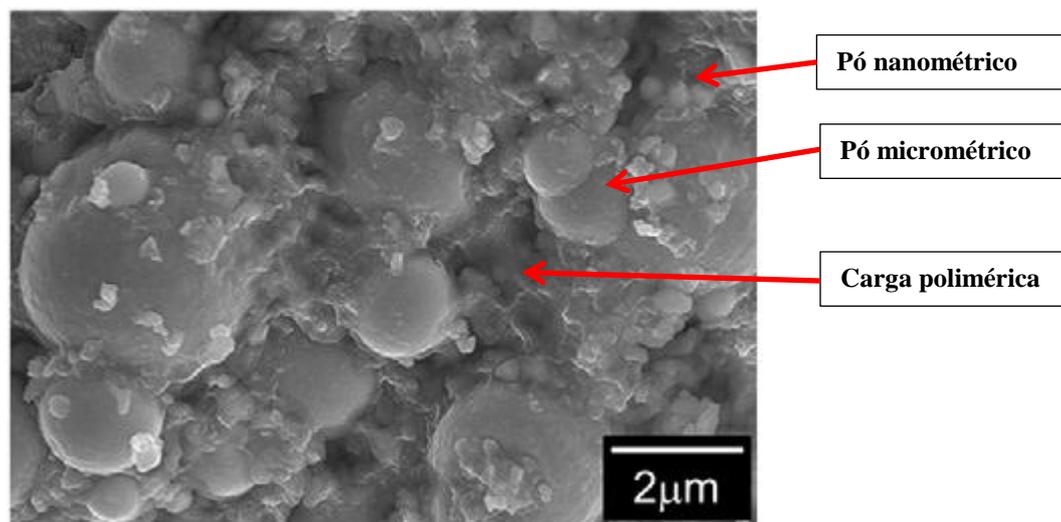


Figura 2: Micrografia de uma carga injetável de ferro (65).

2.2.5. Reologia de cargas metálicas

O estudo da mudança na forma e no fluxo do material chama-se de reologia, que é de enorme importância para conhecer o comportamento reológico dos sistemas multifásicos empregados em MIM. Possui um comportamento pseudoplástico devido ao polímero, que faz com que a viscosidade decresça com o aumento da taxa de cisalhamento. O conhecimento das propriedades reológicas da matéria prima está baseado no estudo da viscosidade e de sua sensibilidade à taxa de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e à temperatura (T). O comportamento da taxa de cisalhamento durante a moldagem geralmente varia no intervalo entre 100 e 10000 s^{-1} na temperatura do processo do polímero, onde a viscosidade máxima para moldagem é de 1000 Pa.s (66). A viscosidade (V_c) de um aglutinante deve ser inferior a 0,1 Pa.s, de forma a proporcionar matéria prima de PIM com viscosidade inferior a 103 Pa.s. Assim, os pesquisadores devem escolher corretamente uma configuração de teste para medidas reológicas. A reometria capilar é atualmente reconhecida como a melhor forma de prever o comportamento de fluxo dos compostos de PIM (67).

2.2.6. Simulação do processo de Injeção

A simulação do processo de injeção permite o posicionamento do ponto de injeção e vários conceitos são analisados durante as simulações realizadas. Ao escolher uma posição de injeção, o preenchimento do molde pelo método de elementos finitos pode prever os problemas ocorridos no eixo simétrico das peças lineares. A injeção lateral na extremidade do eixo poderia causar problemas de preenchimento do molde na ponta do bico e nas partes da

rosca. A Figura 3A mostra a peça simulada para determinar o ponto de entrada de injeção e a Figura 3B mostra as amostras, injetada (a verde) e sinterizada (68).

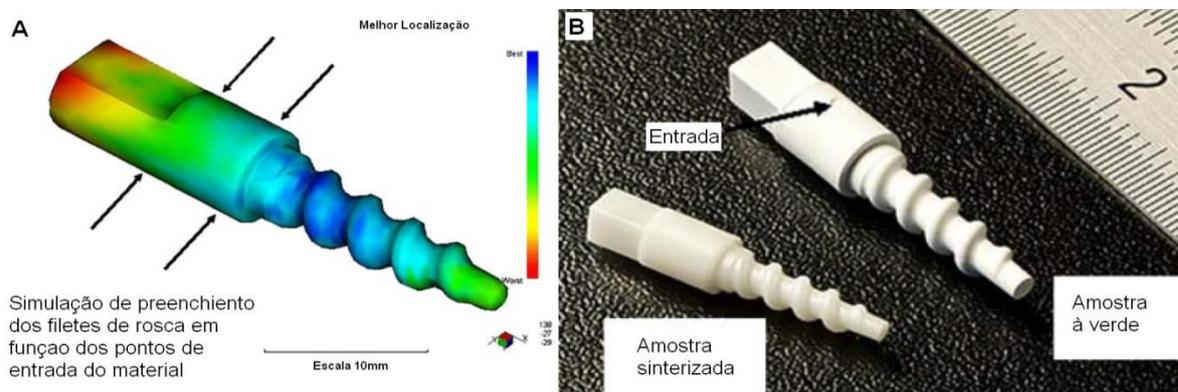


Figura 3: Micro peças simulada (A), injetada e sinterizada (B) (68).

A Figura 3 mostra que a injeção por meio de duas entradas no meio do eixo produziram bons resultados em termos de preenchimento do molde e poderiam ser facilmente concebidos. Devido ao tamanho do distribuidor, era necessário prever um controle na variação da temperatura dentro na ferramenta de injeção (68).

2.2.7. Moldes de injeção de moldagem de pós metálicos

A avaliação e o desempenho de processos de micromanufatura, ainda é uma condição importante e decisiva para o sucesso econômico da tecnologia de micro sistemas. Sendo a moldagem por injeção um processo bem adequado para a produção em série de médio e grande escala, que representa essa tecnologia. Atualmente, novas variantes de moldagem por injeção para micro processos de montagem reforça um aumento da gama de materiais que estão em desenvolvimento. Este problema atinge também a micromoldagem de pós por injeção juntamente com o tamanho do pó moldado e heterogeneidade durante o preenchimento da cavidade (69).

Outro problema das microcavidades é a rugosidade superficial, que é ainda muito alta para atender a exigência de produção em larga escala (60). A condição de superfície do micro molde deve ser modificada de forma sistemática por diferentes procedimentos de jateamento com micro esferas (*micro peening*). Deve se avaliar diferentes processos de usinagem e de acabamento mecânico de desempenho tribológico para microcomponentes como polimento por ultrassom (70). A Figura 4 apresenta a cavidade de um molde de ensaio de injetabilidade.

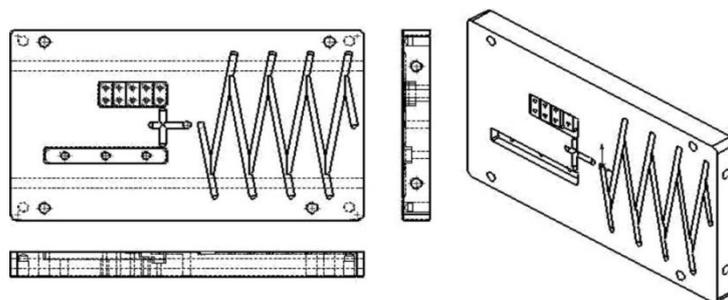


Figura 4: Cavidade de um molde para injetabilidade (71).

O custo de fabricação de moldes depende de um grande conjunto de fatores, desde número de cavidades, tamanho de suas partes, complexidade, acabamento superficial e muitos outros (67).

2.2.8. Parâmetros de moldagem de pó metálico

O comportamento funcional da máquina de moldagem por injeção (Injetora) tem seu desempenho diretamente relacionado com as características dos componentes e tem sido explicada com relação às aplicações de micro moldagem por injeção. Em particular, a redução do diâmetro do parafuso e uma maior precisão da posição parece ser o fator mais crítico (e limitante) do processo. As máquinas μ MIM recentes demonstraram características específicas na sequência de resultados. Em particular, unidades de injeção μ MIM recentemente desenvolvidos utilizam parafusos menores (14 mm de diâmetro, usado somente para plastificação) e êmbolos de injeção com um diâmetro reduzido (3-8 mm) permitindo a injeção mais rápida e precisa de fração de volumes necessário (72). Para o estudo de parâmetros de injeção e comportamento reológico da carga injetável existe tipos de molde de diversas geometrias para ensaio de injetabilidade como a agulha de cabelo (A) (69), espiral simples (B), espiral quadrado (C) e zig-zag (D) (52) e avaliação de espessura (E) como mostra a Figura 5.

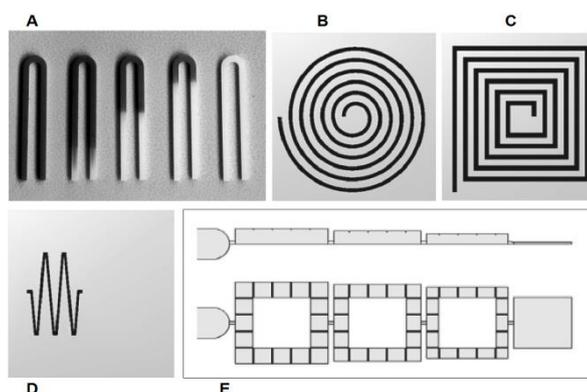


Figura 5: Geometria para determinação de parâmetros de injeção (69), (52).

Outros tipos de moldes para determinação de parâmetros possuem geometrias diferentes da apresentada nas Figuras 6 e 7 servem para verificar a aproximação computacional das geometrias de teste e a verificação experimental. A Figura 28 apresenta peças moldada sem duas amostras idênticas com simetria de rotação de 180° para realizar o estudo de determinação de comprimento de fluxo com um molde balanceado. As temperaturas múltiplas e sensores de pressão devem ser posicionados no interior da cavidade para caracterizar o fluxo dependente do estado da matéria-prima em relação à posição e compará-lo com os resultados da simulação. As geometrias de teste são projetadas para estudar diferentes efeitos que podem ocorrer durante a moldagem por injeção conforme exibida na Figura 6 (73).



Figura 6: Geometria para determinação de parâmetros de injeção (73).

Cada geometria apresentada na Figura 30 serve para a realização de uma ou mais análises:

- **Escada** (*Stair*): Esta geometria com degrau permite analisar alterações de temperatura e pressão no molde juntamente com o corpotamento com a variação da espesura do injetado, também chamada de espessura crítica (73).

- **Barra de flexão** (*Bending bar*): A amostra injetada e sinterizada podem ser utilizadas diretamente para a determinação das propriedades mecânica dos materiais em fase sólida (73).

- **Difusor** (*Diffusor*): Componente com um obstáculo, no final do fluxo do material para estudar o teor de carga, e o problema da linha de solda, bem como a caracterização da separação efeitos (73).

- **Injetor** (*Injector*): componente com um obstáculo no início do ponto de injeção para analisar a mistura de material ou a conexão de transporte após a barreira, bem como a caracterização dos efeitos de compressão (73).

- **Mudança de direção** (*Direction change*): Geometria com ângulo de 90° para investigar a temperatura e a queda de pressão e, se necessário, a separação de partículas de pó no canto da cavidade (73).

- **Espiral** (*Spiral*): para a investigação do fator de massa ao longo da cavidade, ou seja, a relação entre o comprimento do fluxo e a largura da peça (73).

A injetabilidade ou moldabilidade é definida como a medida de taxa e facilidade de deformação do material de alimentação para uma dada característica. A literatura mostra que mudanças súbitas de direção podem conduzir a agregação dos pós em um lado do molde e a separação entre os pós e o aglutinante. Este fenômeno é representado na Figura 7 (71).

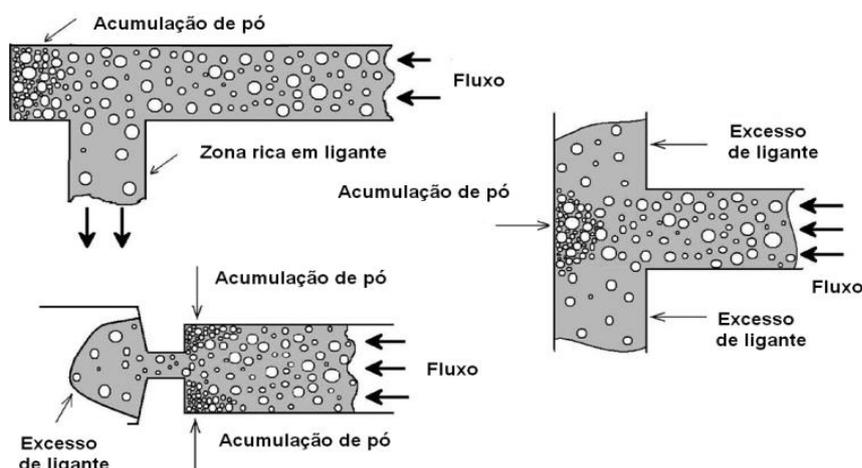


Figura 7: Separação de pó ligante durante a mudança de direção de fluxo (71).

2.2.9. Extração química

A remoção dos ligantes (polímeros e hidrocarbonetos) é um item importante na produção de moldagem por injeção. Durante esta operação, não deve haver deformação ou quebra das peças. O método de remoção de aglutinante tem um efeito considerável sobre a continuidade, uniformidade de retração e as propriedades mecânicas do material. Um ligante pode ser removido por diferentes métodos: decomposição térmica, de extração química com um solvente, a sublimação com o congelamento.

Por vezes, uma combinação destes métodos é usada. Com a dissolução, não há quase nenhum resíduo, uma vez que o ligante é removido sob a forma da substância original, sem reação química. No entanto, esse processo possui algumas limitações e é difícil de controlar

na prática (74). O Hexano é o solvente adequado para a extração química do PP e PEBDL por 5 horas a uma temperatura de 48°C (56).

As peças com maior valor entre a razão da área pelo volume acontecem a remoção mais fácil do ligante solúvel, devido à maior área de contato entre a peça e o solvente por unidade de volume. A formação de poros interconectados permite a eliminação dos gases formados na peça durante a decomposição térmica do PP, sem aparente mudança do mecanismo de degradação (46).

2.2.10. Extração térmica

Tendo em vista a simplicidade da extração dos ligantes pelo método térmico, este é frequentemente o mais usado, embora o carbono permaneça no material como resultado das reações químicas. Um ligante é removido por uma oxidação, redução, em atmosfera inerte ou no vácuo, sob condições de aquecimento lento a 100 - 500 °C, com imersão durante 35 h ou mais com uma taxa de aquecimento entre 0,1 a 0,5 °C/min. A taxa de aquecimento, atmosfera e o tipo de ligante afeta diretamente as dimensões das amostras, podendo haver crescimento e contração de injetado. Portanto, o regime de aquecimento é selecionado de modo que a decomposição e a evaporação do ligante ocorram sem inchaço da peça e os produtos gasosos de decomposição do ligante sejam removidos através dos poros da peça injetada.

Teores de carbono e oxigênio são monitorados durante a remoção da pasta de ligantes (74). Os ciclos de extração térmica são mais longos quando comparados com a extração em plasma e química, e ocorre a formação de resíduo nas partes frias do equipamento. Peças com espessura maior que 10 mm são necessários vários dias para extração do ligante (75), (76).

2.2.11. Sinterização

É um tratamento térmico que visa conferir o formato final desejado atingindo propriedades químicas e mecânicas através da ligação atômica entre as partículas vizinhas. Este processo ocorre a uma temperatura abaixo da temperatura de fusão do metal base ou da liga metálica considerada, sob condições controladas de temperatura, tempo e atmosfera (77). A temperatura de sinterização (T_s) é de 2/3 a 3/4 da temperatura de fusão sendo aconselhado utilizar a taxa de aquecimento máxima de 10 °C/min (78).

2.2.12. Micro moldagem de pós metálicos por injeção (μ -MIM)

O desenvolvimento de pequenas peças em PIM na escala de submilimétrica ou menos (μ -PIM), vem cada vez mais na redução do tamanho dos dispositivos, como sensores, atuadores, motores, bombas, válvulas, interruptores, sendo de grande interesse a construção de material de leve peso e baixo custo, fazendo o surgimento do μ -MIM (micro-MIM) (79). Utilizando pós muito finos e um processo de injeção modificado, o MIM pode também ser aplicado a microcomponentes e microestruturas (80). A cavidade de micro engrenagem com um diâmetro e uma altura com cerca de 200 μm está usinado em um inserto de 30 mm x 30 mm, que está montado em porta molde.

O posicionamento desta inserção é fundamental para a planeza e deformabilidade do micro engrenagem durante a moldagem. A questão-chave no projeto de molde é o sistema de ventagem (saída de gases) adequada do molde. O ar retido no molde deve ser capaz de escapar durante a moldagem, que tem lugar a uma pressão de aproximadamente 80 MPa e em um intervalo de tempo de 0,1 s. Atualmente os parâmetros de processo ótimos para a moldagem por injeção e novos conceitos como a aplicação de vácuo, antes da injeção são testados. Além disso, a remoção de ligante e a sinterização de tais componentes pequenos apresentam grandes desafios adicionais. O uso de nanopartículas leva a tensões muito elevadas durante a densificação na sinterização (81), a qual de acordo com a equação de Laplace:

$$\sigma p = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad \text{Eq 1}$$

Onde:

σp = Tensão da partícula

γ = Tensão superficial

R_1 e R_2 = Curvaturas da superfície das partículas

O aumento com o inverso do tamanho da partícula. Diminuindo o tamanho da partícula por um fator de 100, por exemplo, a partir de 20 μm , o que é usual para PIM convencional, a 200 nm, aumenta a tensão de sinterização por um fator de 100 (81). A Figura 8 apresenta a diferença entre o processo MIM e o processo de micro-MIM de peças em aço baixa liga ou de ferro puro.

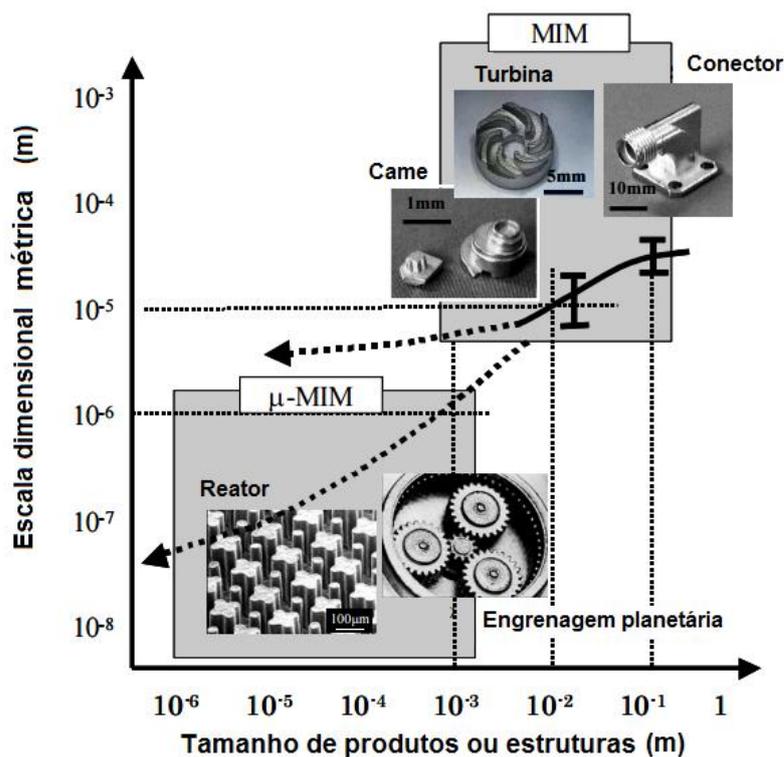


Figura 8: Diferença entre o MIM e o μ -MIM (82)

2.2.13. Obtenção e características de pós nanométricos

A obtenção de pó nanométrico restringe a alguns processos de fabricação como a moagem de alta energia, que é a técnica que envolve a soldagem e fratura das partículas de pós em um moinho de alta energia (MAE). Esta técnica permite a fabricação de uma grande quantidade de pó com tamanho nanométrico em algumas dezenas de horas. Outra técnica derivada da MAE é a moagem criogênica (*Cryogenic milling* ou *Cryomilling*) onde os pós são moídos num banho criogênico de nitrogênio líquido em um moinho atritor com o objetivo de refinar o tamanho das partículas, permitindo a obtenção de partículas nanométricas de materiais extremamente dúcteis como ligas de alumínio (83).

2.2.14. Problema e defeitos no processo de μ -MIM

O baixo preenchimento das cavidades pequenas é um defeito convencional induzida pela baixa temperatura do molde, a baixa pressão de injeção, etc., por exemplo, A Figura 9 apresenta micro colunas com diversos defeitos sendo a Figura 9a exibe peças que não foram totalmente preenchidas e foram moldados na cavidade de diâmetro de 110 μ m com uma temperatura de molde (T_m) de 28°C, pressão de injeção (P_i) de 80 MPa, com tempo de injeção

(Ti) de 1s com ajuda de vácuo. A Figura 9b apresenta a superfície áspera com furos de gás nas microcolunas moldadas sem vácuo no molde. O gás residual nas microcavidades é em razão da superfície áspera. Um defeito interno, designadamente, chamado de rechupe, que também induzida pelo gás residual adicional como mostrado na Figura 9c. Os parâmetros utilizados na peça exibida na Figura 9b foram peças moldados na cavidade de diâmetro de 60 μm com uma temperatura de molde (T_m) de 100°C, com pressão de injeção (P_i) de 120 Mpa com tempo de injeção (T_i) de 3s. A Figura 9d que indica a profundidade do rechupe com mais de 100 μm da coluna micromoldados em vácuo no molde com temperatura de molde de 80 °C, com uma pressão de injeção de 190 MPa e com tempo de injeção (T_i) de 5 s. Assim, as microcavidades "cegas" deve haver vácuo antes da fase de injeção para assegurar o preenchimento completo. Além disso, um grau de vácuo crítico deve ser avaliado para que as microcavidades possam ser totalmente preenchidas, sem estes defeitos. Este valor crítico é útil para reduzir o tempo de vácuo e encurtar o ciclo de produção (84).

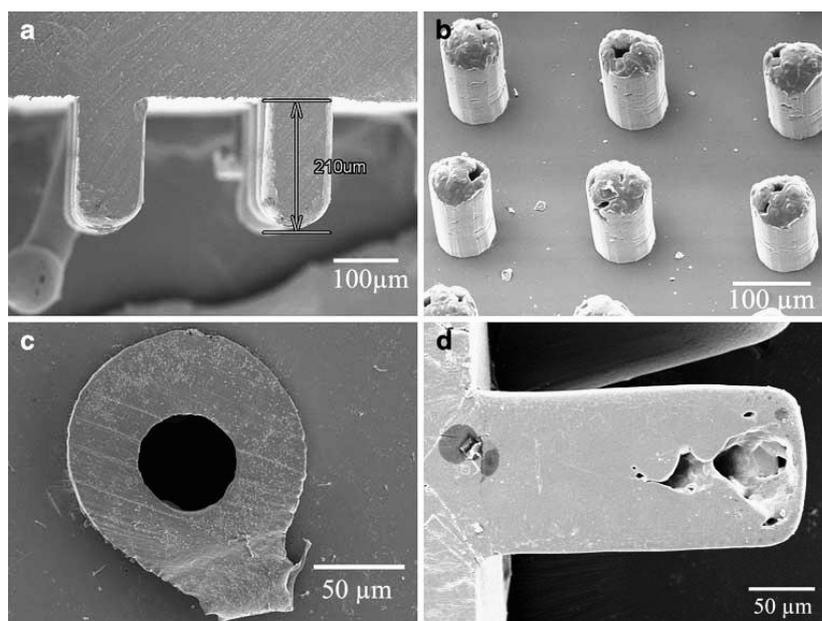


Figura 9: Defeitos de micro peças injetadas (84).

Outros tipos de defeitos são encontrados como casos menos graves, por exemplo, quando se aumenta a pressão de injeção aplicada, a matéria-prima também é pressionada para fora a fim de fechar a entrada de modo que o eixo aumentará parcialmente a espessura quando a peça for extraída. Além disso, também provoca uma deformação da engrenagem em uma zona perto dos arcos em forma de C. Portanto, afeta a mobilidade da mesma (85). A Figura 10 apresenta outros defeitos da micro-injeção de peças.

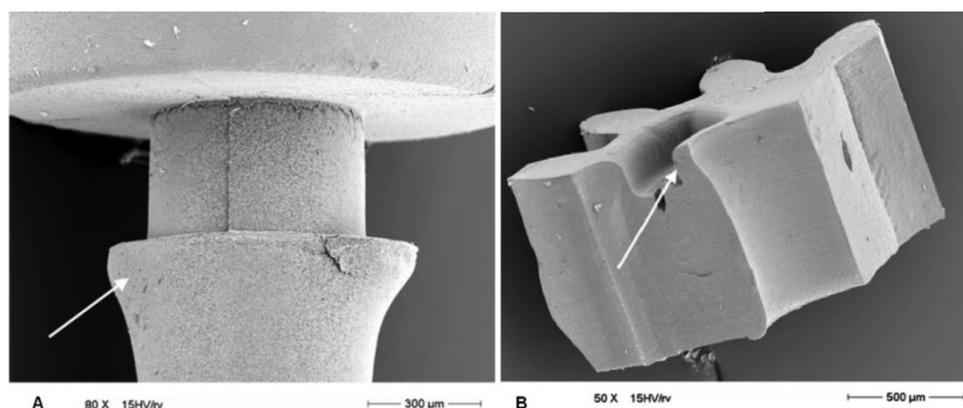


Figura 10: Defeitos de micro peças injetadas (85).

A última tendência mundial na evolução dos materiais e todas as áreas do conhecimento humano foram direcionadas para a nanociência e nanotecnologia. A tecnologia no século XXI exige a miniaturização de dispositivos em tamanhos nanométricos, enquanto o seu desempenho final é drasticamente aumentado (86).

2.3. Nanotecnologia

A ideia geral foi o desenvolvimento de uma multi-perspectiva sobre a nanotecnologia levando a recomendações integradas de atuação da tecnologia na escala nano. A percepção pública da nanotecnologia é baseada em fatos e nas necessidades humanas que podem ser sanadas com esta tecnologia (87). A palavra “*Nano*” significa **anão**, em grego, sendo prefixo usado na notação científica para expressar um bilionésimo de metro (10^{-9}). Nessa escala de tamanho, um minúsculo vírus, invisível a olho nu, mede cerca de 200 nm (88). A Figura 11 mostra a evolução do estudo humano através das últimas décadas em função da escala dimensional.

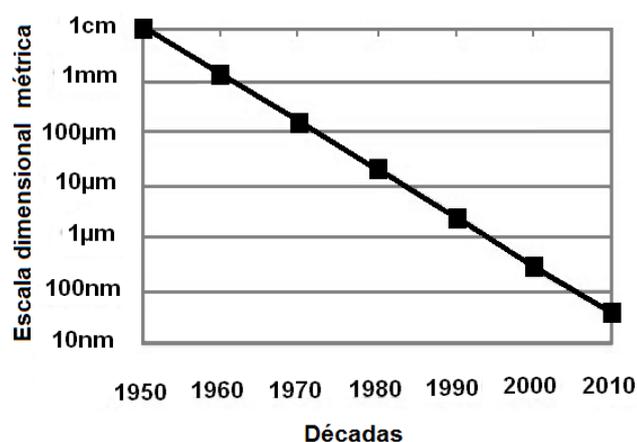


Figura 11: Evolução tecnológica em função da escala dimensional métrica (89).

Quando o tamanho dimensional da estrutura dos materiais diminui, uma variedade de novos fenômenos, que nunca foram esperados em materiais conhecidos ocorre devido à interação quântica das partículas (90). Nanociência e nanotecnologia trabalham principalmente com a síntese, caracterização, exploração de nanomateriais (91). A nanotecnologia é a capacidade de compreender, controlar e manipular a matéria ao nível dos átomos e moléculas, bem como ao nível "supramolecular" envolvendo aglomerados das moléculas. Seu objetivo é criar materiais, dispositivos e sistemas com propriedades e funções novas essencialmente devido a sua estrutura pequena (92).

2.3.1. Nanomateriais

Os nanomateriais são classificados em materiais nanoestruturados, nanofase ou materiais de partícula nanométrica. Os primeiros materiais citados são feitos de grãos com tamanho na escala do nanometro, enquanto que os últimos são geralmente nanopartículas dispersivas que formam o material. O tamanho nanométrico abrange uma ampla gama, que pode ser de 1 a 200 nm (91). Além dos materiais que são estruturados por meios de controle do tamanho, da forma e das características morfológicas na escala nanométrica, todas as propriedades físicas, elétricas e químicas sofrem modificações, tais como as propriedades mecânicas ou magnéticas destes materiais nanocristalinos (93). Sintetizar e estabilizar materiais nanocristalino massisso, ou seja, materiais policristalinos com a forma de uma massa consistentemente densa com tamanho abaixo de 100 nm em forma de pó (94). A Figura 12 apresenta materiais nanocristalinos sintetizados por meio de tratamentos de deformação plástica severa. Sendo a Figura 12(a), níquel nanocristalino comum com tamanho de grão médio de 10 nm de diâmetro sintetizados por laminação a frio e a Figura 12(b) apresenta um nanocompósito imiscível de Al-Pb obtidas por moagem de bola.

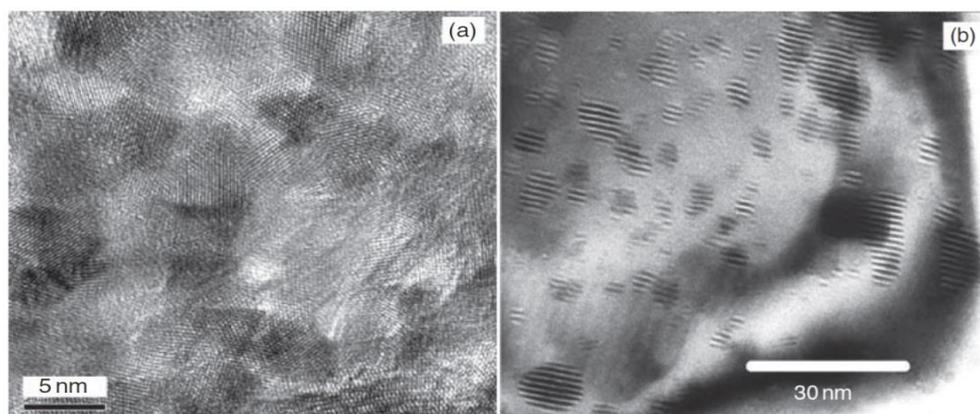


Figura 12: Materiais nanocristalino (94).

2.3.2. Materiais nanoestruturados

Materiais nanoestruturados são nanomateriais derivados especialmente de nanopartículas, que evoluíram como uma classe separada de materiais ao longo da última década. Sendo a mais notável maneira em que disciplinas completamente diferentes se uniram através do tema central dos nanomateriais (95), (96), (97), (98), (99), (100). Estes tipos de materiais que apresentam pelo menos uma dimensão na ordem menor que 100 nm tem sido muito estudados em diversas áreas (101), (102), (103). Os materiais nanoestruturados geralmente apresentam maiores propriedades mecânicas e/ou dureza (104), (105), (106), menor ductilidade e/ou tenacidade (107), (108), (109), (110), superplasticidade extraordinária a temperaturas baixas (111), (112), melhor difusividade (113), (114), (115), em quase todos os casos (116), maior calor específico (117), propriedade elásticas melhores (118), (119) e propriedades magnéticas superiores (120), (121), (122).

2.3.3. Aplicações gerais dos materiais nanométricos

Ao empregar o processo sol-gel (síntese de materiais que ocorre uma transição do sistema solução coloidal – sol – para um sistema de rede integrada – gel) e aerogels (material sólido poroso extremamente leve derivado de um gel), óxidos inorgânicos de elevada área superficial com uma melhor propriedade de absorção catalítica produzem outros materiais (123). Nanocompósitos consolidados e nanoestruturas permitem a produção de materiais estruturais ultraresistentes, dúcteis (124). Desenvolvimentos significativos ocorrem na sinterização da nanofase de materiais cerâmicos, têxteis e plásticos contendo nanopartículas dispersas. Materiais nanoestruturado de eletrodo podem melhorar a capacidade e o desempenho das baterias Li-ion (91), (125), (126). Nos últimos cinco anos, mais ou menos, os produtores de nanopartículas têm trabalhado duro para se diferenciar de seus concorrentes, proporcionando nanopós com características variadas de partículas ou pelo desenvolvimento de nanopartículas de composições próprias. Em muitos casos, a capacidade de fornecer quantidades de arqueação² de nanopós também foi estabelecida (95).

² A **arqueação** é a medida internacionalmente em vigor, que consistem em valores adimensionais obtidos por fórmulas de cálculo do volume interno de uma embarcação. Os volumes expressos em metros cúbicos, o número de passageiros, o pontal e a imersão de cada navio.

A Indústria automobilística e aeronáutica buscam materiais mais leves, pneus mais duráveis, plásticos não inflamáveis com menor custo. A indústria eletrônica e da comunicação trabalha com o aumento do armazenamento de dados, da velocidade de processamento na redução de tamanhos. A indústria química e de materiais almeja a fabricação de catalisadores mais eficientes (127). A indústria farmacêutica, biotecnológica e biomédica desenvolvem novos medicamentos baseados em nanoestruturas, materiais para regeneração de ossos, tecidos e kits de auto-diagnóstico (128), (129), (130), (131). Pesquisadores relacionados com o meio ambiente trabalham com membranas seletivas para remover contaminantes ou o sal da água (132), (133), e novas possibilidades de reciclagem de materiais são possíveis (134), (135), (136).

A comercialização de produtos que incorporam nanotecnologia em 2007 foi de US\$ 88 bilhões. Antes da crise financeira de 2008, a projeção para 2010 era de 500 bilhões de dólares, devendo alcançar cerca de 2,6 trilhões de dólares em 2014, tanto quanto, a atual soma das indústrias de informática e de telecomunicações. Em 2004, o governo brasileiro lançou o Programa Nacional de Nanotecnologia que de 2001 a 2006, investiu R\$ 170 milhões em nanotecnologia, criando redes em nível nacional e fomento para pesquisas em empresas e universidades. Em 2007, os recursos somaram R\$ 48 milhões destinados a empresas, além de R\$ 11 milhões para universidades e centros de pesquisa (135).

2.4. Conceitos de magnetismo

O magnetismo ocorre devido ao movimento dos elétrons nos átomos. Cada elétron em um átomo possui momento magnético proveniente do movimento orbital ao redor do núcleo com uma carga, conforme mostra a Figura 13 (137), (138).

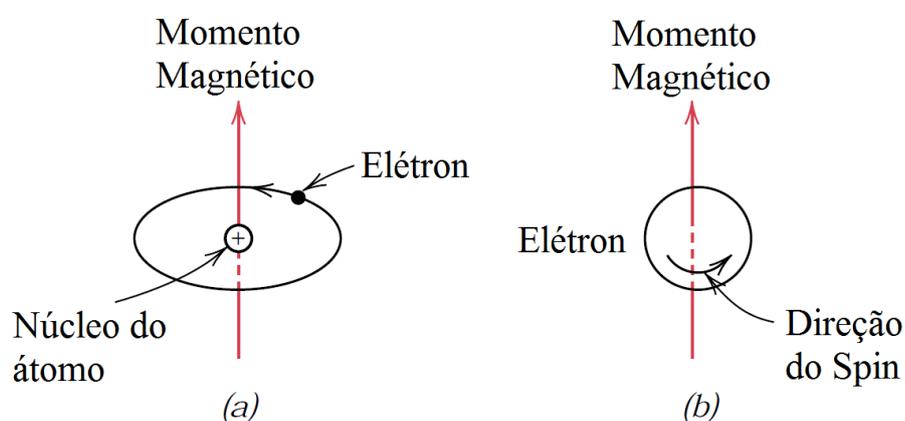


Figura 13: Demonstração do momento magnético em relação a orbita elétrica (138).

A indução magnética também chamada de densidade do fluxo magnético (B) representa a força interna na amostra submetida ao campo magnético (H). Os vetores B e H direcionam o campo através de sua magnitude e direção de espaço. Os dipolos magnéticos podem ser considerados como pequenos ímãs com os polos sul e norte em suas extremidades. A intensidade do campo magnético (H) e a densidade do fluxo (B) estão de acordo conforme a Equação 2 (138).

$$B = \mu H \quad \text{Eq 2}$$

O parâmetro μ é chamado de permeabilidade [H/m], que expressa intrinsecamente sua capacidade de se mostrar mais ou menos suscetível à passagem de fluxo magnético, sendo uma propriedade do sistema atravessado pelo campo (H) e onde (B) é medido. Existem algumas particularidades que dividem os materiais em classes magnéticas. A permeabilidade é aquela propriedade de um material magnético que indica a facilidade com que o material seja magnetizado (138). Através de análise dos efeitos provenientes de aplicação de campos magnéticos (H) foi possível classificar os diferentes momentos magnéticos em fases distintas: Diamagnetismo (138), (139), Paramagnetismo (138), (139), (140), Ferromagnetismo, Antiferromagnetismo (138), (141), (142), (143) e Ferrimagnetismo (138).

O Ferromagnetismo é o fenômeno onde materiais metálicos possuem momento magnético na ausência de um campo externo, como o Ferro α (CCC), Níquel, Cobalto e o Gadolínio. Os materiais ferromagnéticos podem exibir valores de susceptibilidade magnética tão alta como 10^6 , porém, estes possuem uma temperatura crítica, chamada de temperatura de Curie (T_c), que acima desta perdem o fenômeno do ferromagnetismo e tornam-se paramagnéticos. A Equação 3 exibe a relação entre a densidade de fluxo magnético e a magnetização (M) para um material ferromagnético (137), (138), (140).

$$B = \mu_0 M \quad \text{Eq 3}$$

A magnetização (M) de um corpo é uma medida de seu momento magnético por uma unidade de volume. A magnetização de saturação (M_s) é o aumento máximo do valor de magnetização (144), (145). O Ferrimagnetismo é a base da maioria dos ímãs cerâmicos importantes comerciais, pois, exibem uma magnetização permanente, tendo as características macroscópicas semelhantes aos ferromagnetos. Sendo a ferrita com base na estrutura cristalina inversa à do espinélio. (138), (146). Inúmeras pesquisas têm sido realizadas com os mais diversos tipos de materiais ferrimagnéticos (147), (148), (149), (150), (151), (152), (153). A

Figura 14 mostra a magnetização de saturação em função da temperatura dos elementos químicos.

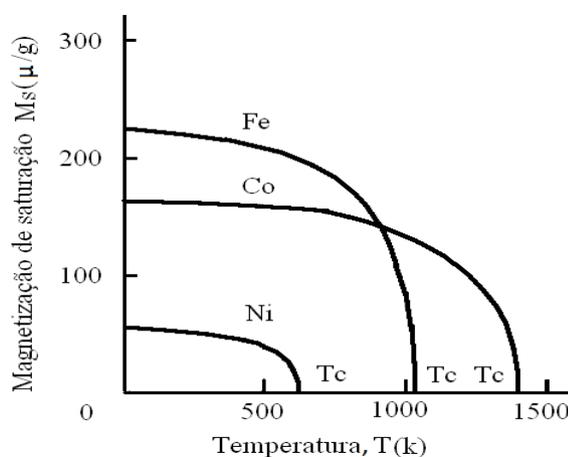


Figura 14: Magnetização de saturação X Temperatura do Fe, Co, Ni (154).

2.4.1. Curvas de magnetização

Os fenômenos elétricos e magnéticos são regidos pelas equações de Maxwell (145), e aplicações tecnológicas do magnetismo são encontradas em dispositivos que geram campos ou forças, ou ambos, como os motores, geradores, transformadores, alto-falantes de disco, e muitos outros. Os materiais ferromagnéticos são amplamente classificados em duas categorias: (i) magneticamente macio, com elevada permeabilidade para conduzir um fluxo magnético, e (ii) magneticamente duro, com alta coercividade para manter um permanente momento, na ausência de um campo aplicado (155), (156), (157). A Figura 15 exibe a curva esquemática de magnetização inicial.

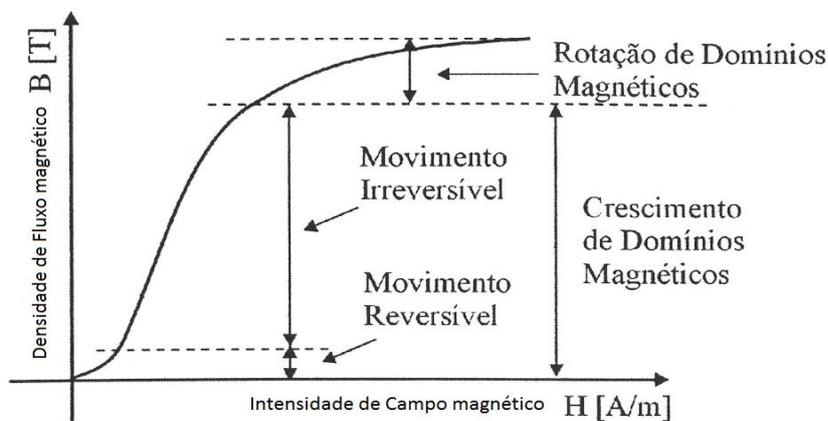


Figura 15: Curva de magnetização inicial (155).

A Figura 16 apresenta duas situações esquemáticas, sendo (a) a ausência de um campo magnético externo com os momentos magnéticos permanentes resultantes dos *spins* emparelhados e (b), que é a curva $B - H$ de um material ferromagnético inicialmente desmagnetizado (158).

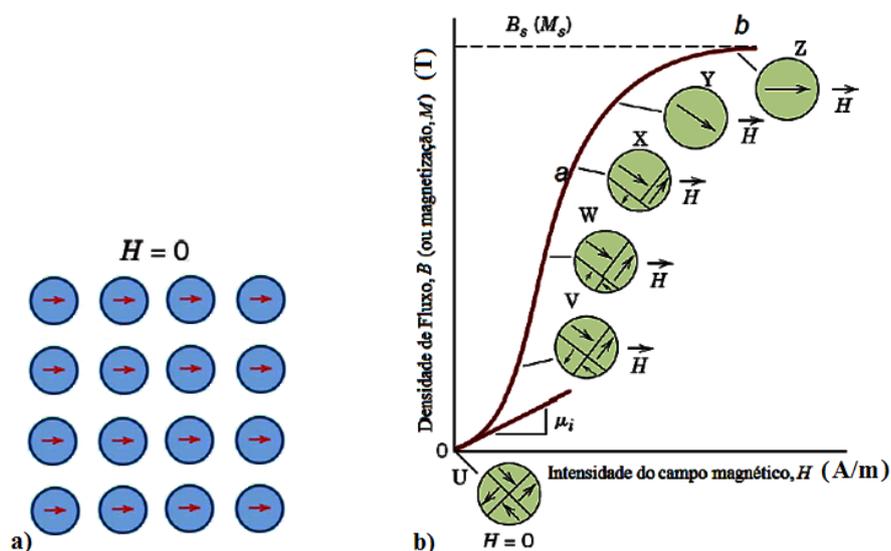


Figura 16: Configurações de domínios durante várias fases de magnetização (138).

2.4.2. Curvas de histerese magnética

As curvas de magnetização contra a intensidade do campo magnético, do ponto de vista experimental, indicam sobre a “dureza” dos materiais magnéticos ligados diretamente a sua anisotropia cristalina. Quando o campo magnético é aplicado em um material ferromagnético aumentando a região de momentos magnéticos na mesma direção do campo. E causando uma diminuição de sua energia interna, sendo aumentada até a saturação e em seguida diminuída, a densidade de fluxo B não diminui tão rapidamente quanto o campo H (159). As características detalhadas da histerese dependem da morfologia, tanto quanto, nas propriedades intrínsecas das fases envolvidas (160). A força coercitiva é quando o campo magnético chega a zero, devido a aplicação de um campo negativo para anular a densidade de fluxo remanescente (B_r). O material é magnetizado com polaridade oposta sempre que o campo magnético continuar aumentando no sentido negativo. Sendo este fenômeno um processo cíclico, chamado de **histerese magnética**, que causa o atraso entre densidade de fluxo e campo magnético e o ciclo traçado denominado de **ciclo de histerese**, que é traçado pela curva de magnetização (161). A Figura 17 exibe uma curva de histerese magnética com diversos valores de intensidade de campo magnético.

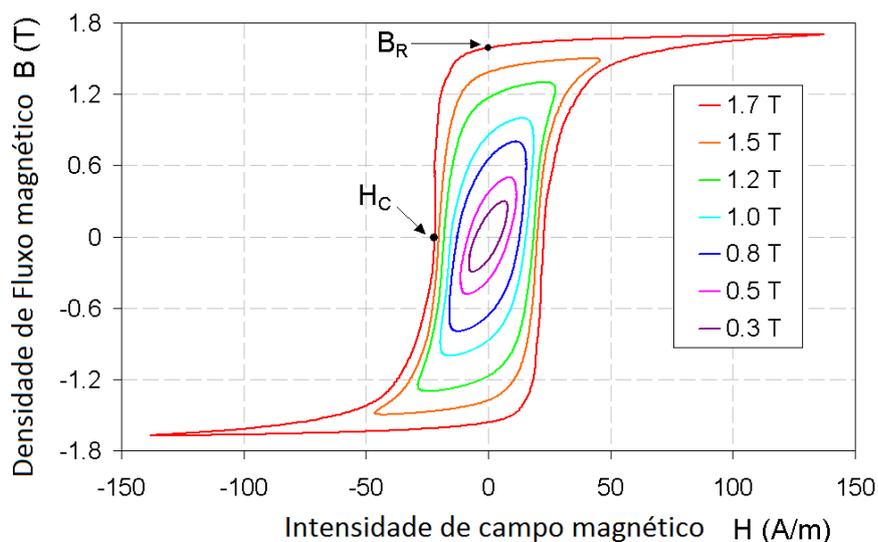


Figura 17: Curva de histerese magnética para diversos materiais (162).

Materiais magnéticos nanocristalinos, dependendo da sua composição, do tamanho de grão e da concentração, apresentam uma variedade de comportamentos de histerese entre as quais podem ser interessante para diversos equipamentos eletrônicos, que anteriormente as ligas de materiais magnéticos micrométricos não atendiam (163).

A Temperatura de Curie (T_c), ou o Ponto de Curie é a temperatura de transformaçãomagnética de um material ferromagnético entre a sua fase ferromagnética e paramagnética. A saturação magnética diminui gradualmente e desaparece acima do ponto de Curie, porém, este efeito é reversível com a diminuição da agitação térmica e pode ser medido por diversos métodos (164), (165), (166), (167).

Até certo ponto, a magnetização (M) do material varia linearmente com o campo magnético aplicado (B) e com a temperatura (T) segundo a **Lei de Curie** (168). Nos últimos anos, as nano-partículas ferromagnéticas têm atraído muito interesse devido às suas propriedades fascinantes resultantes do seu tamanho nanométrico. Sabe-se que quando o tamanho dos sólidos ferromagnéticos reduz a nano-escala, as partículas podem exibir um comportamento superparamagnético e uma baixa temperatura de Curie (169), (170).

2.4.3. Efeito nano-magnético

Os materiais ferromagnéticos consistem em domínios com magnetização paralela (Vários domínios, Figura 9a). Se um campo magnético (H) é aplicado, a magnetização de todos os domínios toma a direção do campo e ficam nessa direção, mesmo se o campo externo é removido. Se o tamanho das nanopartículas ferromagnéticas torna-se menor do que o

tamanho do domínio crítico (10-20 nm), apenas um domínio permanece na partícula (Figura 9b). Se um novo campo magnético é aplicado, todas as partículas irão alinhar se de acordo com este campo (c), mas, se o campo é removido, o movimento térmico vai levar a uma perda de orientação (d). Este comportamento é semelhante aos dipolos magnéticos permanentes dos paramagnéticos, sendo assim, chamados de superparamagnetismo.

Este efeito define, entre outros, um limite superior para a miniaturização das memórias magnéticas (171). Por outro lado, o efeito superparamagnético possuem partículas, que são previstas a desempenhar um papel importante na nanobiotecnologia e na medicina. Outro nano efeito magnético que é usado presentemente nas memórias magnéticas, é o chamado efeito Magneto Resistivo Gigante (GMR), que depende dos detalhes de realização, o comprimento crítico de percurso livre médio do eletrón ou o comprimento de relaxamento do spin (172). A Figura 18 exhibe o esquema do efeito superparamagnético.

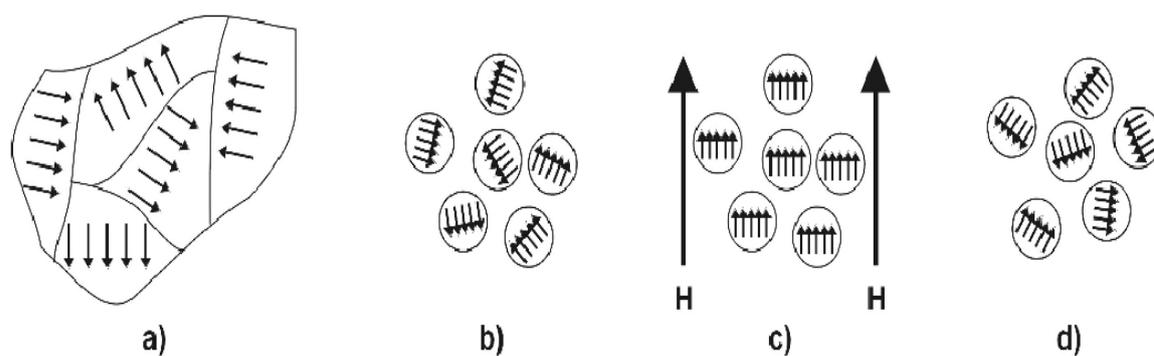


Figura 18: Explicação do efeito superparamagnético (173).

No efeito superparamagnético, não há memória magnética permanente após a aplicação de um campo magnético, embora a sua susceptibilidade magnética possa ser bastante grande. O pó nanométrico diminui a permeabilidade magnética, densidade máxima de fluxo e a condutividade térmica aumentando a resistividade elétrica.

Uma vez que a densidade eleva os meios de gravação magnética num tipo de composição estruturada. As partículas ferromagnéticas obtêm um tamanho suficientemente pequeno, que faz o material possuir capacidade de armazenar qualquer informação. Para outras aplicações, como refrigeração magnética, este estado pode realmente dar um aumento na capacidade de resfriamento (173).

2.5. Materiais magnéticos duros e moles

Os materiais magnéticos são classificados em duros e moles. Estes últimos também referidos como macios ou doces. O uso dos materiais magnéticos depende justamente de que eles sejam duros ou moles. Os magnetos duros, também chamados ímãs, são aqueles "permanentes", que exigem um forte campo externo para levar sua magnetização a zero. Já os magnetos moles possuem um magnetismo facilmente reversível (174). A medição precisa das propriedades magnéticas em corrente contínua de materiais ferromagnéticos moles e duros é de vital importância para o controle e qualidade de muitos dispositivos eletromagnéticos. As curvas de magnetização em corrente contínua, ou desmagnetização, são vitais para os projetos de atuadores de dispositivos de corrente alternada (175). Os motores elétricos exigem materiais magnéticos moles para que eles possam se adaptar rapidamente às alterações da corrente elétrica alternada. A característica de material magnético duro ou mole depende do domínio que é a menor unidade do material, que mantém uma orientação magnética própria. No caso dos materiais magnéticos moles, quando o campo magnético externo é retirado, a orientação magnética dos domínios desaparece (176). Em mini e micro motores esta característica é fundamental para o seu funcionamento (177).

Um material magnético macio pode ser empregado como um eficiente multiplicador de fluxo em uma grande variedade de dispositivos, incluindo motores, transformadores, geradores, utilizados na geração e distribuição de energia elétrica. Um material magnético é considerado "macio" quando sua coercitividade é da ordem, ou menor que, o campo magnético da Terra (178), que varia de menos de 30 a 60 microtesla (μT).

No que se refere aos materiais ferromagnéticos, em que o progresso prático em magnetismo depende em grande parte do avanço significativo no domínio da coercibilidade (pequena área na curva de histerese), que resultou de controle combinado de anisotropia magneto cristalino e microestrutura (179). A baixa perda de correntes de **Foucault** em aplicações de fluxo alternado, alta indução de saturação, permeabilidade, a baixa remanência, coercitividade e perda energética por histerese são características importantes dos materiais magnéticos macios (180). O custo, a aplicação e o desempenho são os fatores determinantes para a seleção de materiais magnéticos. Os projetos de componentes como o núcleo de motores estão diretamente ligados na escolha do material que pode dar origem as perdas (181). Peças obtidas por metalurgia do pó de ferro puro têm baixíssima resistividade, que garante grandes perdas magnéticas devido à quantidade elevada de geração de corrente de Foucault (182). O desenvolvimento da nova geração de materiais magnéticos obtidos por metalurgia

do pó substituindo os laminados tem crescido muito no mundo acadêmico. Este desenvolvimento intensivo é observado nos materiais magnéticos macios e duros que com mais frequência vem substituindo as tradicionais chapas de aços elétricos (183), (184).

2.5.1. Materiais tradicionais da metalurgia do pó

A metalurgia do pó é uma tecnologia bem estabelecida e utilizada na produção de componentes magnéticos macios. Os dados apresentados na Tabela 2 indicam que níveis de densidade maiores aumentam a indução de saturação, de peças de liga e de processamento afetam levemente as propriedades como permeabilidade, força coercitiva e magnetismo residual. Esta capacidade de customização das propriedades magnéticas e formas geométricas complexas faz da metalurgia do pó um processo competitivo (185).

Tabela 2: Propriedades magnéticas para materiais por M/P em correntes contínua (185).

Ligas	Densidade do sinterizado (ρ_s) [g/cm ³]	Permeabilidade (μ) [H/m]	Força coercitiva (Hc) [Oe]	Força coercitiva (Hc) [A/m]	Resistividade (ρ_e) [Ω /m]
Fe	6,8 -7,2	1800 - 3500	1,5 - 2,5	119,36 - 198,94	10 X10-07
Fe/P	6,8 -7,4	2500 - 6000	1,2-2,0	95,49-159,15	30 X10-07
Fe/Si	6,8 -7,3	2000 - 5000	0,8-1,2	63,66-95,49	60 X10-07
400 Séries SS	6,7 -7,2	1400 - 2100	1,5-2,0	119,36 - 159,15	50 X10-07
50Ni/50Fe	7,2 - 7,6	5000 - 15000	0,2-0,5	15,91-39,78	45 X10-07

2.5.1.1. Ferro puro

O ferro puro pode ser comumente considerado, o material ferromagnético mais próximo do ideal, pois possui excelente magnetização de saturação, podendo atingir 2,15 Tesla, juntamente com altíssima permeabilidade relativa e força coerciva atrativa. Sendo a primeira consideração para o desenvolvimento de máquinas elétricas rotativas como motores, é que se precisa de materiais de alta permeabilidade magnética que ofereçam a mínima resistência possível ao campo magnético que, a cada ciclo da corrente, alterará o sentido dos dipolos magnéticos no núcleo magnético. Porém, oferece uma baixa resistividade elétrica, assim sendo, não é aconselhado o uso em circuitos de corrente alternada, pois, para esta aplicação, a curva de histerese deve ser bastante estreita. De modo a absorver o mínimo de

energia durante a magnetização e desmagnetização, que são aproximadamente 75% de todas as aplicações industriais de materiais magnéticos (78), (186).

Elementos como o silício (Si) e o alumínio (Al) adicionando ao ferro, aumentam sua resistividade elétrica tornando-se apropriado para o emprego em corrente alternada. Outros metais utilizados como elementos de ligas magnéticas são o fósforo (P), o níquel (Ni) e o cobalto (Co) (78). A Tabela 3 exibe valores de propriedades de peças com ferro puro sinterizado (185).

Tabela 3: Propriedades magnéticas para peças de ferro puro por M/P.

Material *	Temperatura Sinterização Ts (°C)	Pressão de compactação (Pc)[Mpa]	Densidade do Sinterizado (ρ_s) [g/cm ³]	Força coercitiva (Hc) [kA/m]	Densidade de fluxo (B) – 119 A/m – [T]	Densidade de fluxo máximo (B _{máx}) [T]	Permeabilidade máxima ($\mu_{máx}$) [H/m]
Pó de ferropuro	1120	410	6,82	0,23	0,73	1,06	2530
		550	7,14	0,23	0,85	1,21	3070
		690	7,30	0,23	0,92	1,29	3340
	1150	410	6,8	0,22	0,74	1,14	2900
		600	7,2	0,22	0,86	1,36	3700
		800	7,4	0,22	0,98	1,40	3900
	1260	410	6,86	0,21	0,75	1,10	2730
		550	7,14	0,21	0,86	1,24	3190
		690	7,32	0,21	0,93	1,32	3570

* Todos os dados medidos a um campo aplicado de 15 Oe (Oersted) (119 A/m).

2.5.1.2. Liga ferro – silício

O silício possibilita eliminar o carbono, como também, o oxigênio do aço, sendo assim, consegue-se aumentar a permeabilidade inicial, diminuindo a força coercitiva, como também, as perdas por histerese e por correntes de Foucault. Possui propriedades isolantes e sendo adicionado ao ferro para formar uma liga consegue-se um material com adequada resistência elétrica, por estas razões citadas, as chapas constituintes de máquinas elétricas são de ferro-silício.

A Figura 19A exibe o diagrama de fase do ferro-silício completo e a Figura 19B apresenta o diagrama de fase simplificado, que interessa a este trabalho.

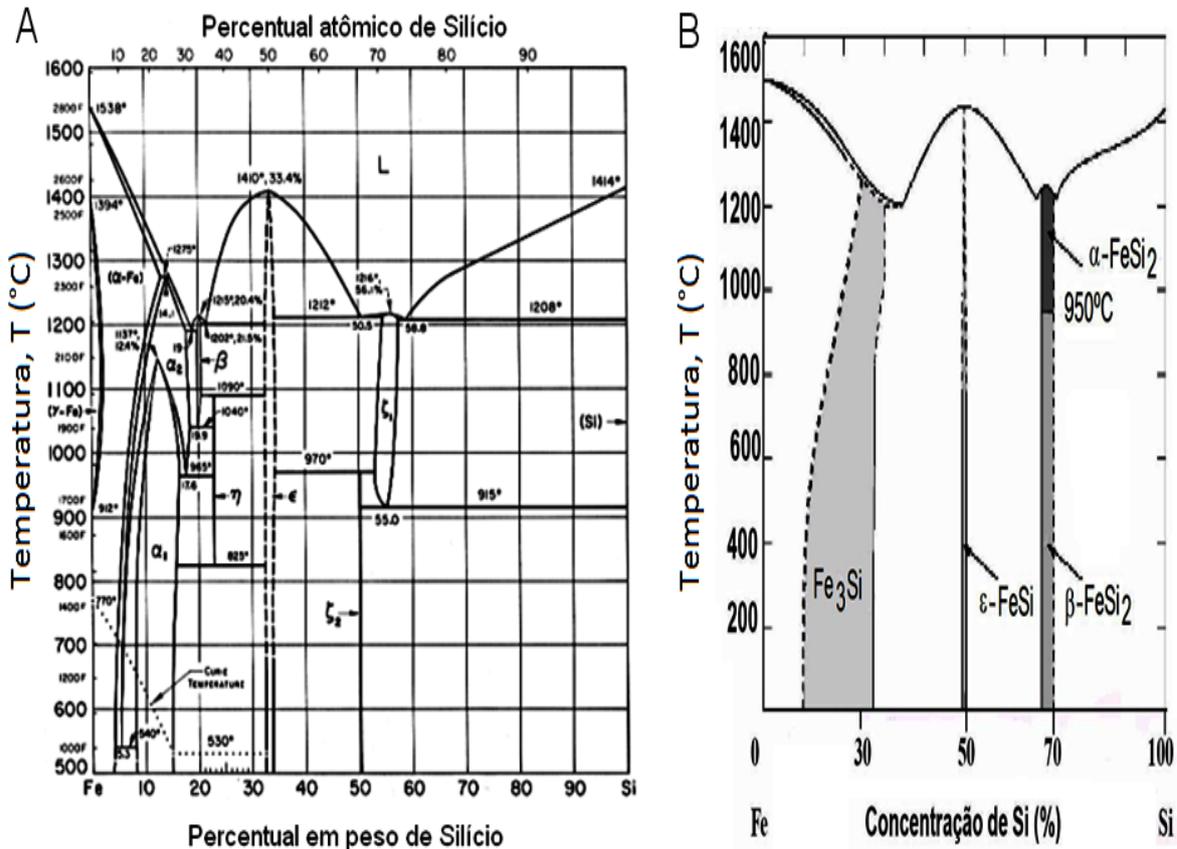


Figura 19: Diagrama de Fase Ferro - Silício (187), (188).

A Figura 19B mostra a fase Fe_3Si , metálica e ferromagnética que pertence ao grupo espacial Fm-3m , a fase $\epsilon\text{-FeSi}$ é semicondutora e quase ferromagnética. A fase semicondutora $\beta\text{-FeSi}_2$ e a fase metálica $\alpha\text{-FeSi}_2$ são paramagnética com estrutura tetragonal (188).

Os motores comumente utilizados na indústria para um grande número de aplicações são fabricados de aço carbono ABNT 1006, onde o rendimento não é relevante (189). Os motores de alto desempenho utilizam ligas de ferro-3silício devido ao menor aquecimento durante o trabalho (190), (191). Também são utilizadas em motores e geradores de melhor qualidade, de média e de alta eficiência e tamanho médio (192).

As ligas ferro-silício são empregadas em motores fracionários de baixo custo, em peças polares e outros circuitos magnéticos de alta permeabilidade (193). Além disso, estas ligas são utilizadas em transformadores de todos os tamanhos (194), (195), (196). A Tabela 4 apresenta os distintos teores de silício utilizados, que podem variar de 0,25 a 4,75%, assim como também suas características (190).

Tabela 4: Propriedades físicas e magnéticas de chapas Fe-Si (190).

Teor aproximado de Silício (%)	Tipo ou Marca	Perda do Núcleo (Wn) [W/kg em 60 ciclos]	Resistividade (ρ_e) [$\mu\Omega.cm$]	Limite de resistência à tração (RT) [MPa]	Ductilidade, Alongamento em 50,8mm, (δ) %
0,25-0,30	Campo	5,1	28	-	-
0,50-0,60	Armadura	3,4	28	310	25
1,25-1,50	Elétrico	3,7	44	350	22
2,50-2,75	Motor	2,5	44	475	14
2,75-3,25	Dínamo	2,1	50	-	-
3,25-3,50	Hipersil	2,1	50	490	12
3,60-4,00	Transformador 72	1,58	52	560	8
4,00-4,25	Transformador 65	1,43	58	505	6
4,25-4,50	Transformador 58	1,27	60	530	5
4,50-4,75	Transformador 52	1,15	65	490	2

Fonte: Adaptado de CHIAVERINI, V. 1986.

O percentual de 3% de silício produz uma resistividade de aproximadamente 0,50 $\mu\Omega.m$. Maiores teores de silício aumentam ainda mais a resistividade, porém reduzem a compressibilidade dos pós da liga ferrosa, tornando o material extremamente frágil e também diminuem a indução magnética. A sinterização do Fe-Si acontece inteiramente na fase α (ferrita), desde que o percentual de silício seja de até 2,11%, que gera um tamanho de grão grande ajudando a promover uma baixa força coerciva e alta permeabilidade. Com percentuais de até 20%, as propriedades magnéticas são melhoradas utilizando-se processos de altíssima densificação. Com baixa coercitividade e alta resistividade, o ferro-silício é adequado para circuitos excitados por correntes alternadas ou pulsadas com frequências que variam de centenas a vários milhares de Hertz (197). Há trabalhos desenvolvidos que utilizam estas ligas no núcleo para fabricarem compósitos magnéticos macios (SMC - *soft magnetic composite*) cobertos por uma camada fina isolante eletricamente (198).

As ligas ferro-silício contêm tipicamente, de 1,5% a 3,0% de silício em massa, devido ao fato do Si não ser pré-ligado ao ferro na mesma proporção para evitar a perda de compressibilidade. Uma liga especial de Fe pré-ligado com Si é sinterizada a 1260 °C em atmosfera de H₂ para atingir a difusão do Si.

A liga Fe-Si sinterizada responde melhor do que o Fe-P sinterizado em moderadas frequências (185). O ferro puro possui excelente magnetização de saturação, porém a adição de silício diminui um pouco a magnetização de saturação, mas reduz a anisotropia

magnetocristalina e a magnetoestrição³ e aumenta consideravelmente a resistividade elétrica do material magnético (188). A Figura 20 mostra a curva de histerese do ferro puro e da liga Ferro-Silício.

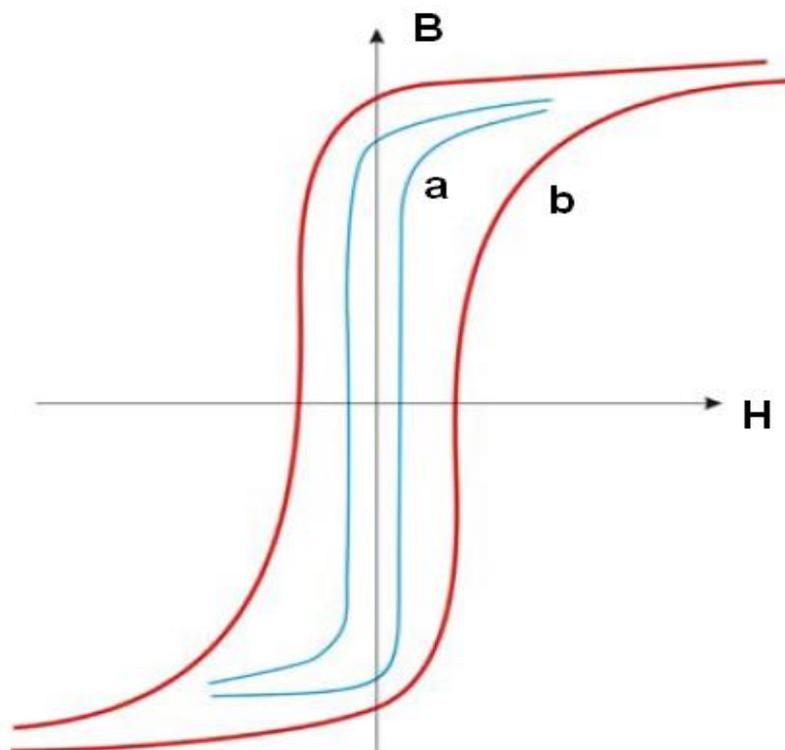


Figura 20: Curva de histerese para ferro puro (b) e ferro 3% silício (a) (188).

2.5.2. Propriedades magnéticas e elétricas de ligas macias

Na metalurgia do pó convencional, as partículas de 20 a 50 μm , possuem melhor distribuição granulométrica, baixo teor de lubrificante/aglutinante e uma alta pressão de compactação que produzem peças com elevadas densidades, e é diretamente proporcional às melhores propriedades magnéticas, como a permeabilidade e a densidade de fluxo máxima. A perda por histerese é a parte principal da perda do núcleo em baixas frequências e pode ser reduzida por partículas grandes, maior pureza do ferro e tratamento térmico de alívio de tensão. Um aumento no tamanho das partículas trará menos contatos entre as mesmas, o que impede a magnetização (199). A Tabela 5 mostra as propriedades físicas, magnéticas e elétricas de ligas macias.

³Magnetoestrição é a deformação de estruturas cristalinas devido à aplicação de campos magnéticos

Tabela 5: Propriedades físicas, magnéticas e elétricas de ligas macias SMC (199).

Propriedades	Aumento do tamanho da partícula	Diminuição do tamanho da partícula	Adição de lubrificante	Adição de aglutinante	Aumento da pressão de compactação	Tratamento térmico
Permeabilidade	↑	↓	↓	↓	↑	↑
Densidade máxima de fluxo	↑	↓	↓	↓	↑	↑
Coercitividade	↓	↑	→	→	↑	↓
Resistividade	↓	↑	↑	↑	↓	↓
Condutividade térmica	↑	↓	↓	↓	↑	↑
Resistência mecânica	↓	↑	↓	↑	(*) ↑ ↓	(* *) ↑

Fonte: Adaptado de (199).

(*) Em material com aglutinante a resistência mecânica aumenta com o aumento compactação (200), enquanto o comportamento oposto ocorre em um material sem ligante (201).

(* *) Num material incluindo um aglutinante a força aumenta até tipicamente 200°C, (202) e (200), devido a uma melhor distribuição do ligante. O aumento maior do aglutinante faz a força diminuir. Um material sem um ligante (incluindo lubrificante) apresenta um aumento na força com temperatura (200).

Um núcleo de uma máquina elétrica obtido por metalurgia do pó é mais apropriado em motores universais (alto campo magnético), devido à baixa permeabilidade relativa. Máquinas com ímãs permanentes não sofrem influência a pequenas variações de permeabilidade devido à heterogeneidade, a impureza ou anisotropia. O tamanho de grão influencia o tamanho do domínio onde as correntes de Foucault ocorrem. Basicamente, os grãos menores levam a menores perdas e a sua textura mais pobre conduz a perdas de histerese maiores. A baixa permeabilidade tem menor influência sobre as máquinas elétricas com grande entreferro efetivo, como por exemplo, as máquinas de ímãs permanentes (203).

A diminuição do tamanho de partícula aumenta a resistividade elétrica e a coercividade. As ligas de ferro-silício diminuem a densidade de fluxo magnético máximo (B_{\max}) e uma máquina rotativa deve trabalhar com a máximo fluxo de entreferro para que resulte na máxima relação de torque/volume de ferro (199). A Figura 21 apresenta a máxima permeabilidade e a força coerciva em relação ao aumento de densidade (204).

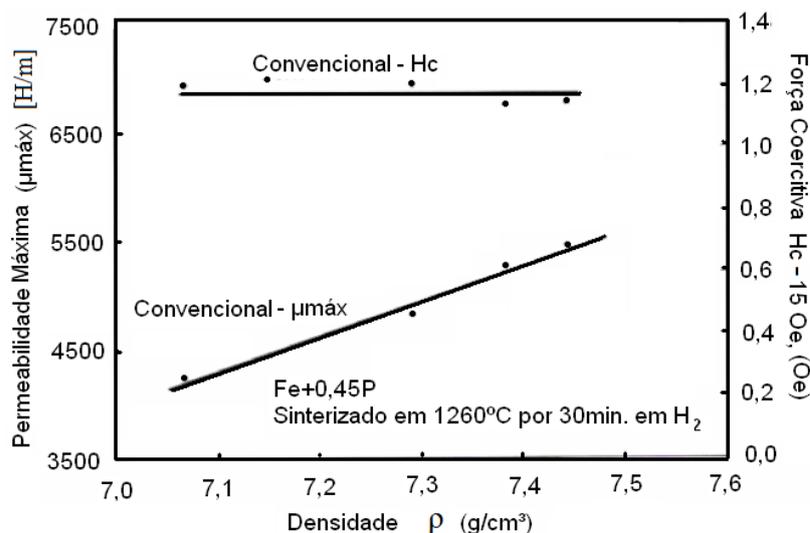


Figura 21: Máxima permeabilidade e força coerciva X densidade (204).

Nota-se que a permeabilidade máxima é influenciada diretamente pela densidade do material. Entretanto, a força coercitiva não sofre nenhuma influência pelo aumento da densidade (204). Alta permeabilidade é desejável em aplicações, que uma resposta rápida a uma corrente aplicada é importante. Relés e atuadores de impressora são exemplos de aplicações que necessitam de uma rápida resposta. A adição de fósforo e silício pode melhorar significativamente a permeabilidade magnética relativa do ferro puro.

A Figura 22 mostra a permeabilidade em função da densidade para o ferro puro, ligas de ferro-fósforo e ligas de Ferro-silício. O ferro e as ligas ferrosas com fósforo foram sinterizadas a 1120 °C. Considerando que, a sinterização das ligas ferrosas com silício foi feito a 1260 °C. Isto foi necessário para homogeneizar o silício, que foi adicionado em uma liga mestre de Ferro-silício (205).

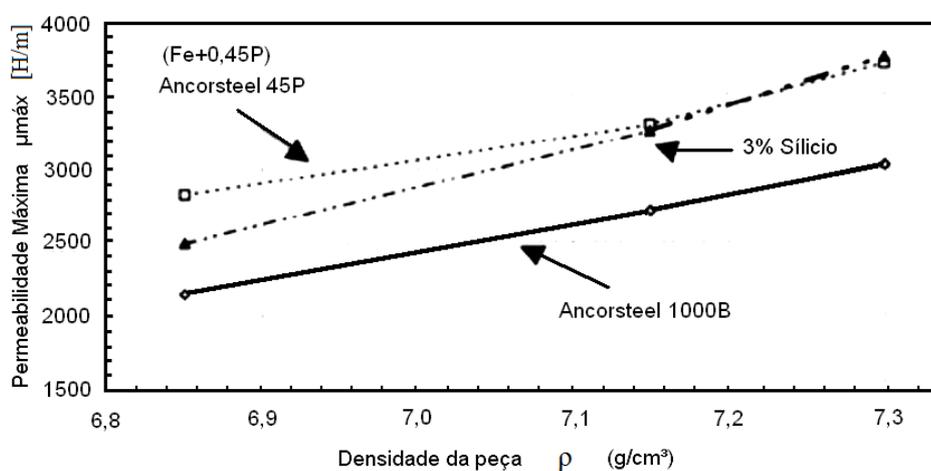


Figura 22: Máxima permeabilidade X densidade – Materiais sinterizados (205).

A série de ferros puros denominados Ancorsteel tem a função de ter altíssima compressibilidade e são fabricados pela Hoeganaes Corporation. A Tabela 6 apresenta as propriedades magnéticas típicas para várias ferros puros desta classe, que foram compactado em 410, 550 e 690 MPa e sinterizadas a 1120 e 1260 °C durante 30 minutos em amônia dissociada (206).

Tabela 6: Propriedades Magnéticas para vários ferros puros por M/P (206).

Material	Temperatura Sinterização (Ts) [°C]	Pressão de compactação (Pc) [MPa]	Densidade do Sinterizado (ρ_s) [g/cm ³]	Coercitividade (Hc) [kA/m]	Retentividade (Br) [kG ou T]	Densidade de Fluxo máxima (B _{máx}) [T]	Permeabilidade máxima ($\mu_{Máx}$) [H/m]
Ancorsteel 1000	1120	410	6,70	2,03	8,3	9,8	1990
		550	7,02	2,08	9,7	11,4	2320
		690	7,21	2,09	10,6	12,4	2650
	1260	410	6,71	2,00	8,0	10,2	1920
		550	7,03	1,93	10,0	11,9	2490
		690	7,25	1,95	10,5	12,7	2790
Ancorsteel 1000B	1120	410	6,79	2,07	9,1	10,4	2150
		550	7,09	2,06	10,7	11,9	2710
		690	7,26	2,03	11,4	12,7	3020
	1260	410	6,80	1,95	9,5	10,9	2460
		550	7,12	1,90	10,8	12,2	2890
		690	7,28	1,90	11,8	13,2	3190
Ancorsteel 1000B	1120	410	6,82	1,84	9,2	10,6	2530
		550	7,14	1,83	10,8	12,1	3070
		690	7,30	1,83	11,6	12,9	3340
	1260	410	6,86	1,76	9,5	11,0	2730
		550	7,14	1,72	10,9	12,4	3190
		690	7,32	1,68	11,7	13,2	3570

A Tabela 6 indica que o aumento dos níveis de pureza resulta na melhoria da compressibilidade do pó e do desempenho magnético (206). A adição de qualquer impureza no ferro puro aumenta a resistividade elétrica, devido a distorções no reticulado cristalino, que estes elementos provocam. Quanto maiores às imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. A obtenção de uma liga com maior resistividade ocorre quando se colocam dois ou mais metais em proporções próximas ou iguais. Os materiais presentes na liga interpenetram na rede cristalina aumentando a resistividade do ferro puro sinterizado. Os elementos mais utilizados para este efeito são o silício (Si), o fósforo (P) e o níquel (Ni) (207). As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. É efetivo eliminar átomos destas impurezas nos contornos de grãos para remover fatores de descontinuidade cristalina e distorções (térmica

ou do processamento) nos pós magnéticos macios para atingir menores forças coercitivas na obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades. O Pó de ferro puro é susceptível ao envelhecimento pelo nitrogênio, que é caracterizada por um aumento na força coerciva que o material fica exposto em um dispositivo magnético a níveis elevados de temperaturas por períodos prolongados (206). As adições de fósforo no ferro diminuem a suscetibilidade dos componentes ao envelhecimento nitrogênio (208).

Na fabricação de pó de ferro, a atomização introduz distorção térmica que é impossível de corrigir antes da sinterização. As distorções de processamento durante a moldagem por pressão são reduzidas com a sinterização e o tratamento térmico no pós-processamento. A eliminação mais efetiva da distorção é proporcional ao aumento da temperatura de tratamento (208), (209).

A elevação da temperatura de sinterização geralmente resulta uma maior densidade das peças sinterizadas, que melhora as propriedades magnéticas. No entanto, a utilização de temperaturas de sinterização mais elevadas tem um efeito mais significativo sobre as propriedades magnéticas do que a simples densificação, pois, resulta em granulometrias de maiores dimensões e morfologia refinada dos poros de ferrita propiciando um aumento nas propriedades magnéticas macias e apresentando um desempenho muito maior (206).

A porosidade da metalurgia do pó é geralmente prejudicial em muitas peças magnéticas, mesmo havendo diversos componentes produzidos por este processo. E aços forjados aproximam-se da indução de saturação teórica para o Fe livre de poros (2,15 T). Por isso diversas pesquisas estudam meios e processos para aumentar a densificação e as propriedades magnéticas mantendo a metalurgia do pó viável economicamente, como por exemplo, a compactação a quente, mudança de lubrificantes para compactação, diminuição do tamanho da partícula em escala nanométrica, dupla-compactação, dupla-sinterização entre outros fatores para aumentar a densificação (206), (210), (211), (212), (213).

À medida que a espessura do material é aumentada, as perdas por correntes parasitas aumentam em proporção com a espessura da lâmina ou do componente para a segunda potência. Assim, dobrando a espessura resultará num aumento de quatro vezes nas perdas por correntes. É por isso que as chapas magnéticas têm baixíssima espessura (0,18 a 0,50 mm) e são isoladas entre si. A perda por histerese é de certa forma justificada devido a tensões introduzidas no material durante a compactação, isto tem levado novas tecnologias de compactação que podem eliminar o trabalho a frio de pós de ferro e uma delas é a compactação a morno (213). A Tabela 6 apresenta as variações típicas de algumas propriedades magnéticas e elétricas devido a variações na composição, no processo de fabricação e conseqüentemente,

nas propriedades do material obtido por metalurgia do pó. A perda por correntes parasitas é reduzida com o aumento da resistividade e a perda por histerese é diminuída com o aumento da permeabilidade e/ou a diminuição da coercitividade. A aplicação desejada é definida entre os parâmetros ajustáveis, que apontam características, parâmetros e composição em relação às propriedades magnéticas esperadas (214). Cada autor em seu trabalho encontrou valores que permitiu construir a Tabela 7 com a relação das propriedades relacionando diversas pesquisas.

Tabela 7: propriedades do material pela variação na composição ou parâmetros (214).

Propriedade	Parâmetros						
	↑ Densidade	↑ tamanho de partícula	↑ Impurezas no ferro:			↑ Pressão compactação	↑ tamanho de grão
			N, C, O	Si,	P		
Permeabilidade	+ (204)	+ (199)	- (206)	+ (206)	+ (208)	+ (199)	+ (199)
Coercitividade (Hc)	0 (204)	+ (207)	+ (206)	- (215)	- (208)	0 (204)	- (199)
Indução de Saturação (Bs)	+ (204)	+ (199)	- (206)	- (215)	+ (208)	+ (199)	+ (206)
Resistividade	- (207)	- (199)	+ (207)	+ (207)	+ (208)	- (199)	- (199)
Perdas Magnéticas	- (209)	- (209)	+ (209)	- (207)	- (216)	- (209)	- (203)

Fonte: Adaptado de (214).

Legenda: (-) Diminui (+) Aumenta (0) não influência significativamente

Nos ensaios de perdas magnéticas em núcleos sinterizados na forma de um transformador, observou-se que em frequências baixas, o material sinterizado apresentou perdas significativas, já em frequências elevadas comportou-se de forma similar aos núcleos de chapas laminadas (217). A adição de silício no ferro faz com que a liga obtenha um comportamento magnético anisotrópico que permite elevados rendimentos (216).

2.5.3. Perdas

O cientista Francês **Bernard Léon Foucault**, descobriu as correntes induzidas geradas por campos magnéticos variáveis denominados posteriormente de **Correntes de Foucault**. Assim que um fluxo magnético variável atravessa um material condutor induzindo correntes elétricas que se fecham em torno desse fluxo magnético, em planos perpendiculares à direção desse fluxo, uma consequência direta da **Lei de Lenz**, que menciona o sentido dessas correntes é tal, que o campo magnético gerado por elas tem efeito no sentido de manter constante o fluxo magnético. Observando a condutividade elétrica do material submetido ao campo

magnético variável, nota-se que as correntes de Foucault provocaram perdas por efeito joule e conseqüentemente um aquecimento do material (218).

A Perda do núcleo é composta principalmente pela perda por histerese (W_h) e perdas por correntes de Foucault (W_e). Estas correntes, também conhecidas por “correntes de turbilhão” (*eddy currents*), circulam num plano perpendicular às linhas de fluxo. Perda por histerese varia linearmente com a frequência ao passo e as perdas por correntes de Foucault variam como quadrado da frequência. A perda por histerese depende da composição e da estrutura do material e pode ser determinada a partir da área da curva de histerese. As perdas por correntes de Foucault são inversamente proporcionais à resistividade do material e variam com a segunda potência da corrente (P_e) do comprimento de percurso (espessura de laminação em conjuntos de pilha de chapas e o tamanho de partícula do pó em núcleos sinterizados) (219).

A perda total de energia (P_{tot}) entre a geração e a distribuição no Brasil chega a 15%. A chamada perda técnica, que é a energia elétrica gerada e perdida como calor durante a transmissão e distribuição, chega a aproximadamente 9% (220). Diversas são as fontes que formam as perdas elétricas como as correntes parasitas, campo parasita, histerese, perdas mecânicas, magnetoestricção, sistemas de refrigeração do componente elétrico além da resistência do enrolamento da própria máquina. Destas, as correntes parasitas, a histerese e magnetoestricção são importantes parâmetros dos materiais magnéticos macios. Quando sujeitas a uma magnetização alternada, as massas ferromagnéticas desperdiçam energia sob estas duas formas, que são as perdas por histerese e as perdas por correntes de Foucault. Uma solução são núcleos magnéticos macios com menores perdas, maior magnetização e aumento do custo para eficácia são a resposta possível de componentes de alta eficiência energética (221).

Os núcleos obtidos por metalurgia do pó apresentam perdas magnéticas comparáveis aos materiais estampados, a partir de 400 Hz. O material compactado tem as mais baixas perdas a frequências superiores a 400 Hz. A menor perda total do núcleo para o material compactado é devido a menores perdas por Foucault. As perdas relevantes em materiais magnéticos macios (perdas no entreferro: WB/f) estão divididas em três: Perdas por histerese (W_h); Perdas por correntes de Foucault (*Eddy current*) (W_e) e Perdas residuais (W_r). Perdas residuais é a combinação das perdas de ressonância⁴ juntamente com a por relaxamento

⁴**Perdas por Ressonância** – É a perda de um sistema a oscilar em máxima amplitude em certas frequências conhecidas como frequências ressonantes ou frequências naturais do sistema.

magnético⁵, que são importantes em níveis de baixa indução e frequências muito altas, portanto, não são significativas para este trabalho (222). Usando a equação Steinmetz, a perda total de energia (P_{tot}) pode ser expressa como pela equação 4:

$$P_{tot} = W_{tot}f = W_h f + W_e f = nB^{1,6}f + eB^2f^2 \quad \text{Eq. 4}$$

Onde W representa a energia dissipada, f a frequência, B a magnetização, n e e são constantes. As duas perdas podem ser separadas por perda total (P_{tot}) medida em diferentes frequências pela medição de frequência (f), e traçando os resultados contra frequência. A baixa frequência, a relação entre a perda de núcleo e a frequência de medição é linear. O valor extrapolado para $f = 0$ Hz corresponde à porção da perda de histerese (W_h) e a diferença entre W_h e W_{tot} representa as perdas por correntes parasitas (W_e). O método de separação de perdas foi aplicado durante muitos anos para a separação de perdas no transformador de chapas de aço silício comerciais. Este método é confiável quando a frequência e a permeabilidade são baixas ($f < 100$ Hz, $\mu < 5000$) (223).

A rotação dos domínios, durante a magnetização e desmagnetização, necessita de energia para acontecer, faz com que apareçam as perdas por histerese. Estas perdas traduzem a energia necessária para completar a reorientação dos domínios durante cada ciclo da corrente alternada aplicada ao material. As perdas por histerese (W_h) correspondem à conversão das perdas em um campo magnético estático. A área fechada (Figura 11) do ciclo histerético criada pela aplicação da corrente alternada é diretamente proporcional à energia dissipada durante um ciclo e por unidade de volume do material magnético (209), (223).

A perda durante altas frequências de movimento é devido ao efeito Joule da corrente induzida acompanhando a força eletromotriz produzida devido à indução eletromagnética em resposta a mudança no campo magnético. As correntes que são induzidas no material condutor são circulares (numa superfície perfeita) e induzem um campo magnético secundário que varia com a mesma amplitude e frequência em função do tempo em todo o material. As correntes de Foucault induzidas nesse local são distorcidas e alteram o campo secundário pela presença de defeito ou falha no material. Na Figura 23 está representado o fenômeno descrito (222), (218).

⁵**Relaxamento magnético**– Uma perturbação gerada no spin dos núcleos faz com que eles se magnetizem em uma direção diferente, mas depois eles voltam a se alinhar com o campo externo.

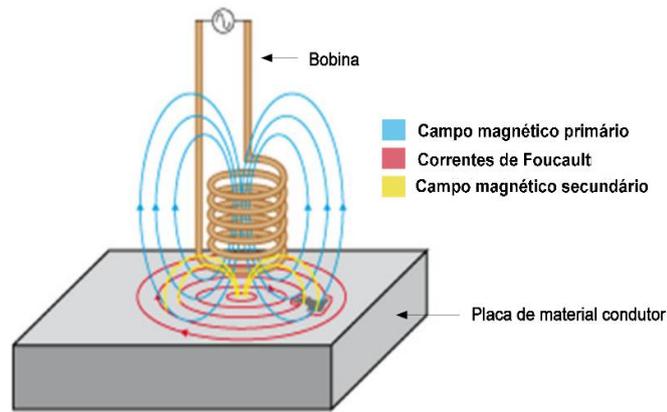


Figura 23: Princípio das correntes de Foucault (218).

Estas perdas estão associadas à diminuição de resistência elétrica dentro do núcleo causada pelo campo elétrico alternado, que são minimizadas com a utilização de materiais com alta resistividade como o silício. Isto permite o material magnético ter mais baixa coercitividade (209), (222). Estes materiais com menores perdas, alta indução magnética são os mais indicados na fabricação de motores elétricos.

2.6. Motor elétrico

O motor elétrico é uma máquina destinada a transformar energia elétrica em mecânica. Sendo o mais usado de todos os tipos de motores, pois combina as vantagens da utilização de energia elétrica, que possui baixo custo, facilidade de transporte, limpeza e simplicidade de comando. Aliado com sua construção simples, custo reduzido e grande versatilidade de adaptação às cargas dos mais diversos tipos e melhores rendimentos (224), (225). A Figura 24 apresenta um diagrama com vários tipos de motores.

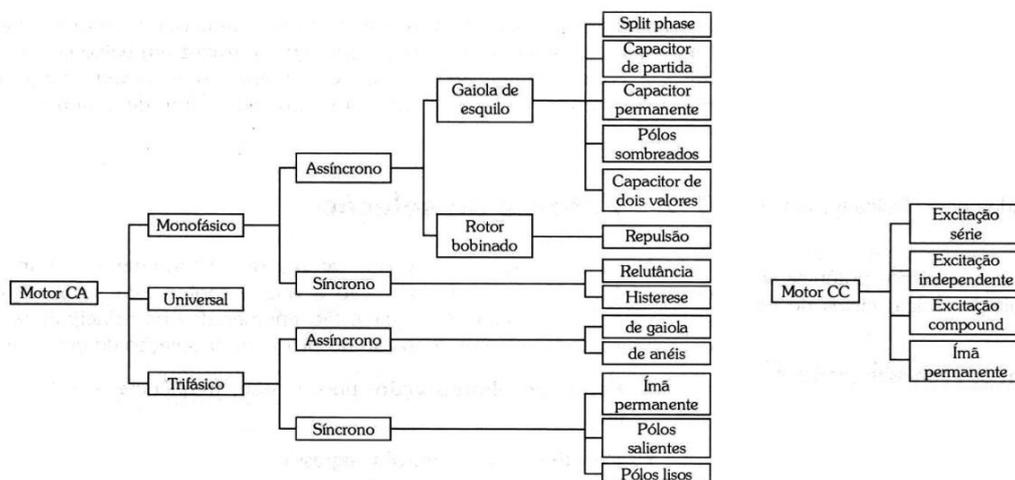


Figura 24: Tipo de Motores (226).

O Servomotor é um dispositivo eletromecânico possui uma parte fixa (estator) e outra móvel (rotor), como muitas outras máquinas síncronas. O estator possui bastante semelhança ao de uma máquina elétrica convencional, porém com restrições quanto à alimentação. Os servomotores podem ser classificados devido a sua topologia: Motor induzido de três fases (corrente alternada), motor tipo escova (corrente contínua), servo-motor de escova (corrente alternada e corrente contínua), motor de passo e motor linear.

2.6.1. Motor de passo

Os motores de passo possuem aplicabilidade em diversas áreas. São dispositivos eletromecânicos de movimento utilizados principalmente para converter informações em formato digital em movimento mecânicos rotativos discretos. Motores de passo podem ser vistos como motores elétricos sem comutadores e precisam de um controle e de um drive para acioná-los. Tipicamente, todos os enrolamentos do motor fazem parte do estator, e o rotor ou é de ímãs permanentes ou, no caso de motores de relutância variável, um bloco dentado de algum material levemente magnetizado. Existem três tipos principais de motores de passo, motores de ímã permanente (PM – *Permanent Magnet*), motores de relutância variável (VR – *Variable Reluctance*) e motores híbridos (Hb - *Hybrid*) (227), (228). A Figura 25 apresenta os principais componentes de um motor de passo.

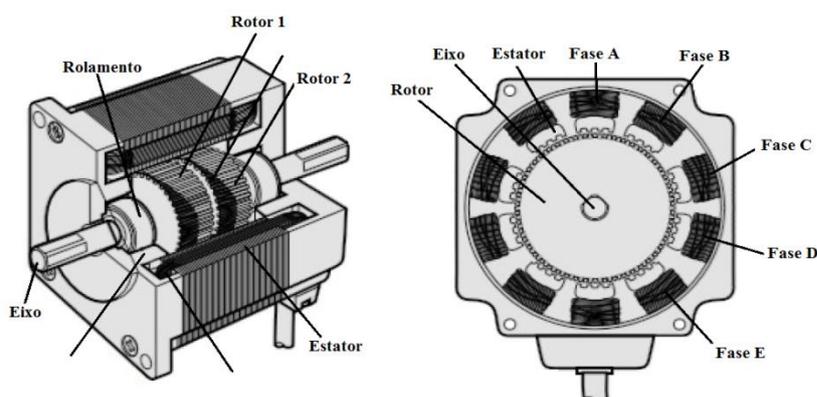


Figura 25: Minimotor de passo comercial Vexta (229).

2.6.2. Máquinas elétricas obtidas por Metalurgia do pó

Um estudo recente da IMS Research prevê que os embarques de motores de corrente contínua sem escova (*DC brushless motors*) vai superar os embarques de motores de corrente contínua com escovas (*DC brushed*) e motores de passo (*stepper motors*) utilizados em aplicações automotivas, no período de 2012-2017. Embarques de motores de corrente

contínua sem escova devem aumentar em 52% durante o período de 5 anos para chegar a mais de 462 milhões de unidades. Isso comparado com um crescimento de 30% para embarques de motores de corrente contínua com escovas para o mesmo período.

Estas previsões foram publicadas na edição de 2013 dos "motores elétricos em aplicações automotivas". Este estudo de mercado foi emitido pela *IMS Research* no início de 2013 (230). Diversos trabalhos foram realizados com ligas ferrosas nos últimos anos para a aplicação em máquinas elétricas. Os trabalhos tinham o foco de obter rotores e estatores a partir da metalurgia do pó convencional (231), (232), (233), (217). Através da moldagem de pós por injeção outros trabalhos relacionados com estas ligas foram desenvolvidos (77), (234), (235), (12) e também merecem destaque o trabalho de análise da influência de moagem nestas ligas (236). A metalurgia do pó tem crescido em diversas aplicações de motores. As vantagens e benefícios, o emprego de materiais em motores de tração e em outros dispositivos é um importante passo para o avanço dos veículos elétricos e híbridos, que no início da década de 2000 eram vistos apenas como automóveis curiosos ou conceituais e hoje são considerados a solução para a redução de poluentes nas grandes cidades (237). Diversos motores foram desenvolvidos pelo processo de metalurgia do pó com a utilização do SMC (compósitos magnéticos moles), que são basicamente partículas de pó ferromagnético revestido por filme isolante elétrico como os motores de corrente contínua sem escova, motores de corrente contínua com escovas, motores de passo, motores de fluxo transversal, motor linear para refrigerador portátil, injetores de sistema diesel (237).

A investigação do *design* interno de um motor com pólos no formato de garras (*claw-pole*) fornece uma visão para seu funcionamento e, portanto, pode ser utilizado para a sua concepção geral. Com efeito, do trabalho desempenhado, permitiu a realização de um servomotor de pólos de garra que é capaz de atingir uma densidade de torque de aproximadamente 1,5 Nm/kg a um fator de potência de 0,9 fabricado por metalurgia do pó. O custo do material do projeto proposto é de cerca de 3,5 Euro/fase em que o maior custo é devido ao ímã. Outras melhorias no projeto são sugeridas. Por exemplo, mostra-se que uma redução de 20% no custo do ímã (reduzindo o comprimento de ímã) é possível sem grandes perdas no desempenho. Mesmo que o custo do material seja bastante elevado, o custo de produção das peças e a montagem deverão ser menores do que o laboratorial, devido à construção simples, com poucas peças. Neste caso, todo o motor teve de ser modelado, devido à estrutura do rotor. No entanto, para uma marca, com uma parte de rotor para cada uma das três fases de estator, que é suficiente para modelar dois campos de pólo de uma só fase, exceto quando se considera o vazamento interfase (238). A Figura 26 apresenta o motor com pólos

de garras. A Figura 26(a) mostra o modelamento do motor em CAD 3D, a Figura 26(b) exhibe o estator montado, a Figura 26(c) apresenta o rotor e a Figura 26(d) expõem as peças que montam o estator (238).

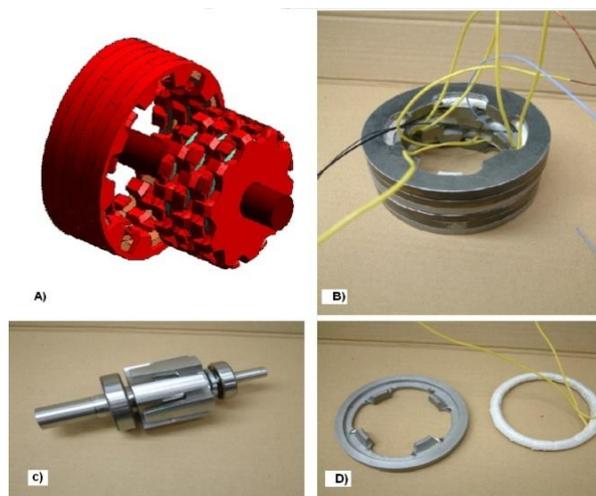


Figura 26: Motor elétrico com pólos de garras obtidos por Metalurgia do Pó (238).

Muitos materiais magnéticos têm surgido para atender a metalurgia do pó, que são recomendados para circuitos magnéticos 3D, tais como rotores com polos de garras, geradores de fluxo transversal (TFMs) como exemplos comerciais o ferro puro AccuCORE® (Estados Unidos). A curva de magnetização e a curva específica de perdas do AccuCORE® sinterizado são mostradas na Tabela 8 (239).

Tabela 8: Curva de magnetização X perdas do AccuCORE® (239).

Curva de Magnetização		Curva específica de perda no núcleo		
Densidade de fluxo magnético, (B) [T].	Intensidade de campo magnético, (H) [A/m].	Frequência Hz [w/kg]		
		60	100	400
0,10	132	0,132	0,242	1,058
0,20	233	0,419	0,683	3,263
0,30	312	0,772	1,323	6,217
0,40	400	1,212	2,072	9,811
0,50	498	1,742	2,976	14,098
0,60	613	2,135	3,968	18,850
0,70	749	2,954	5,071	24,295
0,80	909	3,660	6,305	30,490
0,90	1107	4,431	7,650	37,346
1,00	1357	5,247	9,039	44,489
1,10	1677	6,129	10,582	52,911
1,20	2101	7,033	12,214	61,377
1,30	2687	7,981	13,845	70,151
1,40	3525	8,929	15,565	79,168
1,50	4763	9,965	17,394	90,302
1,60	6563	10,869	19,048	99,671

O AccuCORE® cujas perdas no núcleo específico a 1T e 100 Hz ficam em torno de 9 W/kg. A TSC International de Wadsworth, Illinois, EUA desenvolveu um novo material em pó, AccuCORE®. Com competitividade com as chapas laminadas tradicionais. Onde o material sinterizado tem altíssima densidade de saturação de fluxo magnético. A densidade específica ficou entre 7,55 a 7,70 g/cm³ (239).

Existem os motores de fluxo axial com ímã permanente (AFPM) que têm duas características evidentes atribuídas ao seu nome a esta categoria, sendo a primeira que o fluxo trafega no sentido axial e a segunda é que possui ímãs permanentes no rotor, que geralmente são ferro com terras raras, cujo material de fabricação é Nd-Fe-B (Neodímio-Ferro-Boro). Existem diversos pesquisadores trabalhando para transformar este tipo de motor em algo funcional e viavelmente comercial (240), (241), (242). Motores de fluxo axial (243) com ímãs permanentes podem ser simples ou de dupla face. Este último possui um rotor em forma de disco com ímã permanentes no interno e tem os enrolamentos localizados nos dois núcleos do estator. O disco com os ímãs permanentes giram entre os dois estatores. A Figura 27 mostra este tipo de motor. Onde, a Figura 27(a) amostra motor de uma face AFPM, a 27(b) exhibe o motor AFPM dupla face com rotor interno, a 27(c) exhibe Motor AFPM dupla face com rotores externos, 27(d) mostra vários rotores e estatores em pilha de um único motor AFPM.

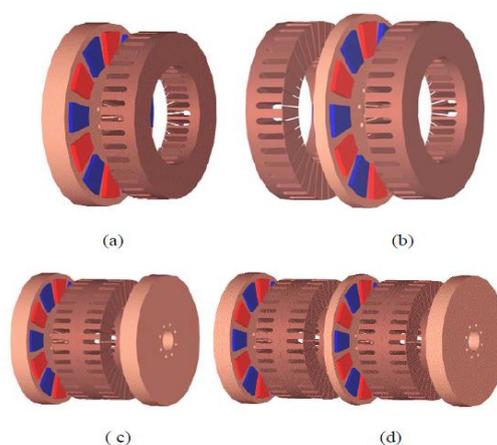


Figura 27: Motores de fluxo axial com ímã permanente (AFPM) (241).

Tem crescido o interesse de pesquisa por este tipo de motor, pois, estão sendo usados para veículos hídricos e elétricos (244) e turbinas eólicas modernas (242). O aumento da capacidade da turbina eólica depende dos geradores de indução alojados na nacelle (cabina ligada às pás do rotor no topo da torre de turbina) que devem solicitar maiores densidades de energia que podem ser conseguidas com ímãs permanentes (221). A Figura 28 apresenta um motor AFPM aplicado a turbina eólica.

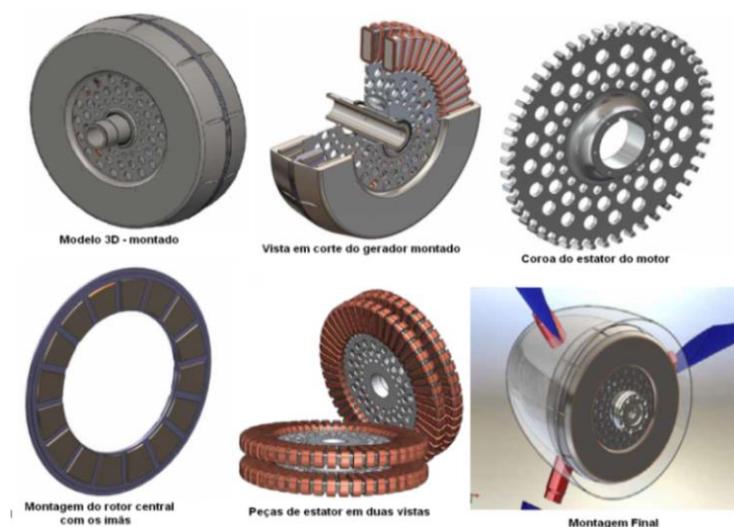


Figura 28: Motores de fluxo axial com ímã permanente (AFPM) aplicado a turbinas (242).

Os núcleos do gerador de uma turbina eólica (rotor e estator) precisam ter características magnéticas macias, ou seja, de fácil magnetização/desmagnetização para o correto funcionamento da máquina elétrica. Muitas pesquisas estão utilizando a metalurgia do pó para obtenção de vários motores. A Figura 29(a) exibe um transformador de chapas laminadas e a Figura 29(b) mostra o transformador fabricado por metalurgia do pó. Já a Figura 29(c) apresenta um protótipo do rotor desenvolvido de 4 polos com ímãs permanentes e núcleo de ferro puro aplicado em um gerador eólico síncrono de pequeno porte até 10 kW de potência (217), (214).

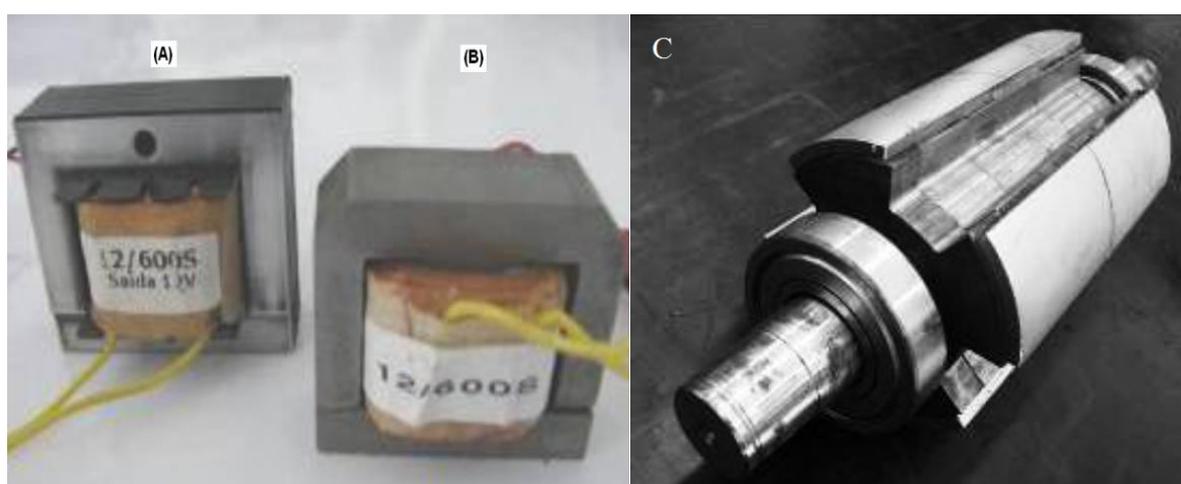


Figura 29: Transformador e rotor de quatro polos obtidos por Metalurgia do Pó (217), (214).

Os fatores que afetam o desempenho das máquinas elétricas são vários, mas em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos devem

apresentar as seguintes propriedades como alta permeabilidade magnética relativa; baixa coercitividade magnética; alta resistividade ou resistência elétrica e alta indução de saturação (210).

2.7. Projeto de motores

O projeto de um motor deve basear-se nas necessidades da aplicação, que são os primeiros parâmetros estabelecidos como velocidade, torque, alimentação entre outras. Estes motores são geralmente muito pequenos e podem ser desenvolvidos por processos alternativos. A escolha do número de polos depende de vários fatores, tais como: material constituinte, configuração do rotor, montagem mecânica, que afetam diretamente velocidade, torque desejados. A resistência e a indutância do enrolamento do estator são calculadas utilizando programa de máquinas elétricas através de elementos finitos (245). A maioria dos motores utiliza como materiais os aços ABNT 1006 e 1008 na sua construção. Os motores de alto desempenho e rendimento utilizam o aço elétrico de ferro-3% silício que permite maior precisão com menores perdas (189).

2.7.1. Sistema CAD/CAE/CAM

As tecnologias computacionais em processos de fabricação permitem a otimização no desenvolvimento de produtos, tomada prévia de decisão em cada fase do processo e redução da repetição de tarefas que oneram o desenvolvimento de produtos e processos em tempo e custo. Os processos de modelamento tri-dimensional de um componente no sistema desenho assistido por computador - CAD (*Computer Aided Design*), dentro de tolerâncias que atingem o mínimo 1/10 mm são fundamentais para uso destas informações para etapas seguintes: como a simulação computacional através de elementos finitos da engenharia assistida por computador - CAE (*Computer Aided Engineering*) ou fabricação de matrizes e outras usinagem de alta precisão com a ajuda da manufatura assistido por computador - CAM (*Computer Aided Manufacture*). O sistema CAD / CAE /CAM está presente na indústria fabricando matriz, moldes de injeção, próteses dentárias e qualquer outra atividade de fabricação através de usinagem de materiais (246), (247) inclusive na fabricação dos estatores e rotores.

2.7.2. Introdução ao Método de Elementos Finitos

O desenvolvimento do Método de Elementos Finitos (MEF), que o conduziram ao formato que atualmente apresenta maior aceitação surgiu na década de 60 e início da de 70 do século XX. A ideia principal é dividir o problema em um grande número de regiões, cada um com uma geometria simples que é chamada de malha. Os elementos finitos mais comuns eram os triangulares e os tetraédricos, passando-se mais tarde a dar preferência aos quadriláteros e aos hexaedros. O modo como o MEF é formulado e aplicado para cada tipo de problema e necessidade. Ao contrário de outros métodos que eram utilizados no passado, o MEF só tem utilidade prática se houver um computador, devido à grande quantidade de cálculos que é necessário realizarem para a resolução de grandes sistemas de equações lineares. Assim, compreende-se que o rápido desenvolvimento do MEF tenha praticamente coincidido com a generalização da utilização de computadores nos centros de pesquisa (248). Para cada necessidade há um desenvolvimento que segue regras e leis equacionadas e podem ser simulada pelo MEF. Há programa para simulação de forjamento (249), simulação de moldagem por injeção (250), (251), estruturas estáticas (252), processo de fundição (253), simulação de máquinas elétricas (254), entre outras muitas possibilidades (255).

2.7.3. Simulação computacional de máquinas elétricas

A simulação computacional de máquinas elétricas são os resultados das iterações eletromagnéticas que foram obtidos através da utilização de programa de elementos finitos. O FEMM 4.2 (*Finite Element Method Magnetics*) tem como objetivo a solução de equações diferenciais para uma diversidade de entradas (207). A Figura 30 apresenta a metodologia de um *programa* de simulação pelo MEF aplicado a materiais magnéticos.

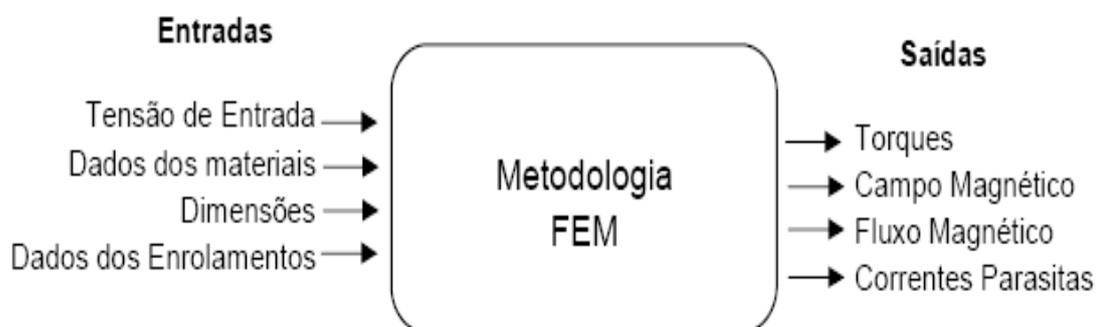


Figura 30: Variáveis de entrada através MEF de materiais magnéticos para saída (207).

Com a geometria definida é possível colocar os materiais que compõem cada parte do motor e suas propriedades eletromagnéticas. Para a obtenção dos resultados esperados é necessário que seja inserido no pré-processor o desenho em CAD de um corte transversal da máquina elétrica, e após isto aberto no FEMM 4.2. Foram inseridos os seguintes dados do servomotor como a rotação nominal de 3000 RPM 8 pólos, 400 W de potência elétrica (P_e), 2 A de corrente nominal, 42 espiras, comprimento de 40 mm e torque de 1,6 Nm. A Figura 31 exibe uma simulação de um servo motor (207).

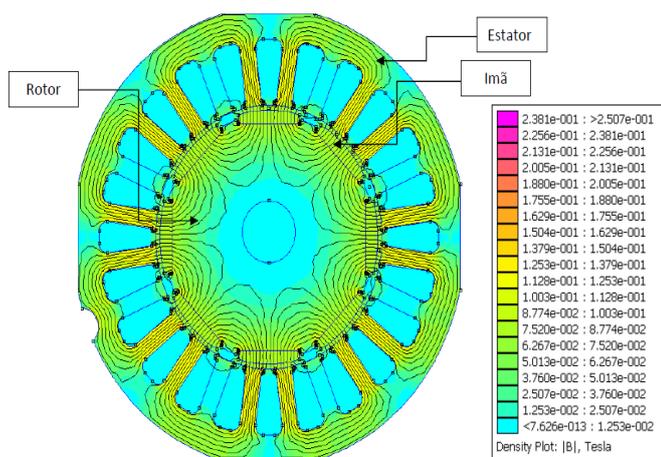


Figura 31: Geometria do servomotor e linhas de fluxo magnético (207).

Após a definição de todas as entradas necessárias é gerada a malha. O pós-processor propõe ao usuário uma série de respostas ao problema apresentado. Foi analisado o comportamento de um material magnético e as propriedades obtidas foram as correntes de Foucault e fluxo magnético. O torque apresentado pelo servomotor de núcleo sinterizado foi aproximadamente o mesmo do apresentado pelo motor original da WEG, em que está baseado o estudo, com 2,4 Nm. O valor de perdas por correntes de Foucault foi de 0,2 MA/m² validando a simulação por elementos finitos (207).

2.7.4. Motor aplicado na área médica

*Nano Planetary*TM DC gearmotor modelo 206-101 é usado como um bloco de construção em miniatura para aplicações de consumo, instrumentos médicos ou aplicações automotivas. O modelo 206-102, assim como outros motores de seis milímetros (6 mm), demonstram um nível impressionante de projeto e precisão na fabricação. O modelo 206-108 consiste em um projeto em núcleo com seis milímetros de ímãs de Neodímio-Ferro-Boro. O

reductor planetário é o resultado da moldagem por injeção de precisão de alta qualidade, utilizando um composto de plástico e tem uma relação de engrenagem de 700:1. A Figura 32 apresenta característica de um mini-motor com 6 mm de diâmetro, 28 mm de comprimento do corpo, corrente nominal de 100 mA, voltagem de 3 V, torque avaliado em 0,2 mNm, com velocidade com rotações de 1800 RPM (256).

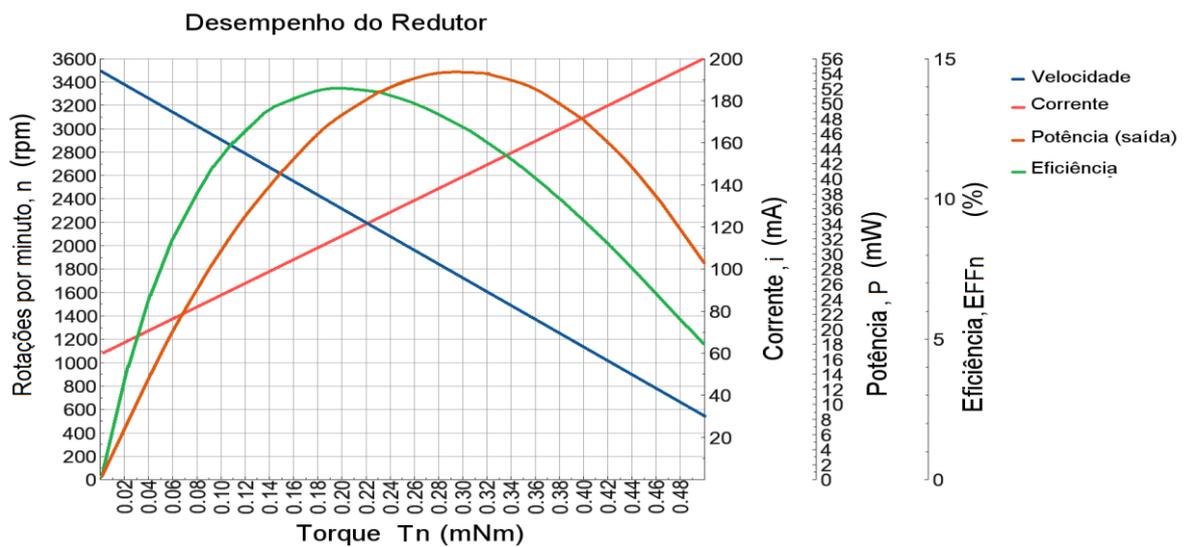


Figura 32: Características de um mini-motor comercial aplicado a área médica (256).

Observa-se boa eficiência do mini-motor, sendo uma família de motores injetados num composto de ímãs e polímero. A Figura 33 mostra o mini-motor comercial (256).

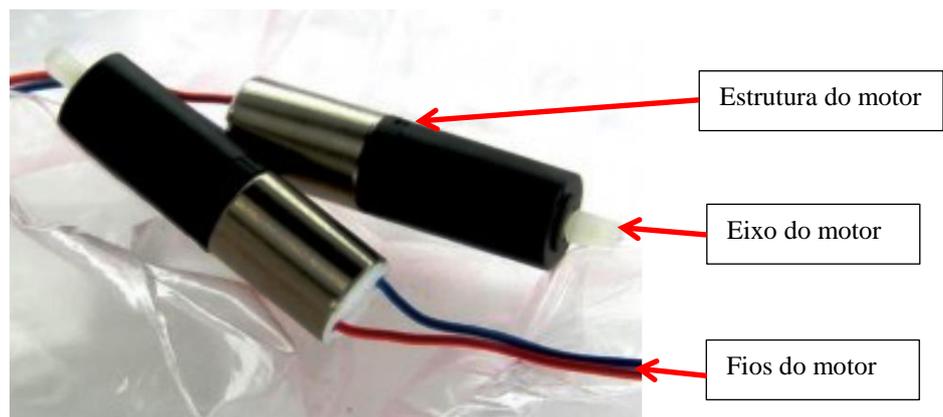


Figura 33: Mini-motor comercial aplicado à área médica (256).

Para diversos equipamentos médicos motores de alta densidade de energia são necessários por longo período de tempo como robôs cirúrgicos ou cápsulas endoscópicas (257). Um endoscópio comum possui um campo de visão limitado, sendo necessário trocar de catéteres durante a operação para obter-se outros ângulos de visão. Utilizando-se um mini-

motor de passo para girar um prisma na ponta do endoscópio, o campo de visão poderia alcançar 360° (258). Este projeto de pesquisa é extremamente importante devido a poucos motores de passo disponíveis nesta área tão fundamental da humanidade.

2.8. Pesquisas recentes vinculadas ao trabalho

Em 2014 foram fabricados peças micro-injetadas de metalduro constituída de WC–10Co–0,8VC com a carga injetável consistindo de parafina, polietileno de baixa densidade e ácido esteárico sendo sinterizado entre 1330 a 1450 °C. Os microcomponentes mostraram retração de comprimento entre 16 e 22%, boa qualidade superficial e dureza de maior valor quando comparado com a metalurgia do pó convencional (259). Utilizando a composição de WC–10%Co sendo sinterizado entre 1380 a 1420 °C. As peças sinterizadas apresentaram uma densificação de 96% da densidade teórica, uma dureza de 1700 kg/mm², uma resistência à flexão de 2100 MPa e uma rugosidade superficial de 1,17 µm (260).

Avaliaram-se os efeitos da adição de pó nanométrico no processo µPIM com misturas em pó micrométrico e polímero para a fabricação de micropeças. O sistema aglutinante da carga injetável foi constituído por polietileno glicol (PEG), Polimetil-metacrilato (PMMA), e ácido esteárico misturado no pó de aço inoxidável 316L. Os resultados indicam que a elevação do teor de 30% em peso de pó nanométrico aumentou o carregamento do pó e diminuiu as temperaturas de injeção e sinterização. Usando nanopós, a dureza, também aumentou de 182 HV a 221 HV, com uma contração linear de cerca de 9%, que é menos do que a dos micropós de 18% (261).

O comportamento reológico de uma carga injetável do aço inoxidável 316L com pó micrométrico e 25% nanométrico foi investigada através do reômetro de torque que mede as variações da mistura binária com a função de determinar a taxa de carregamento do pó da matéria-prima na carga injetável. Foi notável que os parâmetros reológicos foram submetidos a uma mudança brusca no volume da carga de pó de 66% a 68%. Este intervalo de carga em pó foi consistente com o volume de carregamento de pó ótima em 66%. (262).

O comportamento durante a sinterização do pó de Ferro 75% micrométrico e 25% nanométrico moldado por injeção sob temperatura de 70 °C e pressão de injeção de 4 MPa, foi investigada em relação ao desenvolvimento microestrutural. Verificou-se que a densidade do sinterizado da composição pó-micro/nano foi notavelmente com o aumento nas temperaturas de 800 a 900 °C, segundo o efeito nanopó devido a elevação do transporte do material por difusão dos limites de grão atingiu a densidade relativa de 97% (65).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho foi dividido em 4 fases para melhor explicação da pesquisa. A **Fase 1** utiliza silício no ferro puro constituindo quatro composições para avaliar as propriedades magnéticas do material micrométrico obtido por metalurgia do pó convencional. A Figura 34 demonstra a rota escolhida para obtenção de propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas das ligas escolhidas por metalurgia do pó convencional.

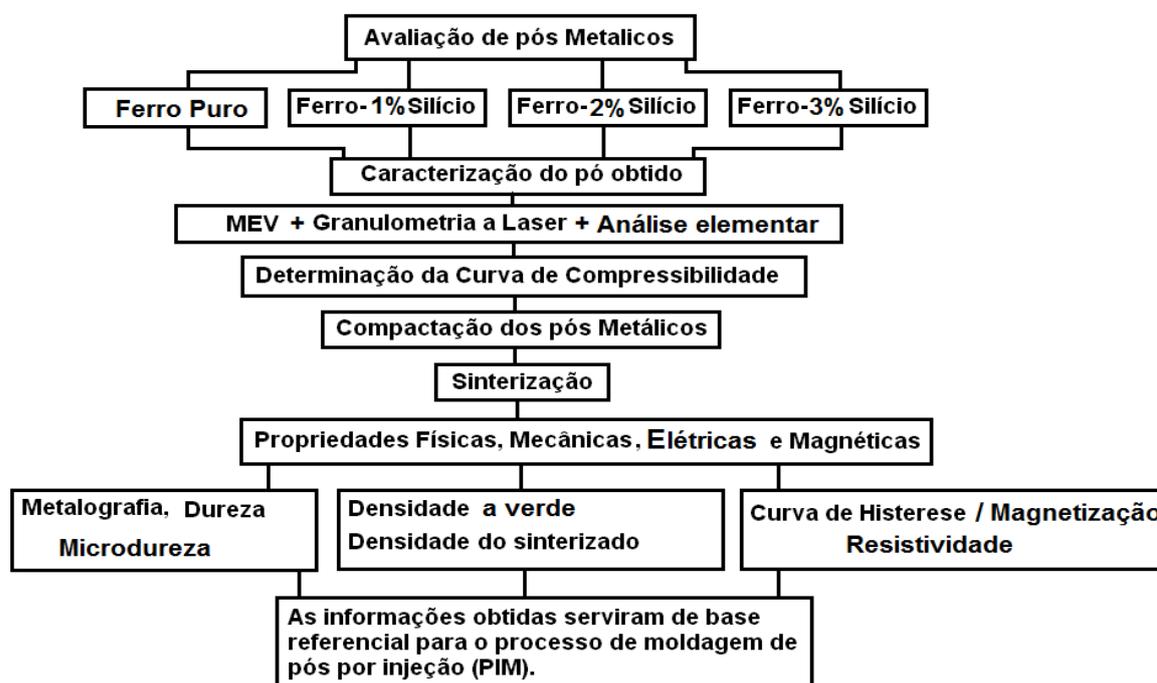


Figura 34: Diagrama de blocos do trabalho em Metalurgia do Pó convencional - Fase 1.

A Figura 34 explica detalhadamente a **Fase – 1** com os ensaios realizados para a caracterização dos pós metálicos e obtenção de peças por metalurgia do pó convencional. Estes dados serviram de referências para comparar com os resultados das mesmas ligas produzidas por moldagem de pós por injeção. Os valores de parâmetros físicos, mecânicos, elétricos e magnéticos foram obtidos através de corpos de prova. Decidiu-se trabalhar as características do processo de compactação e sinterização do ferro puro e ferro-silício, e posteriormente injetar o pó elementar com ligantes e polímero estrutural. A fase 1 foi criada para determinar a melhor composição para fabricar o minimotor de passo com o menor custo, tempo e variáveis de processamento. Definiu-se o comportamento e as melhores características dos materiais escolhidos através dos processos de metalurgia do pó convencional devido ao custo e ao tempo de processamento.

A carga injetável foi definida a partir da utilização dos polímeros e lubrificantes comerciais com o menor custo e utilizados na moldagem de pós metálicos juntamente com as informações retiradas da literatura (63), (67), (56). A Figura 35 apresenta a **Fase – 2** de forma detalhada com os ensaios realizados para a caracterização dos lubrificantes e dos polímeros estruturais com o objetivo de determinar a carga injetável para ser adicionada ao pó metálico e realizar a moldagem de pós-metálicos.

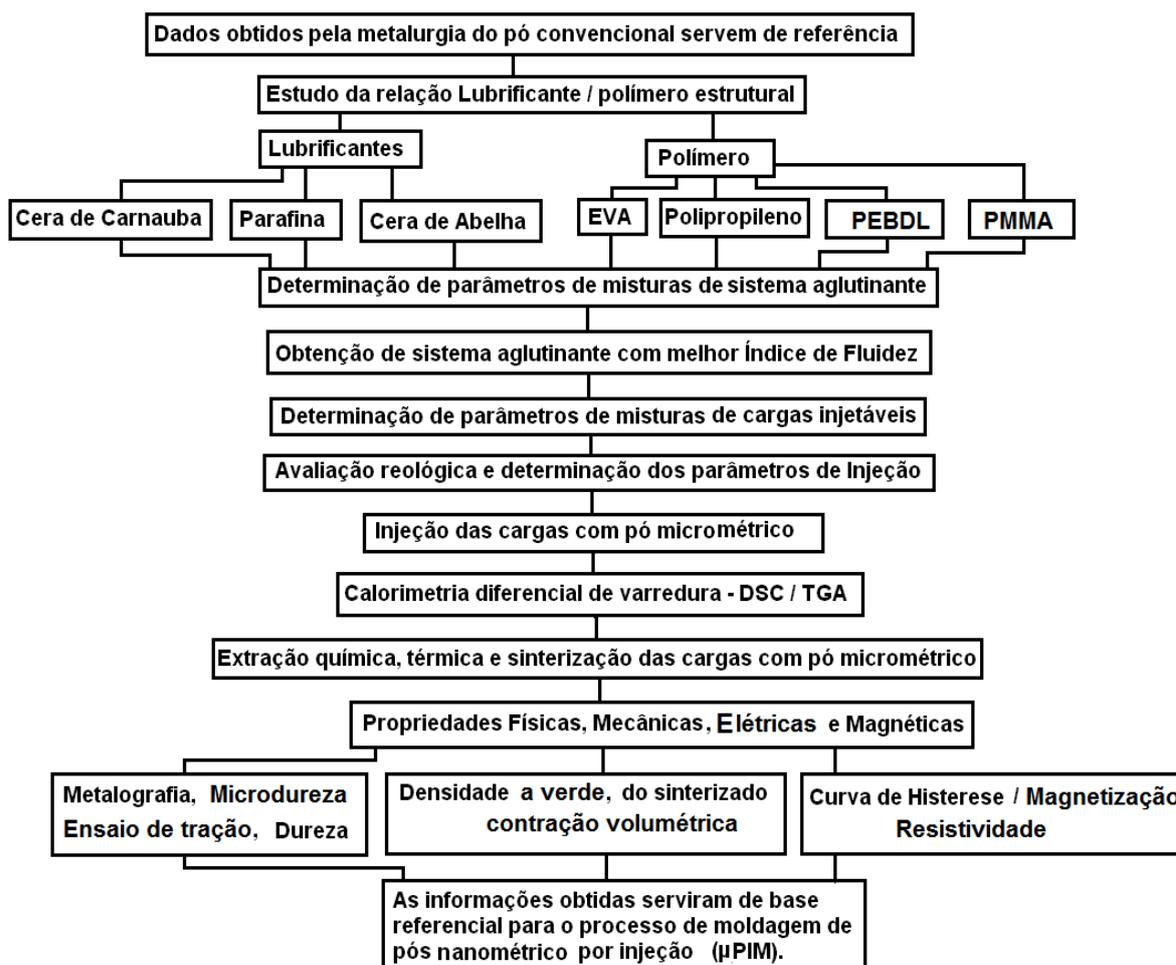


Figura 35: Diagrama de blocos de moldagem de pós metálicos por injeção - Fase 2

Observa-se que na Figura 35, a metodologia estruturada de avaliação do Polipropileno (PP), do Poliestireno de Baixa Densidade Linear (PEBDL), do Polimetil-Metacrilato (PMMA) e do Etileno Acetato de Vinila (EVA) como polímeros estruturais para a carga injetável através de reometria das combinações entre os mesmos. Escolheu-se a parafina, a cera de abelha e a cera de carnaúba como lubrificantes em percentuais definidos.

Após a definição do polímero estrutural e da combinação de lubrificantes através da reometria. Misturou-se a carga polimérica com o pó metálico para constituir a carga injetável

desejada. Após a injeção da carga injetável metálica realizou-se a extração química, térmica e sinterização. Os corpos de prova serviram para determinar as propriedades física, mecânicas, elétricas e magnéticas das ligas injetadas de ferro e ferro-silício. Estas propriedades magnéticas determinadas experimentalmente e as geometrias do mini-servomotor foram utilizadas junto ao método de elementos finitos para as simulações. As simulações do mini-motor de passo com as propriedades obtidas pela metalurgia do pó convencional e a moldagem de pós metálicos por injeção das mesmas ligas foram comparadas.

A Figura 36 denota a metodologia escolhida da **Fase – 3** para obtenção de propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas do ferro por moldagem de pós nanométricos por injeção e parcialmente nanométrico.

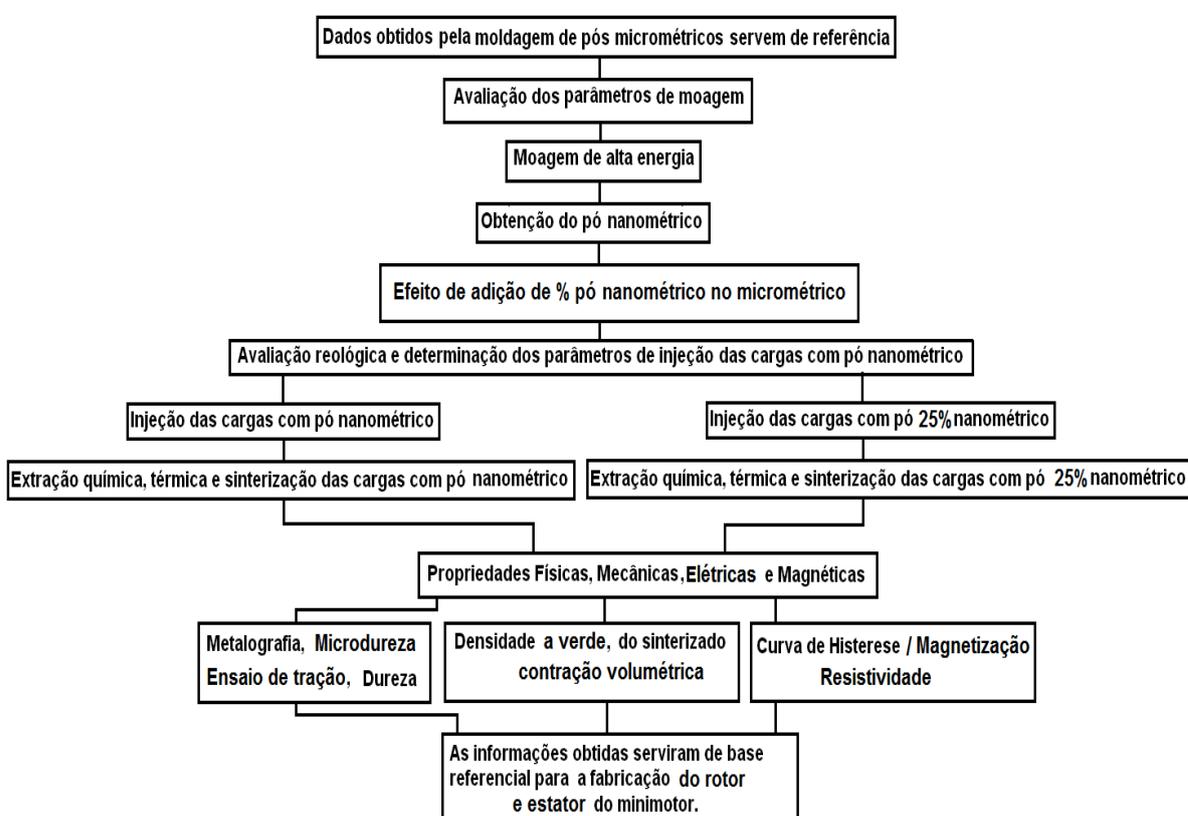


Figura 36: Diagrama de blocos da moldagem por injeção de pós nanométricos - Fase 3

Após todas as informações colhidas com pós micrométricos pelos dois processos da Metalurgia do Pó, foi realizado o processo de moagem de alta energia do pó micrométrico para obtenção do pó nanométrico. Utilizaram-se os parâmetros otimizados da pesquisa preliminar e concluiu-se a avaliação reológica com a carga injetável com pó metálico nanométrico. Avaliou-se a utilização de 25% de pó nanométrico e 75 % de pó micrométrico conforme a literatura indicou para obtenção de melhores propriedades (65). Realizou-se a

injeção dos corpos de prova, extração e sinterização, determinaram-se as propriedades físicas, elétricas, mecânicas e magnéticas e simularam-se as geometrias diferentes de rotores juntamente com a geometria do estator em ferro sinterizado no programa FEMM para observar evolução das características magnéticas na geometria final do mini-servomotor. A Figura 37 apresenta o diagrama de bloco da **Fase – 4** para validação do projeto do minimotor de passo.

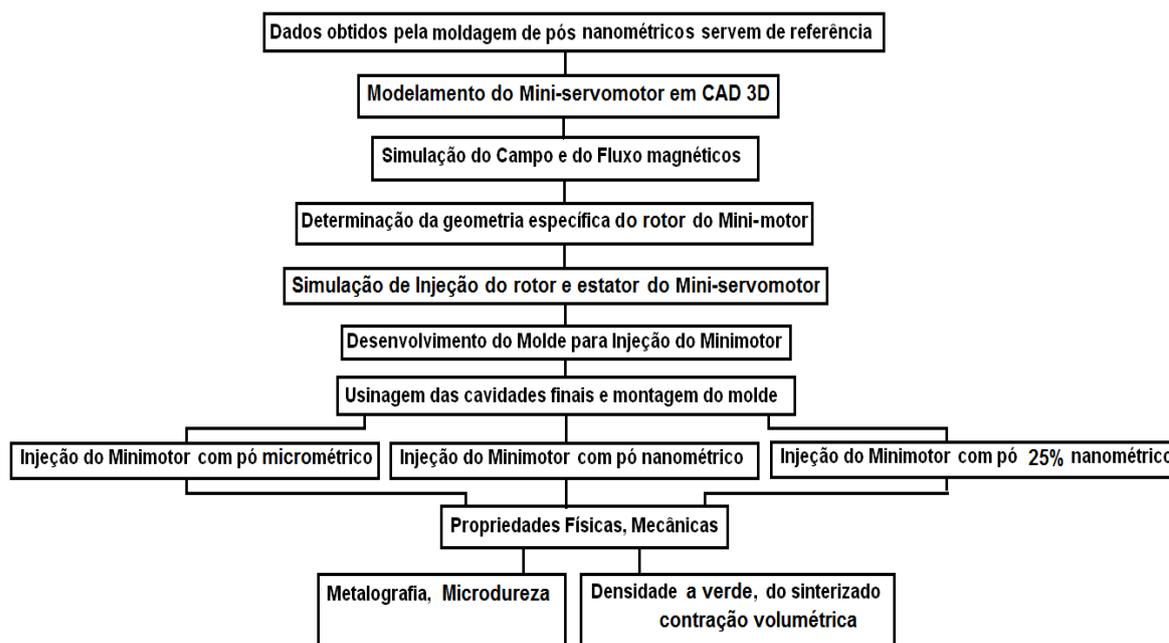


Figura 37: Diagrama de blocos da fabricação e validação do mini-motor - Fase 4.

Após a caracterização das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas do material necessária para a fabricação de um mini-servomotor, foi realizada a validação final do projeto com o projeto do molde de injeção dos estatores e rotores do minimotor de passo juntamente com a usinagem da cavidade e montagem da ferramenta. Com a injeção dos componentes do minimotor de passo, extração e sinterização foram avaliadas as propriedades físicas e mecânicas do rotor e estator injetado com pó micrométrico, parcialmente nanométrico e nanométrico.

3.1. Obtenção dos pós químicos elementares micrométricos

Os pós constituintes deste trabalho foram o pó de ferro da empresa TCK com pureza de 99,5%, com tamanho de partícula de 9 μm e o pó de silício fornecido pela empresa Vetec Química Fina Ltda. com pureza de 99%, com tamanho de partícula entre 10 a 20 μm . Para

obter as ligas desejadas resolveu-se trabalhar com o pó de ferro com baixíssima granulometria e adicionou-se por balanço de massa o pó de silício.

3.2. Determinação do tamanho de partícula micrométrica

A determinação do tamanho de partícula foi realizada em dois níveis diferentes. A primeira etapa foi a avaliação do tamanho e morfologia da partícula que foi analisada com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e granulômetro a laser.

3.2.1. Microscópio eletrônico de varredura - MEV

Para determinação do tamanho de partícula micrométrica as amostras foram analisadas no MEV. Foi utilizado o MEV do centro de microscopia da UFRGS, de marca JEOL modelo 5800 com EDS acoplada.

3.2.2. Granulometria por difração de laser

A análise de tamanho de partículas por difração de laser é um método pelo qual as partículas são dispersas num fluido em movimento causando descontinuidades no fluxo do fluido, que são detectadas por uma luz incidente e correlacionadas com o tamanho de partícula.

O princípio do método é o ângulo de difração ser inversamente proporcional ao tamanho da partícula. Ao atingir uma quantidade de partículas, a luz incidente sofre uma interação segundo os quatro diferentes fenômenos (difração, refração, reflexão e absorção) formando um invólucro tridimensional de luz. O formato e o tamanho deste invólucro são afetados pelo índice de refração relativa da partícula no meio dispersante, pelo comprimento de onda da luz, tamanho e formato da partícula.

Detectores estrategicamente posicionados medem a intensidade e o ângulo da luz espalhada. O sinal dos detectores é então convertido para a distribuição de tamanho de partícula através programas matemáticos. Este método determinou o tamanho inicial da partícula micrométrica utilizando o granulômetro da marca Cilas.

3.3. Avaliação da composição química orgânica

Os conteúdos de carbono, nitrogênio, hidrogênio e enxofre no pó de ferro foram determinados no Laboratório de processamento mineral - Laprom, em equipamento CNHOS Elementar da marca Vario Macro, pelo método condutividade térmica com o uso de hélio como gás de arraste e em material com granulometria passante na malha 200 mesh (0,090 mm) utilizando a norma ASTM 5373. Analiticamente testados os diversos protocolos padrões incluem as análises: CNHOS (carbono, nitrogênio, hidrogênio, oxigênio e enxofre).

3.4. Mistura por balanço de massa dos pós micrométricos

O pó de ferro puro foi adquirido comercialmente com tamanho médio de $9\mu\text{m}$, que poder ser utilizado na moldagem de pós por injeção. Foram adicionados os percentuais de silício (1, 2 e 3%) ao ferro puro e utilizou-se de comparação com a literatura (67), (216), (214) que mostra que é o material possui propriedades magnéticas importantes. Pesou-se ferro puro comercial com uma quantidade satisfatória para a realização dos testes. Utilizou-se de uma balança analítica da marca Marte, com carga máxima de 2 kg e resolução de 0,01g para medir a massa exata de pó e a partir do cálculo de balanço de massa determinou-se a quantidade de silício a ser adicionada ao ferro puro comercial para obtenção da liga ferro-silício. Utilizou-se a mesma balança para a massa dos materiais constituintes do sistema de ligantes e para determinar as densidades.

3.5. Homogeneização dos pós micrométricos

A preparação da mistura dos pós metálicos por meio do misturador em “Y” foram homogeneizados durante 30 minutos a 22 RPM, objetivando uma maior integração do particulado utilizado.

3.6. Densidade aparente dos pós micrométricos

Define-se a densidade aparente de um pó como a massa (g) de uma unidade de volume de pó solto ou a relação da massa para o volume, em g/cm^3 . A importância do conhecimento dessa característica reside no fato de que ela determina o verdadeiro volume ocupado por uma massa solta de pó e em consequência, determina a profundidade da cavidade da matriz e o comprimento do curso da prensa necessário para compactar e densificar o pó. Os valores de densidade aparente foram obtidos utilizando a cavidade da matriz de 50,0 mm de altura (h),

com diâmetro de 13,0 mm, preenchendo-a por completa com a mistura de pó solto, tendo um volume fixo de 6,63 cm³, em um formato de cilíndrico (263), (264). Retirando este pó e medindo a sua massa na balança analítica.

3.7. Obtenção dos pós nanométricos

O pó de ferro foi utilizado na moagem para obtenção de partículas nanométricas e acertados os parâmetros do processo.

3.7.1. Moinho atritor

A moagem dos pós metálicos ocorreu através do moinho atritor horizontal da marca NETZSCH modelo LMZ05 com rotação de 1500 RPM durante 53 horas em via úmida. Foram colocados 600 gramas de pó metálico e 6 litros de álcool etílico, que foi sendo retroalimentado com álcool conforme o mesmo evaporava durante o processamento. Devido ao projeto do moinho, a moagem deve ser realizada de maneira ininterrupta, pois, uma parada no meio do processo causa a decantação do pó e o aumento no sistema de pressão do moinho. Os corpos de moagem são de zircônia. O volume útil da câmara de moagem é de 0,5 litros, com velocidade do eixo agitador de 500 - 3000 RPM, sistema de separação por peneira tubular com abertura 0,01mm. A Figura 38 apresenta o moinho atritor horizontal.



Figura 38: Moinho atritor horizontal NETZSCH LMZ05.

Após o processamento no moinho, colocou-se o conteúdo da câmara anaeróbica e houve a filtragem do álcool e a secagem do pó por 15 dias.

3.8. Determinação do tamanho de partícula nanométrica

A determinação do tamanho de partícula foi realizada com a avaliação do tamanho e morfologia da partícula com o microscópio eletrônico de varredura (MEV) e foi utilizado também o microscópio de eletrônica de transmissão (MET).

3.8.1. Microscopia eletrônica de transmissão

A microscopia eletrônica de transmissão - MET (*transmission electron microscopy - TEM*) é uma técnica que possibilita a aquisição de imagens com resolução muito superior às obtidas com microscópios eletrônicos de varredura, em consequência da utilização de um feixe de elétrons que é emitido em direção a uma amostra ultrafina, interagindo com a mesma enquanto a atravessa. Um feixe de elétrons atravessa a amostra sofrendo diversos tipos de espalhamento que dependem das características do material.

As imagens de campo claro são formadas por elétrons que sofrem pouco desvio, enquanto as de campo escuro são formadas por elétrons difratados pelos planos cristalinos do material. Interações do feixe com o material geram raios-X característicos que fornecem informações sobre os elementos químicos presentes na amostra (265), (266), (267). O porta-amostra de um MET incluem eclusas de ar para permitir a inserção do suporte da amostra no vácuo com um aumento mínimo na pressão em outras áreas do microscópio.

O tamanho padrão da grelha de um MET é um anel de 3,05 mm de diâmetro, com tamanho, espessura e malhas variando de alguns a 100 μm . Para obtenção da imagem presente neste trabalho foi utilizado o microscópio JEOL JEM 2010 (200 kV) e a técnica de difração de elétrons de área selecionada (*selected area electron diffraction - SAED*) no CME-UFRGS. Para preparação da amostra foi colocada muito pouca quantidade de amostra de pó na acetona pura e ficou em suspensão por 1 hora no ultrassom. Depois foram colocadas duas gotas de suspensão na grade e deixou-se a amostra em vácuo para secar. Após esse processo foi depositado carbono pela evaporação térmica na grade e analisou-se no microscópio. O carbono foi depositado para evitar efeito magnético do ferro que pode prejudicar o microscópio.

3.9. Compactação dos pós micrométricos

Foi realizada a curva de compressibilidade para determinar a pressão de compactação mais adequada em função da composição do material. A compactação das amostras aconteceu em duas etapas distintas: A primeira através de uma matriz cilíndrica de aço AISI D6 temperado (Figura 39(A)) na prensa hidráulica da marca Eka com capacidade máxima de 40 toneladas. O ferramental de compactação é a matriz de 13,0 mm de diâmetro interno (\emptyset) e 50,0 mm de altura (h) juntamente com o punção inferior de 15 mm de altura e o punção superior de 60 mm de altura.

Esta etapa se definiu a pressão de compactação através da curva de compressibilidade, traçada com base na norma ASTM B331 (268), (269), que define sendo a capacidade de certa quantidade de pó densificar sob a ação de uma pressão de compactação. A Segunda etapa (Figura 39(B)) foi utilizada uma matriz toroidal de aço AISI D6 temperado com 50 mm de diâmetro interno (\emptyset) e 40,0 mm de altura (h) juntamente com o pino macho de 40 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, o punção inferior de 40 mm e o punção superior de 60 mm de altura, os dois punções com diâmetro externo de 40 mm. A compactação toroidal foi realizada sob pressão de 600 MPa para a produção de corpos de prova anelares (Figura 39(C)) para determinação das propriedades magnéticas e elétricas. A Figura 39 mostra o ferramental onde foram realizadas as compactações.

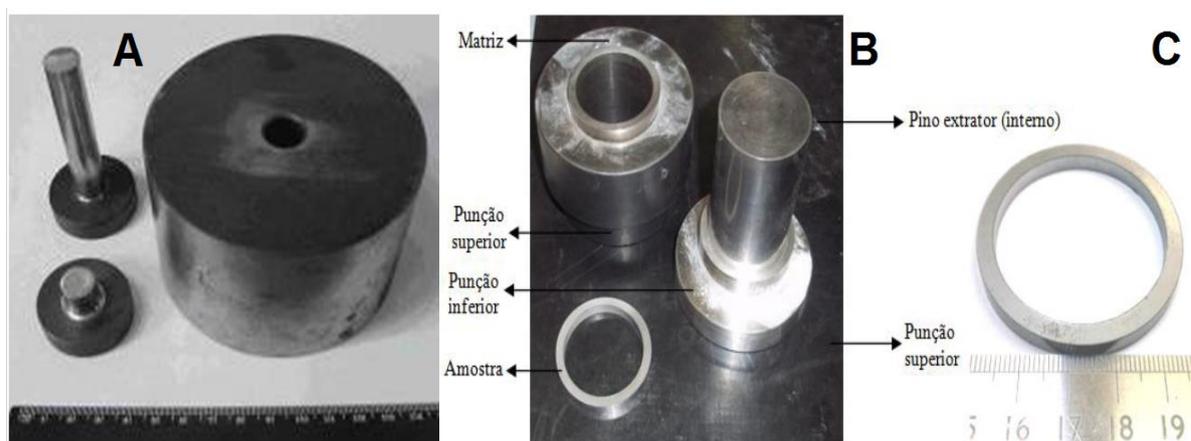


Figura 39: Ferramental de compactação cilíndrica (A) toroidal (B) e anéis compactados.

3.10. Preparação da Carga Injetável

Foram realizados testes de reologia para selecionar o polímero estrutural mais adequado a injeção de pó nanométrico. Para melhorar a viscosidade da carga injetável foram adicionados lubrificantes comerciais como a parafina, a cera de abelha e a cera de carnaúba em proporções para avaliar a através de reologia, qual o melhor lubrificante ou a combinação

destes para realizar a molhabilidade do pó metálico e a interação com o polímero. Utilizou-se o ácido esteárico como agente de acoplamento para a interação entre o sistema aglutinante e os pós metálicos.

3.10.1. Mistura da Carga Injetável

A mistura do polímero com os aglutinantes e os pós metálicos para a obtenção da carga ocorreu no reômetro de torque da marca Haake Rhecord modelo EU3V. O procedimento adotado para a ordem da mistura foi observado de maneira empírica. O procedimento que possibilita a homogeneidade da mistura inicia com a adição e fusão dos aglutinantes, seguido pelo polímero estrutural até a plastificação.

Após os aglutinantes e o polímero serem uma massa fundida homogênea é adicionado o pó metálico micrométrico. A velocidade de 32 RPM é utilizada para misturar os materiais por 10 minutos, depois passou-se para 64 RPM por mais 10 minutos e pelos últimos 10 minutos. A massa é misturada com 96 RPM para melhor homogeneização da mistura da carga injetável. Esta metodologia do processo de mistura da carga injetável se mostrou mais eficiente durante a execução deste trabalho para uma boa homogeneização entre o polímero, ceras e o pó metálico.

Após diversas misturas de carga nanométricas foi modificada a metodologia com o intuito de diminuir a quantidade de aglutinantes e melhorar a molhabilidade do pó nanométrico durante o processamento da carga injetável. Foi observado que aumentando a temperatura de 150 para 160 °C, plastificar primeiro o polímero estrutural e adicionar pó sobre o PEBDL até saturar a mistura, permite adicionar mais pó nanométrico com a menor quantidade de aglutinante.

Com a saturação da mistura adicionou-se o lubrificante até molhar a mistura e adiciona novamente pó nanométrico até a mistura de todos os elementos, intercalando entre o pó metálico nanométrico e a cera. A velocidade de 64 RPM é utilizada para misturar os materiais por 10 minutos depois se passou para 96 RPM por mais 10 minutos para melhor homogeneização da mistura da carga injetável. A Tabela 9 apresenta as cargas injetáveis utilizadas.

Tabela 9: Cargas injetáveis utilizadas

	Materiais	Massa (m) [g]	(%) em Massa	(%) em Volume [Vol]
Carga Injetável Micrométrica 150 °C	Pó de Ferro Micrométrico	203,60	92,5	60,00
	PEBDL	8,20	3,75	20,00
	Parafina	3,93	1,80	9,60
	Cera de Carnaúba	4,10	1,87	10,00
	Ácido esteárico	0,157	0,07	0,40
Carga Injetável Nanométrica I 150 °C	Pó de Ferro Nanométrico	203,60	67,38	45,60
	PEBDL	8,20	5,09	8,51
	Parafina	40,00	24,87	41,52
	Cera de Carnaúba	4,10	2,55	4,25
	Ácido esteárico	0,157	0,11	0,22
Carga Injetável Nanométrica II 150 °C	Pó de Ferro Nanométrico	119,27	86,25	55,91
	PEBDL	7,86	5,69	18,23
	Cera de Carnaúba	11,00	7,95	25,50
	Ácido esteárico	0,157	0,11	0,36
Carga Injetável Nanométrica III 160 °C	Pó de Ferro Nanométrico	119,27	87,52	56,77
	PEBDL	7,86	5,77	19,97
	Cera de Carnaúba	9,00	6,60	22,86
	Ácido esteárico	0,157	0,11	0,40

A Tabela 9 mostra a quantidade dos constituintes e seus respectivos percentuais durante o desenvolvimento das cargas injetáveis na pesquisa. A diferença de valores entre a carga micrométrica e a primeira carga nanométrica foi em função da molhabilidade do pó. Sendo as cargas processadas no reomêtro de torque, a primeira carga nanométrica continuava seca e optou-se pela colocação de maior quantidade de parafina devido a seu melhor comportamento na extração química. Mas a primeira carga injetável apresentava problema de a parafina acumular no início do canhão da injetora e não permitir a decida do pó com o polímero para o processamento da carga injetável para obtenção de peças. Na carga injetável nanométrica II, optou-se pela eliminação da parafina em função da melhor molhabilidade da cera de carnaúba. Porém a quantidade da cera ainda é um percentual muito alto para um bom processamento da carga injetável para a obtenção de componentes.

3.10.2. Reologia da Carga Injetável

Após as misturas homogêneas do reômetro de torque com sua composição determinada foi realizada reometria capilar no Reômetro da marca CEAST. As amostras são colocadas sobre a câmara do reômetro e pressionadas para diminuir os espaços dentro da mesma. Coloca-se a matriz com diâmetro de 1 mm e 30 mm de comprimento na parte inferior do reômetro. Após a câmara estar completa com a amostra, é colocado o punção que

pressionará o material sobre a matriz. O programa de operação e aquisição de dados é o *CWMain – Visual Rheo: Rheologic*, que é fornecido junto com o equipamento.

3.11. Moldagem de pós por Injeção

As amostras foram injetadas com cargas injetáveis de ferro e ferro-silício com tamanho de partícula micrométrica, parcialmente nanométrica e 100% nanométrica com blendas poliméricas desenvolvidas. Houve a injeção de uma carga injetável comercial de ferro-3%silício fornecida pela OMG para avaliação das cargas desenvolvidas. Todas as peças foram injetadas numa injetora ARBURG ALLROUNDER 170 S 125-30. A Figura 40 apresenta o molde de injeção dos corpos de prova com a bucha de injeção rotativa para seleção das peças que se deseja injetar. O detalhamento do molde está no Apêndice I (página 284).

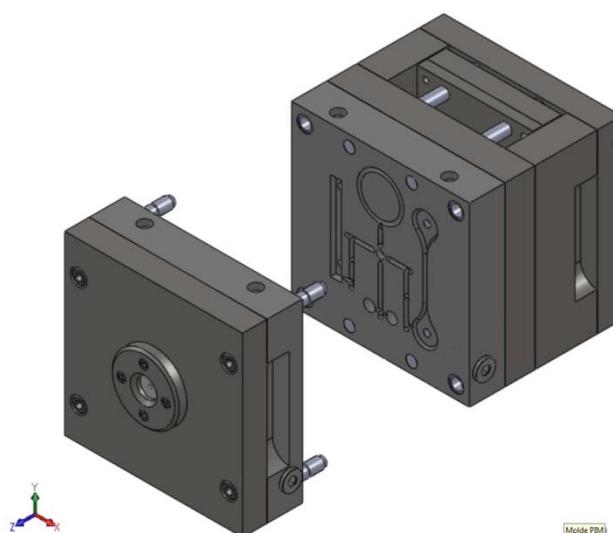


Figura 40: Molde de injeção dos corpos de prova.

A placa-cavidade em aço P20 com o anel de Rowland na parte superior, a barra de flexão (esq.), barra de tração (dir.), e na parte inferior amostra para compressão.

3.12. Densidade à verde

Foram medidas as massas dos corpos de provas compactados em uma balança analítica de resolução de 2 quilos, erro da balança de 0,001 e mensurados os diâmetros e as alturas para calcular o volume através de um micrômetro. Para as amostras injetadas foi passado um verniz

para fechamento dos poros e utilizado o método de Arquimedes, conforme norma MPIF-42 (270).

3.13. Calorimetria Diferencial de Varredura e Análise termogravimétrica

Na calorimetria diferencial exploratória (ou de varredura) - DSC são determinadas transições térmicas, como fusão, transição vítrea ou gelificação⁶ (271). Quando componentes de uma mistura apresentam interação molecular, podem ocorrer mudanças nas propriedades térmicas. Os experimentos foram realizados num analisador termogravimétrico Q600 em atmosfera de argônio, com nitrogênio como gás de purga. A capacidade da amostra é de 12 mg com faixa de temperatura entre ambiente a 1500 °C com taxa de aquecimento até 1000 °C de 0,1-100 °C/min e taxa de aquecimento a 1500 °C de 0,1-25 °C/min.

O resfriamento (forçado com ar), 1500-50 < 30 min. A sensibilidade DTA de 0,001 °C. Para minimizar os efeitos térmicos dos componentes, as amostras foram aquecidas com taxa de aquecimento de 15 °C/min até o patamar desejado. A temperatura do ensaio para degradação dos polímeros foi 600 °C, sendo mantidas nesta temperatura por 5 minutos e sendo efetuado um choque térmico em ar comprimido. A análise termogravimétrica (TGA) é normalmente usada para determinar as características selecionadas de materiais que exibem perda de massa ou qualquer ganho devido a decomposição, a oxidação, ou a perda de materiais voláteis tais como a umidade.

3.14. Extração Química e Térmica

As amostras injetadas com tamanho de partículas micrométricas foram extraídas quimicamente com a realização em um banho-maria de água com um recipiente Becker de Hexano entre 50 a 70 °C durante 6 horas. Neste trabalho foram realizados inúmeros testes com solventes para realizar as melhores extrações. Para determinar condições e tipo de gases para atmosfera, foram analisadas várias curvas e taxa de aquecimento da extração térmica, pois todas estas informações influenciam diretamente nas propriedades dos sinterizados. Após a extração química, as amostras marrons foram extraídas termicamente no forno Sanchis com vácuo, com uma taxa de aquecimento de 0,2 °C/min até a temperatura 600 °C, onde se manteve a temperatura por 30 minutos com o intuito de retirar possíveis vestígios da carga injetável

⁶Gelificação é a formação de um gel; transformação em gel.

(*binder*) que possa não ter sido extraído quimicamente. Para a extração química das peças injetadas com partículas nanométricas foi utilizado hexano diluído com álcool entre 58 a 62 °C durante 24 horas e foram extraídas termicamente com uma taxa de aquecimento de 0,1 °C/min. Da temperatura ambiente até a temperatura 600 °C.

3.15. Densidade marrom

Foram medidas as massas dos corpos de provas extraídos quimicamente em uma balança analítica e pintaram-se as peças com verniz para o fechamento dos poros e mensurados o volume pelo método de Arquimedes.

3.16. Sinterização

A sinterização foi realizada em forno tubular elétrico de resistência de carboneto de silício, com controle eletrônico, precisão de ± 1 °C, na temperatura de trabalho e atmosfera de 75% de nitrogênio e 25% de hidrogênio. O ciclo de sinterização proposto, posterior da extração térmica, constituiu de aquecimento da temperatura ambiente até 600 °C, com taxa de 5 °C/min. Da temperatura de 600 °C até o patamar de sinterização com diversas taxas, desde 5 °C/min até 10 °C/min.

O patamar utilizado para sinterização foi de 1150 °C durante 60 min de estabilização. O resfriamento aconteceu em forno com uma taxa média mensurada de 5,97 °C/min. Foram testadas inicialmente curvas com taxas de aquecimento indicadas na literatura para conhecer o comportamento das ligas. As amostras da liga de ferro-3%silício comercial foram quimicamente pelo processo de extração catalítica e sinterizadas em um forno contínuo com o patamar de sinterização de 1260 °C e taxa de aquecimento de 0,3 °C/min em uma empresa de metalurgia do pó.

3.17. Caracterizações físicas e mecânicas das amostras sinterizadas

Foram realizados vários ensaios para determinar as características das amostras sinterizadas como densidade, contração volumétrica, dureza e microdureza, análise via EDS, ensaio de tração e microscopia ótica, eletrônica de varredura.

3.17.1. Determinação de densidade e contração volumétrica

A densidade também chamada de massa específica foi determinada através do método de Arquimedes, conforme norma MPIF-42 (270), que se baseia no empuxo exercido sobre a amostra durante sua imersão em um recipiente com água acoplado a uma balança. Através da determinação do volume da peça sinterizada determinou-se a densidade e a contração volumétrica em relação à peça a verde. Para as amostras de ferro com partículas nanométrica foi substituída a água por álcool isopropílico para evitar a oxidação das peças posteriormente ao método de Arquimedes.

3.17.2. Ensaio de tração

O ensaio de tração consiste em submeter um corpo de prova de geometria definida a um esforço crescente na direção axial do corpo de prova, levando-o a se romper. Os esforços utilizados para realização do ensaio são medidos na própria máquina universal de ensaios (272). O módulo de Elasticidade (E) também chamado de módulo de Young é a razão entre a tensão e a deformação na direção da carga aplicada, sendo a máxima tensão que o material suporta sem sofrer deformação permanente. Normalizando-se a força em relação à área, e o alongamento em relação ao comprimento inicial. Este é calculado conforme a equação 5 (273).

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{Eq 5}$$

Os corpos de prova de tração foram injetados no molde confeccionado nas normas As suas dimensões estão especificadas na norma MPIF Standard 50 (*Method for Preparation and Evaluation Metal Injection Molded Debound and Sintered Tension Test Specimens*) (274) para injeção de pós. Foi realizada a medição do diâmetro inicial antes da realização do ensaio.

3.17.3. Dureza e microdureza

A dureza foi mensurada através do duromêtro FORTEL MRS, de maneira a obter diretamente a dureza da superfície, foi definido utilizar o ensaio de dureza Brinell (275). Utilizou-se esfera de aço com diâmetro de 2,5 mm e carga de 187,5 kgf. A medida de microdureza Vickers, segundo a norma ASTM E 384 (276), define o ensaio de microdureza, como a dureza de microindentações realizada em equipamento calibrado com penetradores de diamantes. Foi realizado o ensaio no microdurômetro Insize, código ISH-TDV 1000. Utilizaram-se cargas de 100 gf.

3.17.4. Microscopia ótica e eletrônica

Para realização da metalografia do sinterizado houve a preparação e polimento metalográfico. As amostras foram embutidas com resina baquelite e em seguida lixadas com lixa de óxido de alumínio com 100, 200, 400, 600, 800, 1000 e 1200 “*mesh*” sendo polidas com pasta de alumina de 1 μ m (277). As amostras foram observadas no microscópio óptico para avaliação da porosidade. Após o ataque com reagente Nital 2% foram analisadas para ver tamanho de grão.

O microscópio óptico da marca OLYMPUS foi utilizado para a visualização da morfologia, grãos, tamanho de grãos, fases presentes nas amostras sinterizadas. Para visualização das amostras no microscópio eletrônico de varredura, foram colocadas partículas de pó, pequenos pedaços de peças sobre uma fita adesiva de carbono sobre os *stub*, que foram metalizadas com carbono.

3.17.5. Análise via EDS

As análises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS) foram realizadas no microscópio eletrônico de varredura da marca Jeol 5800, num sistema de microsonda da marca Noran Instruments, acoplado ao MEV do Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS. É uma técnica usada para identificar a composição elementar de uma amostra ou pequena área de interesse na amostra. Foi utilizada esta análise para determinar os materiais não difundidos nas amostras sinterizadas que apareceram nas metalografias.

3.17.6. Difração de raios-X

A difração de raios-X é um das principais técnicas de caracterização microestrutural de materiais cristalinos. Quando os raios-X atinge a amostra de um material a ser analisada, podem ser espalhando elasticamente, sem perda de energia pelos elétrons do átomo (dispersão ou espalhamento coerente). Já os fótons de raios-X após a colisão com eletron mudam a sua trajetória, mas mantém a mesma fase e energia dos fótons incidente inicial. O espectro de radiação gerado pelo tubo de raios-X não é monocromático (278). Esta apresenta tanto o espectro característico do material como espectros contínuos. Foi utilizado o difratômetro Siemens do Instituto Física – IF modelo D5000, sendo analisado pelo programa XPert.

3.17.7. Espectrometria de emissão ótica

A composição química dos materiais foi analisada após a injeção dos corpos de prova, extração térmica e o tratamento térmico de sinterização. A análise foi obtida através do Espectrômetro de Emissão Ótica da marca BRUKER de modelo Q2 ION que foi disponibilizado pelo Laboratório de Fundição – LAFUN, utilizado para análise química de ligas metálicas.

3.18. Propriedades magnéticas do material

Após a sinterização, a execução do ensaio de histerese baseou-se na norma ASTM A773 /A773M - 01 (279). Utilizou-se o isolamento do contato peça/bobina com fita isolante, assim como no contato da bobina secundária / primária. O procedimento do ensaio de histerese consistiu na medição, com o auxílio de um paquímetro, das dimensões das peças sinterizadas e utilizou a da densidade em g/cm^3 , medida anteriormente. Posteriormente, tem-se o procedimento para o ensaio de histerese propriamente dito que consistiu no bobinamento das peças, como mostra a Figura 41.



Figura 41: Etapas para montagem dos anéis para determinação das propriedades.

As etapas do procedimento para o ensaio foram conforme mostra a Figura 41(A) o isolamento da superfície das peças sinterizadas com fita isolante (filme de PVC). A Figura 41(B) exhibe o bobinamento secundário (interno) da peça com fio de cobre esmaltado (AWG⁷ 27 tem 0,3606 mm) (280), (281) e, após o término, a contagem do número de voltas demonstrada na Figura 41(C), seguiu-se o isolamento novamente sobre o secundário conforme

⁷AWG - *American Wire Gauge* - ou **escala americana normalizada** é o nome da unidade de medida usada para padronização de fios e cabos elétricos.

mostra na Figura 41(D). O bobinamento primário (externo) da peça com fio de cobre esmaltado (AWG23 tem 0,5733 mm – maior diâmetro que o anterior AWG 27) e, após, o término a contagem do número de voltas. Deixou-se sobrando um pedaço de fio em torno de 10 cm para posterior conexão no dispositivo de ensaios.

O bobinamento (primário) começou na extremidade oposta ao fio de sobra do bobinamento anterior (secundário). Em seguida, calculou-se a densidade de espiras (Equação 6) e a área da seção transversal das peças (Equação 7), além da densidade das peças, que foram posteriormente inseridas no programa.

$$\text{Densidade de espiras} = \frac{N^{\circ} \text{ de espiras do primário}}{\pi \left(\frac{\varnothing \text{ externo} + \varnothing \text{ interno}}{2} \right)} \quad [\text{n}^{\circ} \text{ voltas/m}] \quad \text{Eq 6}$$

$$\text{Área da seção transversal} = (\varnothing \text{ externo} - \varnothing \text{ interno}) * h \quad [\text{mm}^2] \quad \text{Eq 7}$$

No que se refere ao procedimento de conexão das extremidades dos fios no equipamento (Traçador de Curvas de Histerese – TCH) modelo TLMP-FLX-D, efetuou-se de acordo com a Figura 42. Outras especificações relevantes: Resistência do secundário = 0,2 Ω e Integrador de escala = 30 mVs. Corrente máxima: $i = 5$ A. Frequência no ensaio de histerese e magnetização = 0,05 Hz. A Figura 42(a) exhibe o traçador de histerese e a Figura 42(b) mostra a montagem da bobina no ensaio.

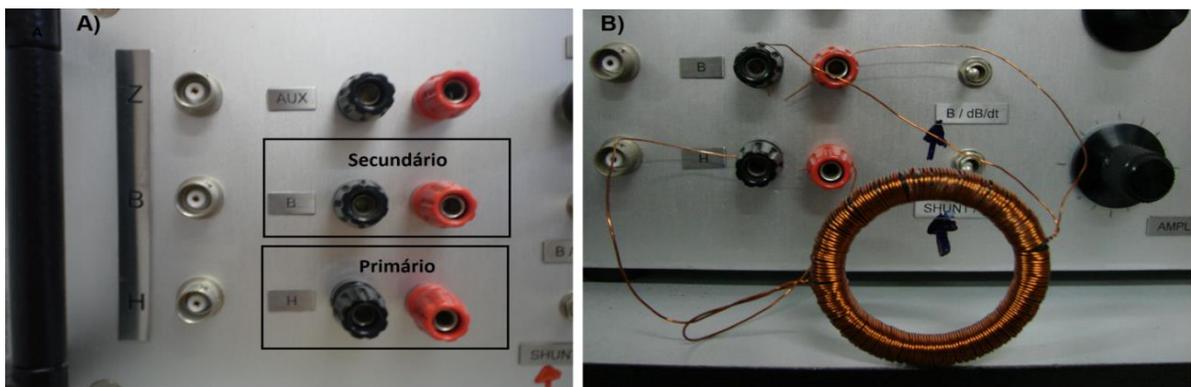


Figura 42: Traçador de curva de histerese e a conexão dos fios da bobina completa.

Os dados magnéticos apresentados na literatura são gerados utilizando-se amostras toroidais padrão. Contudo, a padronização destas amostras sinterizadas em fornos de laboratoriais não reproduzem o desempenho de componentes complexos por moldagem de pós metálicos por injeção com seus gradientes de densidade, microestruturas não-homogêneas

e processos de produção associados. Por isso os componentes complexos devem ser avaliados na operação para qual foram projetados.

3.19. Propriedades elétricas do material

A resistividade elétrica foi determinada a partir da resistência elétrica de um anel cortado em uma parte do seu perímetro. Este artifício permite obter um corpo de prova de comprimento muito maior que a seção transversal, ou algo como próximo a uma barra curvada. Assim, para medição da resistência elétrica de um corpo, aplica-se uma corrente elétrica a partir de uma fonte de tensão contínua e mede-se a tensão elétrica a partir de um mili-voltímetro apresentado na Figura 43.

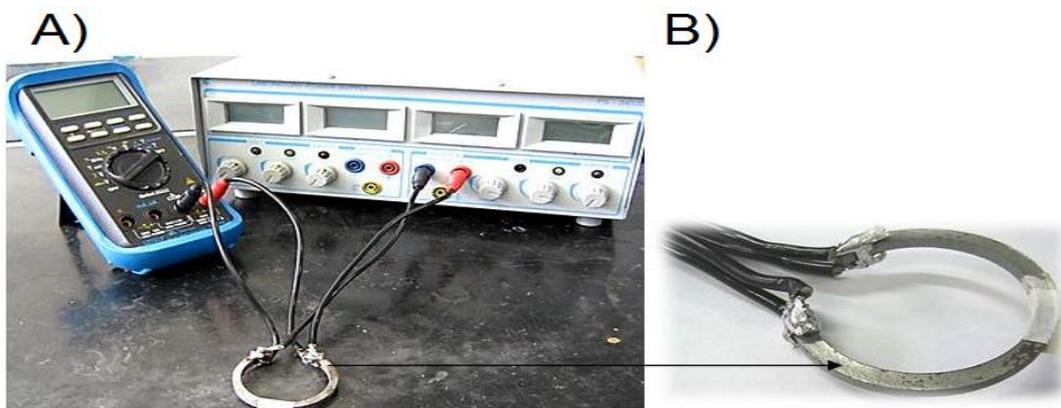


Figura 43: Aparato para realização do ensaio de resistividade (corpo de prova em detalhe).

Devem ser realizadas no mínimo quatro variações de corrente para efetuar a medição de tensão. O proposto pelo ensaio foi medir a tensão observada ao serem impostas correntes de 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 A. Com os valores de corrente e tensão, aplica-se a equação 7 e chega-se a 4 valores de resistividade, que devem apresentar baixo desvio padrão, para certificar-se da validação do teste. Através da equação 8, realiza-se o cálculo da resistividade elétrica.

$$R = \frac{V}{i} \rightarrow R = \rho e \cdot \frac{l}{A} \rightarrow \rho e = \frac{V}{i} \cdot \frac{A}{l} \quad \text{Eq 8}$$

Onde:

R – Resistência Elétrica [Ω]

V – Tensão Elétrica Aplicada [V]

i – Corrente Elétrica Aplicada [A]

A – Área da seção Transversal do anel = $h \cdot e$ (altura multiplicado pela espessura) [m^2]

l – Comprimento do anel = $\pi \cdot D$ [m]

ρ_e – Resistividade Elétrica [Ωm]

3.20. Projeto em CAD/CAE/CAM

Foi realizado modelamento em CAD 3D o projeto do mini-motor de passo no SolidWorks 2010. Foi levada a geometria 3D do mini-servomotor para o programa de simulação de moldagem por injeção Plastic 2013. O estator e rotor em CAD 3D foi extraído a geometria 2D e levado para o programa FEMM 4.2. Após a avaliação do projeto do mini-servomotor pelos dois programas de CAE, foi projetado o inserto das cavidades do molde com contração de 10 e 30 % baseados em resultados de contração volumétrica dos corpos de prova. A cavidade digital serviu para determinar a estratégia de usinagem pelo programa de CAM Edgecam. O inserto foi fabricado por usinagem convencional, fresamento CNC e eletroerosão.

3.21. Utilização do FEMM 4.2

O programa de simulação de materiais magnéticos FEMM 4.2 (*open programa*) é uma ferramenta que discretiza o domínio de entrada em pequenos triângulos. Em cada elemento a solução é aproximada através de uma interpolação dos valores de cada vértice do triângulo. O FEMM 4.2 é um conjunto de programas para resolver problemas de baixa frequência eletromagnética em planos bidimensionais com simetria axial. Sendo dividido em três partes (282):

- **Interactive Shell** – múltipla interface com pré e pós-processamento para os vários tipos de problema. Contém uma interface com o CAD para definição das propriedades do material e as condições de limite.
- **Trinagle.exe** – modifica a região a ser solucionada em um número grande de triângulos, operação fundamental para a aplicação da metodologia de elementos finitos.
- **Solvers** – algoritmo para solução de problemas magnéticos e eletrostáticos. Cada *solver* utiliza os dados configurados que descrevem o problema para resolver as equações diferenciais de Maxwell obtendo os valores de campo desejado.

Determinar as propriedades magnéticas de um motor sem o auxílio de um programa de simulação por elementos finitos é difícil e por muitas vezes impreciso. Através do FEMM® 4.2 é possível verificar dados importantes tais como o torque momentâneo da máquina elétrica, o fluxo concatenado em cada bobina e as perdas por corrente de Foucault. O

conhecimento destes resultados permite ao projetista verificar a eficiência do motor e as propriedades que devem ser trabalhadas para atingir o ponto ideal de trabalho.

6. CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos e discutidos neste trabalho pode-se concluir que processamento das ligas ferromagnéticas de ferro puro, ferro-1%silício, ferro-2%silício e ferro-3%silício por metalurgia do pó convencional permite a avaliação prévia das propriedades físicas, mecânicas elétricas e magnéticas.

A fase 1 definiu as seguintes informações cruciais para o desenvolvimento deste trabalho que foi a confirmação da temperatura de 1150°C para a sinterização das ligas utilizando base de carbono. O percentual de silício interessante para a continuação da fase dois deveria ser o da composição de ferro-3%silício. As propriedades físicas e mecânicas das amostras com o tamanho médio de partícula 9 µm processadas pela metalurgia do pó convencional foram excelentes.

A fase 2 determinou os parâmetros de processamento de injeção com a carga injetável das ligas com pós micrométricos e o comportamento da combinação dos lubrificantes e polímeros estruturais da carga injetável, que foram semelhantes ao sistema de aglutinante da carga comercial validando a metodologia aplicada através da injeção dos corpos de provas. Os corpos de prova injetados, extraídos e sinterizados permitiram a caracterização das propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas das ligas ferromagnéticas entendendo a modificação do comportamento dos materiais obtidos por processamentos diferentes. A carga injetável foi determinada através da viscosidade e do processamento que obteve o PEBDL como o polímero estrutural e a mistura entre a parafina e cera de carnaúba com lubrificantes. Mas também, permitiu o entendimento da relação entre as ceras e o polímero estrutural expondo que a cera de carnaúba permitia menor viscosidade e maior molhabilidade dos pós metálicos, que posteriormente foi determinante para a injeção dos pós nanométricos.

A fase 3 obteve resultados importantíssimos na moagem de alta energia do pó micrométrico atingindo após 53 horas o tamanho de partícula menor que 100 nanômetros. Aperfeiçoou-se a carga injetável para aplicação em pó nanométricos obtendo viscosidade injetáveis menores que 60 Pa.s. Conseguiu-se aplicar a metodologia de mistura da carga injetável e efetivamente injetar corpos de prova com pó parcialmente e totalmente nanométricos obtendo-se a caracterização física, mecânica, elétrica e as propriedades magnéticas determinados experimentalmente. Obtiveram-se propriedades interessantes para os desenvolvimentos de rotores e estatores pela injeção de pó metálico de ferro puro parcial e totalmente nanométricos, porém a extração química das peças injetadas com pó nanométrico

deve ser pesquisada com mais intensidade em função da enorme extração da cera sem o comprometimento estrutural das peças obtidas.

As peças injetadas com pó nanométrico obtiveram resultados de dureza e microdureza muito superiores aos valores de ferro micrométrico, equiparando-se as ligas de ferro-3%silício. Porém as propriedades mecânicas ficaram muito abaixo do esperado, quando comparados com os valores de ferro puro micrométrico injetado. Os resultados da caracterização física, mecânica, elétrica e magnética permitiram a montagem dos respectivos materiais na base de dados dos programas que foram utilizados para a simulação. A rota de utilização de um percentual de pó nanométrico sobre o pó micrométrico deve ser pesquisada para os diversos percentuais possíveis.

A Fase 4 utilizando a simulação numérica do processo de injeção da geometria do mini-motor de passo se comportou semelhante a injeção física das peças. A simulação das propriedades magnéticas no modelo de mini-servomotor determinou a melhor geometria do rotor analisando o desempenho como torque e fluxo de entreferro. O solidworks® permitiu o modelamento do projeto de molde, que serviu para a fabricação do inserto do molde do mini-servomotor e injeção dos rotores e estator com carga injetável de pós micrométricos para determinação de processamento adequado.

A injeção do estator e do rotor para o desenvolvimento de mini-servomotor com a carga injetável de pós nanométricos, onde foi realizada com extração química e térmica, juntamente com a sinterização permitiu determinar as propriedades físicas e mecânicas do estator e do rotor através de medições de densidade; contração volumétrica e microdureza.

Tendo em vista os aspectos desenvolvidos neste trabalho, conclui-se que os estatores e rotores podem ser fabricados com a carga injetável III (50% PEBDL + 50% cera de carnaúba) e os pós micrométricos, sem a necessidade de utilização dos pós nanométricos em que aumentaram o custo de fabricação sem aumentar proporcionalmente as propriedades físicas, mecânicas, elétricas e magnéticas, pois, melhoram algumas propriedades e pioraram outras. A liga mais indicada para a fabricação dos rotores e estatores para a montagem do mini-servomotor é a liga de ferro-3%silício com pó micrométrico injetado.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- 1- Estudo reológico do efeito do lubrificante no poliestireno de alta densidade como polímero estrutural.
- 2- Estudo reológico do efeito do lubrificante no polipropileno como polímero estrutural.
- 3- Estudo reológico do efeito do lubrificante no EVA como polímero estrutural.
- 4- Estudo reológico do efeito do lubrificante no PMMA como polímero estrutural.
- 5- Avaliação do látex com polímero estrutural
- 6- Determinação dos parâmetros da moagem criogênica das ligas ferromagnéticas.
- 7- Estudo de injetabilidade de uma carga injetável com pó nanométrico.
- 8- Desenvolvimento de uma pelletizadora para pó nanométrico.
- 9- Estudo da metodologia e determinação da molhabilidade das ceras sobre uma área.
- 10- Utilização de pó nanométrico pelletizado para o processo de injeção.
- 11- Alívio de tensão para pós nanométricos
- 12- Moagem conjunta do pó de ferro e silício

REFERÊNCIAS

- 1 JUFER, M. Perspectives on electrical motors. **Modern Electrical Drives**, 2000. 215-235.
- 2 LEMARQUAND, G. et al. MEMS electrodynamic loudspeakers for mobile phones. **Applied Acoustics**, 73, 2012. 379–385.
- 3 BARBIC, M. Magnetic wires in MEMS and bio-medical applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 249, 2002. 357-367.
- 4 HOSOBATA, T.; YAMAMOTO, A.; HIGUCHI, T. An electrostatic induction motor utilizing electrical resonance for torque. **Sensors and Actuators A**, 173, 2012. 180-189.
- 5 MEMS, Ultrasound enhanced electrostatic batch assembly for. **Sensors and Actuators A**, 197, 2013. 136– 149.
- 6 NGUYEN, Q. E. U. S. Salient pole permanent magnet. In: NGUYEN, Q. E. U. S. **Magnetic Bearings, Theory and Applications**. França: Elsevier, v. 1, 2010. Cap. 4, p. 61-84. http://cdn.intechopen.com/pdfs/11927/InTech-Salient_pole_permanent_magnet_axial_gap_self_bearing_motor.pdf.
- 7 RUSTEMLI, S.; YILMAZ, M.; DEMIRTAS, M. Ripple reduction at speed and torque of step motors used on a two-axis. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, 26, 2010. 759–767.
- 8 MARINO, R.; PERESADAS, S. A. T. P. Nonlinear Adaptive Control of Permanent Magnet Step. **Automatica**, 31, 1995. 1595-1604.
- 9 BIFARETTI, S.; TOMEI, P.; VERRELLI, C. M. A global robust iterative learning position control for current-fed permanent. **Automatica**, 47, 2011. 227–234.
- 10 YAMAMOTO, A.; NIINO, T.; HIGUCHI, T. Modeling and identification of an electrostatic motor. **Precision Engineering**, 30, 2006. 104–113.
- 11 LI, J. et al. Magnetic and meniscus-effect control of catalytic rolled-up micromotors. **Microelectronic Engineering**, 88, 2011. 1792–1794.
- 12 PFINGSTAG, M. E. **Desenvolvimento de um mini motor de passo à partir da moldagem por injeção de pós metálicos**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais– PPGE3M, 2014. 99 p. Dissertação de Mestrado.
- 13 SANDEROW, H. Management & Engineering Technologies. Powder Metallurgy Methods and Design. In: INTERNATIONAL, A. **ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications**. 9ª. ed. Ohio, EUA: ASM International, v. 7, 1998. p. 23 - 24.

- 14 POQUILLON, D. et al. Cold compaction of iron powders—relations between powder morphology and mechanical properties Part I: Powder preparation and compaction. **Powder Technology** , 126 , 2002. 65– 74.
- 15 BHATKA, R. M. L. A. H. T. The Technical Cost Modeling of Near-Net-Shape P/M Manufacturing. **Journal of The Minerals, Metals & Materials Society**, 1999 July 1999 July. 26 - 27.
- 16 HÖGANÄS. Handbooks. **HÖGANÄS**. Disponível em:
<<http://hoganäs.com/Documents/Handbooks/Handbook%20No.4.pdf>>. Acesso em: 24 jul. 2013.
- 17 BOCANEGRA-BERNAL, M. H. Review Hot Isostatic Pressing (HIP) technology and its applications to metals and ceramics. **JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE** , 39, 2004. 6399 – 6420.
- 18 SHANMUGASUNDARAM, D. A. C. R. Tensile and impact behaviour of sinter-forged Cr, Ni and Mo alloyed powder metallurgy steels. **Materials and Design**, 30, 2009. 3444–3449.
- 19 ERIRISINGHE, M. J. A. E. J. R. G. Review: Fabrication of Engineering Ceramics by Injection Moulding. I. Materials Selection. **fill. J. High Technology Ceramics** , 2, 1986. 1-31.
- 20 KRYACHEK, V. M.; LEVINA, D. A. A. C. L. I. Developmental trends in european powder metallurgy. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, 46, 2007. 608 - 612.
- 21 KRYACHEK, V. M.; LEVINA, D. A. A. C. L. I. Powder metallurgy in Asia. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, 46, 2007. 408 - 413.
- 22 KRYACHEK, V. M.; LEVINA, D. A. A. C. L. I. Powder metallurgy in north america continues to grow. **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, 45, 2006. 400 - 404.
- 23 MASLYUK, V. A. A. L. G. G. Promising trends in the development of methods of fabricating structural powder materials (survey). **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, 45, 2006. 289 - 295.
- 24 GERMAN, R. L. M. Markets applications, and financial aspects of global metal powder. **metal-powder**, January/February 2012. 18 - 26.
- 25 JAMES, S. The MIM Enigma. **Metal Powder Report - MPR**, June 2002.
- 26 AKTIENGESELLSCHAFT, BASF. **Catamold Feedstock for Metal Injection Molding: Processing - Properties - Applications**. Ludwigshafen - Germany: BASF, 2003. 13 p. Information Technical.

27 ISMAIL, M. H.; GOODALL, R.; DAVIES, H. A. E. T. I. Porous NiTi alloy by metal injection moulding/sintering of elemental powders: Effect of sintering temperature.

Materials Letters, 70, 2012. 142–145.

28 SHIBOA, G.; BOHUA, D.; XINBO, H. E. X. Q. Powder injection molding of pure titanium. **RARE METALS**, 28, Jun 2009. 261 - 265. Nº. 3.

29 DAVIES, P. A.; DUNSTAN, G. R.; HAYWARD, A. C. E. H. R. I. L. Development of master alloy powders, including nickel-based superalloys, for metal injection molding (MIM), Altrincham, p. 12. Disponível em:

<http://www.smt.sandvik.com/Global/Downloads/Products_downloads/metal_powders/technical_papers/development-of-master-alloy-powders.pdf>. Acesso em: 07 maio 2014.

30 QUINARD, C.; SONG, J.; BARRIERE, T. E. G. J. C. Elaboration of PIM feedstocks with 316L fine stainless steel powders for the processing of micro-components. **Powder Technology**, 208, 2011. 383–389.

31 LIU, L.; LOH, N. H.; TAY, B. Y. E. T. S. B. Microstructure evolution of 316L stainless steel micro components prepared by micro powder injection molding. **Powder Technology**, 206, 2011. 246–251.

32 SILVA, A. et al. Study of soft magnetic iron cobalt based alloys processed by powder injection molding. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 393–396.

33 ANTUSCH, S. N. P. R.-K. H.-J. Powder Injection Molding for mass production of He-cooled divertor parts. **Journal of Nuclear Materials**, 417, 2011. 533–535.

34 TRUDEL, Y. Introduction to Metal Powder. Production and Characterization. In: INTERNATIONAL, A. **ASM Metals Handbook v7 - Powder Metal Technologies and Applications**. 9ª. ed. Ohio. EUA: ASM Intenational, 1998. p. 83-88.

35 SURYANARAYANA, C.; IVANOV, E. E. B. V. V. The science and technology of mechanical alloying. **Materials Science and Engineering**, 2001.

36 DUNKLEY, J. J. Atomization of metal powder. In: JENKINS, I. A. W. J. V. **Powder metallurgy - an overview**. Princeton - EUA: The institute of Metals, v. 1, 1991. p. 2 - 21. ISBN ISBN 0-901462-81-0.

37 GERMAN, R. M. Beads. **xstreamscience**. Disponível em:

<http://www.xstreamscience.org/H_Glaze/H_Glaze_1.htm>. Acesso em: 28 jul. 2013.

38 HENS, J.; LEE, D. A. G. R. M. Integrity of complex shape products by powder injection molding. **Powder Metallurgy**, 23, 1991. 15-21.

39 EDIRISINGHE, M. J. The effect of processing additives on the properties of a ceramic-polymer formulation. **Ceramics International**, 17, 1991. 89-96. nº 2.

- 40 KARATAS, C.; KOCER, A.; ÜNAL, H. I. A. S. S. Rheological properties of feedstock prepared with steatite powder and polyethylene-based thermoplastic binders. **Journal of Materials Processing Technology**, 152, 2004. 77-83.
- 41 HSU, K. C.; LIN, C. C. A. L. G. M. Effect of wax composition on injection moulding of 304L stainless steel powder. **Powder Metallurgy**, 37, 1994. 272-276. n° 4.
- 42 HAUSNEROVA, B. Rheological characterization of powder injection moulding compounds. **Polimery**, 55, 2010. 3-11. n° 1.
- 43 JR. MURRAY, J. S. **X-Stat statistical experiment design/data analysis/nonlinear optimization**. New York: John Wiley & Sons, 1984. ISBN ISBN 978-0471524441.
- 44 HSU, K. C. A. L. G. M. Effect of binder composition on rheology of iron powder injection moulding feedstocks: experimental design. **Powder Metallurgy**, 39, 1996. 286 – 289. n° 4.
- 45 GRISON, E. C.; BECKER, E. J. E. S. A. F. **BORRACHAS E SEUS ADITIVOS - Componentes, Influências e Segredos**. 1ª. ed. Porto Alegre: suliani - letraevida, 2010. 1 - 226 p. ISBN ISBN: 978-85-60776-53-5.
- 46 OLIVEIRA, R. V. B.; PINHEIRO, E. A.; SOLDI, V. E. P. A. T. N. Moldagem por Injeção de Pós Cerâmicos: Remoção da Parafina e do Polipropileno Utilizados como Veículo Orgânico. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 14, 2004. 150-155.
- 47 KONG, X.; BARRIERE, T. E. G. J. C. Determination of critical and optimal powder loadings for 316L fine stainless steel feedstocks for micro-powder injection molding. **Journal of Materials Processing Technology**, 30 maio 2012. 1 - 29.
- 48 NITROGENIUS - PRODUTOS QUÍMICOS. Ficha de informações de segurança de produto químico - fispq - cera de carnaúba. **Cera de carnaúba tipo III**. Disponível em: <<http://www.nitrogenius.com.br/produto.php?pro=61>>. Acesso em: 10 out. 2014.
- 49 OKUBO, K.; TANAKA, S. E. I. H. Molding technology for improvement on dimensional accuracy in micro metal injection molding. **Microsyst Technol**, 15, April 2009. 887–892.
- 50 CHENG, L. H.; HWANG, K. S. E. F. Y. L. Molding Properties and Causes of Deterioration of Recycled Powder Injection Molding Feedstock. **Metallurgical and materials transactions**, 40A, DECEMBER 2009. 3210 - 3216.
- 51 PETROBRAS. Parafina Industrial. Disponível em: <http://www.br.com.br/wps/portal/portalconteudo/segmentosdeatuacao/produtosquimicos/!u/t/p/c5/04_SB8K8xLLM9MSSzPy8xBz9CP0os3hLf0N_P293QwP3YE9nAyNTD5egIEcnQ>

4tQA6B8JG55RxOSdPv7e7oC5Q1cXT2MzYHKjQno9tKPSs_JTwK60s8jPzdVP1I_yhzJtLAAoGk-vr6uoQFAroGpfmROanpicqV-QW5>. Acesso em: 10 nov. 2014.

52 HAUSNEROVA, B. Powder Injection Moulding – An Alternative Processing Method for Automotive Items. In: _____ **New Trends and Developments in Automotive System Engineering**. Czech Republic: InTech, 2011. p. 129 - 146. Capítulo 7.

53 WEN, G. et al. Development and Design of Binder Systems for Titanium Metal Injection Molding: An Overview. **Metallurgical and materials transactions A**, 23 october 2012. 1 - 18.

<http://researchcommons.waikato.ac.nz/bitstream/handle/10289/6783/Development%20and%20design%202012.pdf?sequence=1>.

54 RODRIGUES, J. M. C. E. M. P. A. F. **Tecnologia Mecânica - Tecnologia da deformação Plástica - Fundamentos Teóricos**. 2ª. ed. Lisboa: Escolar Editora, v. I, 2010. 16 - 18 p. ISBN ISBN: 978-972-592-279-8.

55 MORAES, S. R. P.; OLIVEIRA, A. L. R.; SOUZA, J. F. E. A. J. D. **Avaliação de polímeros termoplásticos recicláveis como materiais componentes de telhas e tijolos**. Goiânia: Centro Científico Conhecer, v. 6, 2010. 1 - 14 p.

<http://www.conhecer.org.br/enciclop/2010c/avaliacao%20de%20polimeros.pdf>.

56 SAMANTA, S. K.; CHATTOPADHYAY, H. E. G. M. M. Thermophysical characterization of binder and feedstock for single and multiphase flow of PIM 316L feedstock. **Journal of Materials Processing Technology**, 211, 2011. 2114– 2122.

57 BALTES, H. et al. (Eds.). **Advanced Micro and Nanosystems - Microengineering of Metals and Ceramics**. Weinheim, Germany: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, v. 3, 2005. 1 - 641 p. ISBN ISBN: 3-527-31208-0.

58 BRASKEM. Copolímero de Etileno-Acetato de Vinila TN2020. **Folha de Dados**, Agosto 2012. Disponível em:

<<http://www.braskem.com.br/Construcao/Download.aspx?QsTipoDownload=YrItVniimrc=&qscodigoDownload=YrItVniimrc=&qsnome=umjTS/rdqvB0muq9avaSjE4MentVo1aJ&qsext=NObo7EqUmqk=&qspath=GPSUEoI5eI5atmcPkmB0/xeVBqesM6+BqltS5cU6m2A jKLXyOqUbgr/vgCfhQeaF&qscodigo=prKrfX>>. Acesso em: 01 ago. 2013.

59 LAPOINTE, F.; TURENNE, S. E. J. B. Low viscosity feedstocks for powder injection moulding. **Powder Metallurgy**, 52, September 2009. 338 - 344. Nº 4.

60 HAIQING, Y.; CHENGCHANG, J. E. X. Q. Micro powder injection molding—large scale production technology for micro-sized components. **Science in China Series E: Technological Sciences**, 51, February 2008. 121-126. nº. 2.

- 61 TAM, K. C.; YAP, S. P.; FOONG, M. L. E. L. N. H. Metal injection molding: effects of the vinyl acetate content on binder behavior. **Journal of Materials Processing Technology**, 67, 1997. 120-125.
- 62 GOMES, U. U. **Tecnologia dos pós: fundamentos e aplicações**. Natal: Universitária – UFRN, 1995. 160 p.
- 63 EPMA - EUROPEAN POWDER METALLURGY ASSOCIATION. METAL INJECTION MOULDING - PROCESS - PROPERTIES & TESTING - TECHNICAL GUIDELINES - MIM DESIGN - CASE STUDIES - STANDARDS, Shrewsbury, p. 1 - 36, 2001. Disponível em: <www.epma.com>. Acesso em: 05 maio 2015.
- 64 OMAR, M. A. Injection moulding of a bimodal size distribution 316L stainless steel powders. **Jurnal Teknologi**, 36(A), Jun. 2002. 13–24.
- 65 CHOI, J.-P.; LYU, H.-G.; LEE, W.-S. E. L. J.-S. Densification and microstructural development during sintering of powder injection molded Fe micro-nanopowder. **Powder Technology**, 2014. 596-601.
- 66 KERSTNER, E. K. et al. Aspectos reológicos do feedstock para utilização no processo MIM: revisão. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 6.1, 2011. 21-27.
- 67 GERMAN, R. M. **Powder Injection Moulding**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1990. ISBN ISBN 978-0918404954.
- 68 PIOTTER, V. et al. Manufacturing of complex-shaped ceramic components by micropowder injection molding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 46, 2010. 131–134.
- 69 PIOTTER, V. et al. Replication of micro components by different variants of injection molding. **Microsystem Technologies**, 10, 2004. 547–551.
- 70 SCHNEIDER, J. et al. Mechanical structuring, surface treatment and tribological characterization of steel mould inserts for micro powder injection moulding. **Microsyst Technol**, 14, 2008. 1797–1803.
- 71 KARATAS, Ç.; SÖZEN, A.; ARCAKLIOGLU, E. E. E. S. Investigation of mouldability for feedstocks used powder injection moulding. **Materials and Design**, 29, 2008. 1713–1724.
- 72 FANTONI, G.; TOSELLO, G.; GABELLONI, D. E. H. H. N. Modelling injection moulding machines for micro manufacture applications through functional analysis. **Procedia CIRP** 2, 2, 2012. 107 – 112.
- 73 HELDELE, R. et al. Micro powder injection molding: process characterization and modeling. **Microsyst Technol**, 12, 2006. 941–946.

- 74 KRYACHEK, V. M. Injection moulding (review). **Powder Metallurgy and Metal Ceramics**, 43, 2004. 336 - 348. Nº. 7-8.
- 75 GERMAN, R. M. **Injection Molding of Metals and Ceramic**. Princeton,; Metal Powder Industries Federation, 1997. 413 p.
- 76 SHIMIZU, T. et al. Production of large size parts by MIM process. **Jornal of material processing technology**, 119, 2001. 199-202.
- 77 ARNDT, M. C. **Obtenção de material magnético macio de Fe-Si pelo processo de injeção de pós metálicos**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2002. 80 p. Dissertação de mestrado.
- 78 CHIAVERINI, V. **Metalurgia do pó: técnica e produtos**. 4ª edição. ed. São Paulo: ABM, 2001. 330 p.
- 79 KAMEO, K. et al. Sliding wear behavior of stainless steel parts made by metal injection molding (MIM). **Wear**, 260, 2006. 674–686.
- 80 TAY, B. Y. et al. Surface roughness of microstructured component fabricated by μ MIM. **Materials Science and Engineering A**, 396, 2005. 311–319.
- 81 ZAUNER, R. Micro powder injection moulding. **Microelectronic Engineering**, 83, 2006. 1442–1444.
- 82 NISHIYABU, K. Micro Metal Powder Injection Molding. In: WANG, J. **Some Critical Issues for Injection Molding**. Slavka Krautzeka - Croatia: InTech, 2012. Cap. 5, p. 105-130. ISBN ISBN 978-953-51-0297-7. Disponível em:
<http://cdn.intechopen.com/pdfs/33647/InTech-Micro_metal_powder_injection_molding.pdf>.
- 83 DEMÈTRIO, K. B. **Cryomilling and Spark Plasma Sintering of 2021 Aluminium Alloy**. Trento: University of Trento, 2011. 1 - 136 p. Doctoral school in materials engineering of Department of materials engineering and industrial technologies.
- 84 LU, Z. E. Z. K. F. Morphology and mechanical properties of polypropylene micro-arrays by micro-injection molding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, London, 40, 2009. 490–496.
- 85 RUH, A. et al. Effects of material improvement and injection moulding tool design on the movability of sintered two-component micro parts. **Microsyst Technol**, 16, 2010. 1989–1994.

- 86 WANG, Z. L. **Nanomaterials for Nanoscience and Nanotechnology. Characterization of Nanophase Material**. Verlag: CopyrightWiley-VCH Verlag GmbH., 2000. 1 - 132 p.
- 87 BRUNE, H. et al. **Nanotechnology Assessment and Perspectives**. Berlin: Springer – Verlag Berlin Heidelberg, 2006. 1 - 493 p. ISBN 3-540-32819-X.
- 88 TOMA, H. E. A. A. K. Nanociência e nanotecnologia. **Revista CIÊNCIA HOJE**, São Paulo, v. 5, n. c, 2005.
- 89 OHNO, K.; TANAKA, M.; TAKEDA, K. Y. **Nano and Micromaterials**. New York: Springer – Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 978-3-540-74556.
- 90 KUBO, R. Electronic Properties of Metallic Fine Particles. **Journal International the Physical Society of Japan**, 1962. 975-986.
- 91 RAO, C. N. R. E. C. A. K. **Nanomaterials Handbook**. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. 1- 24 p. ISBN 0-8493-2308-8.
- 92 ROCO, M. C. Nanoscale Science and Engineering:Unifying and Transforming Tools. **American Institute of Chemical Engineers**, 50, 2004.
- 93 DUNCAN, D. S. et al. Coulomb-blockade spectroscopy on a small quantum dot in a parallel magnetic field. **Applied Physics Letters**, 77, 02 OCTOBER 2000. 2183 – 2185.
- 94 WILDE, G. **Nanostructured Materials**. Great Britain: Elsevier Ltd, 2009. 1 – 384 p.
- 95 SKANDAN, G. A. S. A. **Nanomaterials Handbook**. EUA: Taylor & Francis Group, v. I, 2006. 25-39 p. Capítulo 2.
- 96 KOCH, C. C. **NANOSTRUCTURED MATERIALS Processing, Properties and Potential**. North Carolina: Noyes Publications, v. 1, 2002.
- 97 TONIOLO, J. C. **Síntese de pós de alumina nanocristalina por combustão em solução**. Porto alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2004. 1-77 p. Dissertação de mestrado PPGEM.
- 98 DUARTE, A. S. **Fabricação e caracterização de Nanoponteiras Metálicas para Microscopia Ótica de campo Próximo**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, 2009. 1-107 p. Dissertação de mestrado Instituto de Física.
- 99 RAO, F. R. S. A. G. A. **Nanotubes and Nanowires**. Norfolk: Biddles Ltd, King’s Lynn, 2005. 1-283 p. ISBN 0-85404-832-4.
- 100 ZHANG, L. A. W. T. J. Nanotechnology and nanomaterials: Promises for improved tissue regeneration. **Nano Today**, 4, 2009. 66-80.
- 101 GOUADEC, G. A. C. P. Raman Spectroscopy of nanomaterials: How spectra relate to disorder, particle size and mechanical properties. **Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials**, 53, 2007. 1–56.

- 102 NGUYEN, T. P.; HESEMANN, P.; MOREAU, J. J. E. i-Silica: Nanostructured silica hybrid materials containing imidazolium groups by hydrolysis-polycondensation of disilylated bis-N,N0-alkyl-imidazolium halides. **Microporous and Mesoporous Materials**, França, 2011. 292–300.
- 103 RAWERS, J.; COOK, D.; KIM, T. Application of Mössbauer spectroscopy in the characterization of nanostructured materials. **Materials Science and Engineering A248**, 1998. 212–220.
- 104 GUZ, I. A. et al. Developing the mechanical models for nanomaterials. **Composites Part A: Applied Science and Manufacturing**, 38, 2007. 1234–1250.
- 105 KASIAROVÁ, M. et al. Microstructure and fracture-mechanical properties of carbon derived Si₃N₄+SiC nanomaterials. **Materials Science and Engineering C**, 26, 2006. 862–866.
- 106 ASTHANA, R.; KUMAR, A.; DAHOTRE, N. B. **Materials Processing and Manufacturing Science**. San Diego: Elsevier Academic Press, v. 1, 2006. 551–614 p. Chapter 8 – Nanomaterials and Nanomanufacturing.
- 107 OVID'KO, I. A. A. S. A. G. Enhanced ductility of nanomaterials through optimization of grain boundary sliding and diffusion processes. **Acta Materialia**, St. Petersburg - Russia, 57, 2009. 2217–2228.
- 108 HUANG, X.; KAMIKAWA, N.; HANSEN, N. Increasing the ductility of nanostructured Al and Fe by deformation. **Materials Science and Engineering A**, 493, 2008. 184–189.
- 109 HAN, B. Q. et al. Effect of strain rate on the ductility of a nanostructured aluminum alloy. **Scripta Materialia**, 54, 2006. 1175–1180.
- 110 WANG, Y. M. A. M. E. Strain hardening, strain rate sensitivity, and ductility of nanostructured metals. **Materials Science and Engineering A**, 375, 2004. 46–52.
- 111 VALIEV, R. Z.; ISLAMGALIEV, R. K.; SEMENOVA, I. P. Superplasticity in nanostructured materials: New challenges. **Materials Science and Engineering A 463**, 2007. 2–7.
- 112 KRASILNIKOV, N. A.; SHARAFUTDINIV, A. High strength and ductility of nanostructured Al-based alloy, prepared by high-pressure technique. **Materials Science and Engineering A 463**, 2007. 74–77.
- 113 WANG, H. L.; WANG, Z. B.; LU, K. Interfacial diffusion in a nanostructured Cu produced by means of dynamic plastic deformation. **Acta Materialia 59**, 2011. 1818–1828.

- 114 WANG, Z. B. et al. Interfacial diffusion in Cu with a gradient nanostructured surface layer. **Acta Materialia** **58.**, 2010. 2376–2386.
- 115 LU, K. A. L. J. Nanostructured surface layer on metallic materials induced by surface mechanical attrition treatment. **Materials Science and Engineering A** **375–377**, 2004. 38–45.
- 116 WU, B. et al. Reduced thermal diffusivity of nanostructured silver. **Journal of Physics and Chemistry of Solids**, **57**, 1996. 1211-1213.
- 117 PIRC, R.; HOLZ, A. Specific heat of nanostructured materials. **NanoStructured Materials.**, **6.**, 1995. 755-758.
- 118 KARAKASIDIS, T. E.; CHARITIDIS, C. A.; SKARAKIS, D. A. C. F. Elastic properties of nanostructured materials with layered grain boundary structure. **Surface Science** **601**, 2007. 3521–3527.
- 119 QIN, X. Y. et al. The elastic properties of nanostructured ag measured by laser ultrasonic technique. **Nano Structured Materials**, **10.**, n. 4., 1998. 661-672.
- 120 LÖFFLER, J. F. et al. Crossover in the magnetic properties of nanostructured metals. **Materials Science and Engineering A** **304–306**, 2001. 1050–1054.
- 121 CHERMAHINIA, M. D. et al. The evolution of heating rate on the microstructural and magnetic properties of milled nanostructured Fe_{1-x}Co_x (x = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 and 0.7) powders. **Journal of Alloys and Compounds** **484**, 2009. 54–58.
- 122 JAKUBOWICZ, J.; SZLAFEREK, A.; JURCZYK, M. Magnetic properties of nanostructured Nd (Fe,Co,Cr) B/a-Fe magnets. **Journal of Alloys and Compounds** **283.**, 1999. 307–310.
- 123 ZHELUDKEVICH, M. L. et al. Nanostructured sol–gel coatings doped with cerium nitrate as pre-treatments for AA2024-T3 Corrosion protection performance. **Electrochimica Ac**, **51**, 2005. 208-217.
- 124 ZHANG, N. L. J.; HE, Z.; SUN, K. Preparation and characterization of nano-tube and nano-rod structured La_{0.8}Sr_{0.2}MnO_{3-δ}/Zr_{0.92}Y_{0.08}O₂ composite cathodes for solid oxide fuel cells. **Electrochemistry Communications** **13**, 2011. 570–573.
- 125 DUANA, H.; GNANARAJ, J.; LIANG, J. Synthesis and rate performance of Fe₃O₄-based Cu nanostructured electrodes for Li ion batteries. **Journal of Power Sources** **196**, 2011. 4779–4784.
- 126 DUANA, H. et al. Fabrication and characterization of Fe₃O₄-based Cu nanostructured electrode for Li-ion battery. **Journal of Power Sources** **185**, 2008. 512–518.

- 127 NANOBIOTEC. Disponível em: <<http://www.nanobiotec.iqm.unicamp.br/>>. Acesso em: 08 dez. 2012.
- 128 MOHANRAJ, V. J. A. C. Y. Nanoparticles – A Review Tropical. **Journal of Pharmaceutical Research**, June 2006. 561-573.
- 129 GIMENEZ, I. F.. et al. Cytotoxicity on V79 and HL60 Cell Lines by Thiolated- β -Cyclodextrin-Au/Violacein Nanoparticles. **journal of Biomedical Nanotechnology**, 1, 2005. 1-7.
- 130 D'AQUINO, R. Nanobiotechnology. fulfilling the promise of nanomedicine. **Chemical Engineering Progress**, 2, Feb 2006. 35-37.
- 131 RAWAT, M.; SINGH, D.; SARAF, S. A. S. S. Nanocarriers: Promising Vehicle for Bioactive Drugs. **Biological & pharmaceutical bulletin** 29, 9, 2006. 1790—1798.
- 132 MÜLLER, F. F. C. A.; ARMELIN, E.; ALEMÁN, C. A. S. J. Influência de polímeros convencionais e condutor em membranas cátion-seletivas: síntese e caracterização., 25 fev. 2013. Disponível em: <<http://upcommons.upc.edu/e-prints/bitstream/2117/14092/1/CBPoI%202011%20Membranas.pdf>>.
- 133 ION, T. X. exchange membranes: State of their development and perspective. **Journal of Membrane Science** 263, 2005. 1–29.
- 134 ZARBIN, A. J. G. Química de (nano) materiais. **Química Nova**, 30, 2007. 1469-1479.
- 135 CENTRO ECOLÓGICO. Nanotecnologia: A manipulação do invisível. **Revista NANOTECNOLOGIA - Novas Tecnologias**, 2009. 1- 44.
- 136 YAO, Z.; STIGLICH, J. J. A. S. T. S. Nano-grained Tungsten Carbide-Cobalt (WC/Co) Materials Modification, p. 1-27. Disponível em: <http://www.matmod.com/publications/armor_1.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2013.
- 137 STADELMAIER, H. H. Magnetic properties of materials. **Materials Science and Engineering A287**, 2000. 138–145.
- 138 CALLISTER, W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 7^a. ed. São Paulo: LTC, 2002. 1-1000 p.
- 139 WEIZENMANN, A. **Metamagneto em Campos Magnéticos Uniforme e Aleatório**. Fortaleza: Departamento de Pós-graduação em Física da Universidade Federal do Ceará., 2005. 1-74 p. Dissertação de Mestrado.
- 140 PADILHA, A. F. **Materiais de engenharia microestrutura e propriedades**. Curitiba: Hemus livraria, distribuidora e editora S.A., 2000. 1-317 p.
- 141 NEVES, H. R. **Nanopartículas antiferromagnéticas de MnO para aplicações em biomedicina como agentes de contraste**. São Carlos: Departamento de Pós-graduação em

Química de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2012. 1-78 p. Dissertação de Mestrado.

142 FIGUEIREDO, W. **Determinação das fronteiras de fase de sistemas antiferromagnéticos anisotrópicos a baixas temperaturas.** São Paulo,: Departamento de Pós-graduação em Física da Universidade de São Paulo., 1980. 1-204. p. Tese de Doutorado.

143 LIMA, F. **Análise do Efeito Goos-Hänchen e Nao-Reciprocidade do Fluxo de Potência em Antiferromagnéticos.** Natal,: Departamento de Pós-graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Norte., 2009. 1-142. p. Tese de Doutorado.

144 COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials.** Cambridge: Cambridge University Press, 2010. 1- 633 p. The Edinburgh Building, Cambridge CB28RU.

145 STADELMAIER, H. H. Magnetic properties of materials. **Materials Science and Engineering A287**, 2000. 138–145.

146 SHACKELFORD, J. F. **Ciências dos materiais.** 6ª. ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2008. 416-560 p.

147 VASCONSELOS, C. F. L. **Desenvolvimento de Antenas de Microfita com Patch em Anel Utilizando Materiais Ferrimagnéticos e Metamateriais.** Natal: Departamento de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2010. 1-137. p. Tese de Doutorado.

148 BARBOSA, C. F. E. R. D. Síntese de gel de ferrita de cobalto (CoFe₂O₄). Disponível em: <<http://www.sbpcnet.org.br/livro/63ra/conpeex/mestrado/trabalhos-mestrado/mestrado-carolina-freire.pdf>>. Acesso em: 13 jan. 2013.

149 ALMEIDA, T. A. T. **Estudo IN VIVO de um cerâmico ferrimagnético com potencial em oncoterapia.** Porto: Faculdade de Engenharia. Universidade do Porto., 2001. 1- 89 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Biomédica.

150 LACAVA, B. M. **Síntese de fluido magnético à base de maghemita para produção de nanocápsulas magnéticas de albumina bovina.** Brasília: Departamento de Pós-graduação no Instituto de Química da Universidade de Brasília., 2009. 1 – 88. p. Dissertação de Mestrado.

151 KANEYOSHI, T. Ferrimagnetism in a decorated Ising nanowire. **Physics Letters A**, 376, July 2012. 2352–2356.

152 SHIMOKAWA, T. A. N. H. Ferrimagnetism of the Heisenberg Models on the Quasi-One-Dimensional Kagome Strip Lattices, 31 July 2012. Disponível em: <<http://arxiv.org/pdf/1207.6771v1.pdf>>. Acesso em: 18 jan. 2013.

- 153 MAZO-ZULUAGA, J. Una mirada al estudio y las aplicaciones tecnológicas y biomédicas de la magnetita. **Revista EIA**, Medellín. Colombia., p. 207-223, Diciembre 2011. ISSN ISSN 1794-1237.
- 154 OLIVEIRA, A. H. **Exchange Bias em filmes policristalinos: Estudo da importância do Spin de interface e de volume.** Porto Alegre: Departamento de Pós-graduação em Física da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Fevereiro de 2011. 1-80 p. Dissertação de Mestrado.
- 155 LEITE, J. V. **Análise De Módulos Diferenciais de Histerese Magnética.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2002. 1-92 p. Dissertação em Engenharia Elétrica.
- 156 SOBH, H. A.; ALY, S. H. A. Y. S. Calculation of magnetization curves and probability distribution. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 331, 2013. 174–182.
- 157 WLODARSKI, Z. Analytical description of magnetization curves. **Physica B**, 373, 2006. 323–327.
- 158 SMIRNOV, S. I. A. K. S. V. Magnetization curves of randomly oriented ferromagnetic single domain. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 1123–1127.
- 159 LEITE, V. S. E. F. W. Determinação de curvas de histerese. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, 29, n. 1, 2007. 53 - 56.
- 160 RIVAS, M.; GARCÍA, J. A.; CERDEIRA, M. A. A. M.-G. J. C. Temperature dependence of biased hysteresis loops in hard-soft nanocrystalline. **Journal of Non-Crystalline Solids**, 358, 2012. 310–315.
- 161 COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials.** Dublin: Cambridge University Press, 2010. 7 - 9 p. ISBN ISBN-13 978-0-511-67743-4 eBook (NetLibrary).
- 162 REPOSITORY, WIKIMEDIA COMMONS. Curva de histerese. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:B-H_loop.png>. Acesso em: 30 abr. 2013.
- 163 LI, Y. F.; CHEN, D. X.; VAZQUEZ, M. A. H. A. Effects of magnetostatic interaction on the magnetization processes in Fe_{73.5} Cu₁ Nb₃ Si_{13.5} B₉ nanocrystalline wires. **Journal of physics d: applied physics**, 35, 2002. 508–511.
- 164 HADIMANI, R. L.; MELIKHOV, Y.; SNYDER, J. E. A. J. D. C. Determination of Curie temperature by Arrott plot technique in Gd₅(SixGe_{1-x})₄ for x > 0.575. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 696 – 698.

- 165 SU, Y. A. W. G. J. The shift of Curie temperature and evolution of ferroelectric domain in ferroelectric crystals. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, 53, 2005. 2071–2099.
- 166 TODAKA, T.; KISHINO, T. A. E. M. Low Curie temperature material for induction heating self-temperature. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 702–707.
- 167 BAHL, C. R. H.; BJØRK, R.; SMITH, A. A. N. K. K. Properties of magnetocaloric materials with a distribution of Curie temperatures. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 324, 2012. 564 – 568.
- 168 MSPC. Magnetismo de materiais. Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/elemag/eletrm0260.shtml>>. Acesso em: 15 mar. 2013.
- 169 H., D. H.; HOSSEINI, H. M. A. S. A. A simple model for the size and shape dependent Curie temperature of freestanding Ni and Fe nanoparticles based on the average coordination number and atomic cohesive energy. **Chemical Physics**, 383, 2011. 1–5.
- 170 CAO, L. F. et al. Size and shape effects on Curie temperature of ferromagnetic nanoparticles. **Trans. Nonferrous Met. SOC. China**, 17, 2007. 1451-1455.
- 171 SHULL, R. D. Nanocrystalline and Nanocomposite Magnetic Materials and Their Applications. **Journal of iron and steel research international**, 14, 2007. 69-74.
- 172 ZHOU, W. et al. magnetic, hollow silica nanocomposites for nanomedicine. Nanomedicine: Drug-loaded. **Nanotechnology, Biology, and Medicine** 1, 2005. 233– 237.
- 173 KULISCH, W. et al. (Eds.). **Nanostructured materials for advanced technological applications: A Brief introduction**. Amsterdam: Springer Science and Business Media B.V., June 2009. 1-525 p. pp. 3 – 34.
- 174 TANAKA, T.; MATSUZAKI J., K. H. A. Y. S. Magnetization behavior of hard / soft - magnetic composite pillar. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 3100 – 3103.
- 175 ANDERSON, P. A universal DC characterisation system for hard and soft magnetic materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 320, 2008. 589 – 593.
- 176 SILEVITCH, D. M. et al. A ferromagnet in a continuously tunable random field. **Nature**, 448, 2 August 2007. 567-570.
- 177 MYUNGA, N. V.; PARK, D.-Y.; YOON, B.-Y. A. S. P. T. A. Development of electroplated magnetic materials for MEMS. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 265, 2003. 189–198.

- 178 FIORILLO, F. **Measurement and characterization of magnetic materials**. 1^a. ed. San Diego: ELSEVIER Academic Press, 2004. 647 p.
- 179 COEY, J. M. D. Magnetic materials. **Journal of Alloys and Compounds**, 326, 2001. 2–6.
- 180 JILES, D. C. Recent advances and future directions in magnetic. **Acta Materialia**, 51, 2003. 5907-5939.
- 181 GUTFLEISCH, O. et al. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient.”. **Advanced Materials**, 23, 2011. 821–842.
- 182 SHARMA, D.; KAMLESH, C. E. P. S. M. Design and development of powder processed Fe–P based alloys. **Materials and Design**, 32, 2011. 3198 - 3204.
- 183 DIAS, M. M.; SCHAEFFER, L.; DIAS, A. M. E. C. J. L. NOVAS PERSPECTIVAS DAS MÁQUINAS ELÉTRICAS TRIFÁSICAS A PARTIR DA UTILIZAÇÃO DE MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS SINTERIZADOS. **Revista liberato**. Disponível em: <www.liberato.com.br/upload/arquivos/0131010716421316.pdf>. Acesso em: 02 maio 2013.
- 184 WIAK, S.; KRAWCZYK, A.; I., E. D. **Advanced computer techniques in applied eletromagnetics**. Amsterdam: IOS Press, v. 30, 2008. 472 p. ISBN ISBN 978-1-58603-895-3.
- 185 NARASIMHAN, K.; HANEJKO, F.; AND. MARUCCI, M. **Growth Opportunities with Soft Magnetic Materials**. 2008 World Congress. Washington D.C. : Hoeganaes Corporation. 2008. <http://dc439.4shared.com/doc/1LdwUXtn/preview.html>.
- 186 LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals for Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**. Princeton: Metal Powder Industries Federation, 1992.
- 187 INFOMET. Diagrama de Fase Ferro - Silício. **InfoMet - Informações britadas, fundidas e laminadas**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/diagramas-fases-ver.php?e=mostrar&id_diagrama=243&btn_filtrar=Ok>. Acesso em: 02 jun. 2013.
- 188 HANSEN, M. A. A. K. **Constitution of Binary Alloys**. New York: McGraw-Hill, v. 2, 1985. 1305 p.
- 189 LANDGRAF, F. J. G. Lâminas de aço para motores elétricos. **Metalurgia e materiais**, São Paulo, 55, 1999. 626-630.
- 190 CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Materiais de construção mecânica**. 2^a. ed. São Paulo: Mc Graw-Hill, v. III, 1986. 66 - 79 p.

- 191 TORRES, A. Chapas de ferro-silício, p. 110, 2003. Disponível em: <http://www.pfi.uem.br/mfi/disserta_teses/teses_pdf/Aluizio_torres_2003.pdf>. Dissertação de Mestrado.
- 192 ROCHA, M. A. E. M. R. A. **MODELAGEM DE CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO PARA SOLUÇÃO**. Curitiba: Centro Federal de Educação, 2005. Monografia de graduação de Engenheiro Eletricista.
- 193 INFOMET - Informações britada, fundidas e laminadas. **4 - Metais e ligas para a indústria elétrica**. Disponível em: <http://www.infomet.com.br/acos-e-ligas-conteudo-ler.php?cod_tema=9&cod_secao=10&cod_assunto=81&cod_conteudo=124>. Acesso em: 2013 jul. 15.
- 194 GROSSNER, N. R. **Transformer for eletronic and circuits**. 2ª. ed. New York: McGraw-Hill. Inc., 1983. 467 p.
- 195 ABB NO BRASIL. westinghouse electric company. ISSN <http://www.abb.com.br/cawp/abbzh252/93615b19bb83ce2fc125791900224a5c.aspx>. Acesso em: 10 junho 2013.
- 196 INOVAÇÃO em Transmissão. **Alstom no Brasil**. Disponível em: <<http://www.alstom.com/brazil/pt/produtos-e-servicos/grid/>>. Acesso em: 04 jun. 2013.
- 197 BAS, J. A.; CALERO, J. A. A. D. M. J. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 254–255, January 2003. 391–398.
- 198 STRECKOVÁ, M.; FÁBEROVÁ, M.; BURES, R. A. D. E. Improvement of mechanical properties of smc trough different. **Acta Metallurgica Slovaca - Conference**, 3, 2013. 120-127.
- 199 SKARRIE, H. **Design of Powder Core**. Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation Lund Institute of Technology of Lund University, 2001. 161 p. Licentiate Thesis.
- 200 JANSSON, P. **SMC materials – including present and future**. PM2TEC 2000. New York: Metal Powder Industries Federation - MPIF. 2000. p. 1-12.
- 201 JANSSON, P. **Soft magnetic composites – from dc to 1 MHz with iron**. Powder Metallurgy World Congress. Granada: MPIF. 1998.
- 202 GÉLINAS, C. . C. F. . P. S. . L. L.-P. . Effect of curing conditions on properties of iron-resin materials for low frequency applications. **Advances in Powder Metallurgy & Particulate Materials**, 1998.

- 203 REINAP, A. **Design of Powder Core Motors**. Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation of Lund University, 2004. 220 p. Doctoral Dissertation in Industrial Electrical Engineering.
- 204 OLIVER, C. G. . E. R. H. G. **Powder metallurgy in electromagnetic applications**. International Conference & Exhibition on powder metallurgy & particulate materials. Chicago, IL USA: Metal Powder Industries Federation - MPIF. 1995. p. 1-16. 15 - 17 May.
- 205 RUTZ, H. G.; HANEJKO, F. G. E. E. G. W. **The manufacture of electromagnetic components by the powder metallurgy process**. PM2TEC '97 - International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials. Chicago, IL USA: Metal Powders Industries Federation - MPIF. June 29 - July 2 1997. p. 1-18. PM 2 TEC '97 - International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials.
- 206 HANEJKO, F. G.; RUTZ, H. G. A. O. C. G. **Effects of processing and materials on soft magnetic performance of powder metallurgy parts**. Powder Metallurgy World Congress. San Francisco: Metal Powders Industries Federation - MPIF. 1992. p. 26.
- 207 LEWIS ESSWEIN JR, J. A. et al. **Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos**. 18º CBECiMat (Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas: Metallum Congressos Técnicos e Científicos. 24 a 28 Novembro 2008. p. 14.
- 208 HANEJKO, F. G.; ELLIS, G. W. A. H. T. J. **Application of high performance material processing - electromagnetic products**. M2TEC'98 - International Conference on Powder Metallurgy & Particulate Materials. Las Vegas: Metal Powders Industries Federation - MPIF. May 31-June 4 1998. p. 33 - 61.
- 209 MAEDA, T. et al. Development of Super Low Iron-loss P/M Soft Magnetic Material. **SEI TECHNICAL REVIEW**, 60, 2005. 3-9.
- 210 BARBOZA, J. S. et al. **Influência da variação do teor de resina nas propriedades magnéticas de compósitos magnéticos macios aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais. Porto de Galinhas: Metallum Congressos Técnicos e Científicos. 24 a 28 de Novembro 2008. p. 12.
- 211 TAJIMA, S. et al. Magnetic Properties and Microstructure of High-Density Sintered Iron Formed by Warm Compaction Using Die Wall Lubrication. **Materials Transactions**, 46, 2005. 1402 - 1406. nº 6.
- 212 LI, W. et al. Effect of Hot-compaction Temperature on the Magnetic Properties of Anisotropic Nanocrystalline Magnets. **Journal of Magnetism**, 16(3), 2011. 300-303.

- 213 OLEKSÁKOVÁ, D.; KOLLÁR, P.; FÜZER, J. A. K. M. Structure and Magnetic Properties of Hot Pressed NiFe Powder. **ACTA PHYSICA POLONICA A**, 113, 2008. No. 1.
- 214 PELEGRINI, L. **INFLUÊNCIA DO TEMPO DE MOAGEM POR MECÂNICO-SÍNTESE NAS PROPRIEDADES DA LIGA MAGNÉTICA Fe-3%Si-0,75%P APLICADA EM NÚCLEOS DE MÁQUINAS ELÉTRICAS**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2012. 90 p. Dissertação de mestrado.
- 215 LALL, C.; BAUM, L. W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder. **Modern Developments in P/M**, 18, 1998. 363-401.
- 216 PINHO, L. C. A. B. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. Porto: Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009. 99 p. Dissertação de mestrado.
- 217 BITTENCOURT, S. D. **Caracterização de ligas magnéticas sinterizadas para aplicação**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 90 p. Dissertação de Mestrado.
- 218 PASADAS, D. J. **Sistema para detecção de defeitos em placas de material condutor usando uma sonda planar**. Lisboa: Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, 2010. 77 p. Dissertação para obtenção do Grau de Mestrado em Engenharia Electrónica.
- 219 LEFEBVRE, L. P.; PELLETIER, S.; GÉLINAS, C. Effect of electrical resistivity on core losses in soft magnetic iron powder materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 176, 1997. 93 - 96.
- 220 CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Smart Grid no Brasil. **Notícias CGEE**. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/noticias/viewBoletim.php?in_news=815&boletim=>. Acesso em: 19 jul. 2013.
- 221 GUTFLEISCH, O.; WILLARD, M. A. E. B. E. Magnetic Materials and Devices for the 21st Century: Stronger, Lighter, and More Energy Efficient. **Advanced Materials**, 23, 2011. 821–842. n. 7.
- 222 SHOKROLLAHI, H. E. J. K. Soft magnetic composite materials (SMCs). **Journal of Materials Processing Technology**, 189, 2007. 1–12. n° 1-3.

- 223 LEFEBVRE, L. P.; PELLETIER, S. E. G. C. Effect of electrical resistivity on core losses in soft magnetic iron powder materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, 176, 1997. 93 - 96.
- 224 COMITTI, A. Engenharia da Manutenção Redução de queima em motores elétricos Revista Mecatrônica Atual., 08 abr. 2011. Disponível em:
<<http://www.mecatronicaatual.com.br/secoes/leitura/802>>. Acesso em: 09 fev. 2013.
- 225 ÇALIS, H.; ÇAKIR, A. Rotor bar fault diagnosis in three phase induction motors by monitoring. **Electric Power Systems Research**, 77, 2007. 385–392.
- 226 VIEIRA, L. Tipo de Motores Elétricos. Disponível em:
<<http://www.dea.uem.br/disciplinas/eletrotecnica/motoreseletricos.pdf>>. Acesso em: 09 dez. 2012.
- 227 VIVALDINI, K. C. T. **Motores de passo**. São Carlos: ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP, v. 1, 2009. MATERIAL COMPLEMENTAR.
- 228 CONSTANDINO, T. G. Tudo sobre motores de passo 1ª Parte: Os fundamentos. **Eletrônica & Microinformática**, São Paulo, p. 31-35.
- 229 BARABAS, Z.; MORAR, A. High performance microstepping driver system based on five-phase stepper motor (sine wave drive). **Procedia Technology**, 12, 2014. 90-97.
- 230 INCREASING use of electric motors in automotive applications could provide boost for powder magnets - See more at:
<http://www.ipmd.net/news/002327.html#sthash.YZPlme9S.dpuf>. **IPDM.net - the website and magazine for PM**, 17 jul. 2013. Disponível em:
<<http://www.ipmd.net/news/002327.html>>. Acesso em: 20 jul. 2013.
- 231 BARBOZA, J. S. **Caraterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 101 p. Dissertação de mestrado.
- 232 ESSWEIN JUNIOR, J. A. L. **Desenvolvimento de compósitos magnéticos macios utilizados em núcleos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. 117 p. Dissertação de Mestrado.
- 233 FERREIRA, C. F. **Desenvolvimento de núcleos para transformadores**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011. 78 p. Dissertação de Mestrado.

- 234 SKARRIE, H. **Design of Powder Core Inductors**. Lund: Department of Industrial Electrical Engineering and Automation, Lund University, v. 1, 2001. 161 p. Thesis.
- 235 MESQUITA, R. F. **Construção de um minimotor com núcleos do estator e rotor a partir da metalurgia do pó**. Novo Hamburgo: Programa de pós graduação do Instituto de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Feevale, 2013. 76 p. Dissertação de Mestrado.
- 236 PELEGRINI, L. **Influência do tempo de moagem por mecâno-síntese nas propriedades da liga magnética fe-3%si-0,75%p aplicada em núcleos de máquinas elétricas**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. - PPGEM da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 90 p. Dissertação de Mestrado.
- 237 LOPES, H. Industrial Heating Brasil. **Metalurgia do Pó - A metalurgia do pó nos veículos elétricos**, 18 mar. 2013. Disponível em:
<<http://www.revistaih.com.br/colunista/henrique-lobes/>>. Acesso em: 20 jul. 2013.
- 238 LUNDMARK, S. K. T. **Application of 3-D Computation of Magnetic Fields to the Design of Claw Pole Motors**. Göteborg: Department of Energy and Environment - Division of Electric Power Engineering of CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2005. 103 p. THESIS FOR THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY.
- 239 GIERAS, J. F.; WANG, R.-J. A. K. M. J. **Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines**. New York: Springer, 2008. 83 - 85 p. 362 páginas.
- 240 ARANHA, R. S. E. S. E. B. ASPECTOS DO MOTOR DE FLUXO AXIAL E A UTILIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ELEMENTOS FINITOS. Disponível em:
<http://www.ufg.br/conpeex/2006/porta_arquivos/posgraduacao/19951028-RaphaelSilvaAranha.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2013.
- 241 CHALLA, S. K. **Comparative study of axial flux permanent magnet brushless dc motor operating with the winding connected in single-phase and two-phase system**. Louisiana State: Faculty of the Louisiana State University And Agricultural and Mechanical college, 2006. 81 p. A Thesis of Master of Science in Electrical Engineering.
- 242 MAIA, T. A. C. **Projeto e Construção de um Gerador a Ímãs Permanentes de Fluxo Axial para Turbina Eólica de Pequena Potência**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerai (UFMG), 2011. Dissertação Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
- 243 KALENDER, O.; EGE, Y.; NAZLIBILEK, S. Design and determination of stator geometry for axial flux permanent. **Measurement**, 44, 2011. 1753–1760.

- 244 WEG. VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO - WEG, 15 Abril 2003. Disponível em: <http://www.inee.org.br/down_loads/veh/VEH_WEG_Nau.PDF>. Acesso em: 21 jul. 2013. 1º WORKSHOP SOBRE VEÍCULO ELÉTRICO HÍBRIDO NO BRASIL.
- 245 JULIANI, A. D. P. **Projeto e Construção de um Motor Elétrico Linear Aplicado à**. São Carlos: Universidade de São Paulo - USP, 2011. 147 p. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos.
- 246 BERNARDES, S. R. et al. Tecnologia CAD/CAM aplicada a prótese dentária e sobre implantes: o que é, como funciona, vantagens e limitações. **Jornal ILAPEO**, 06, Jan. Fev. Mar. 2012. 8 - 13. nº 01.
- 247 FIGUEIRA, R. J. C. M. **CAD/CAE/CAM/CIM**. Porto: Departamento de Engenharia Informática do Instituto Politécnico do Porto do Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003. 1 - 123 p. Projecto licenciatura em computadores e sistemas.
- 248 AZEVEDO, A. F. M. **Método dos Elementos Finitos**. 1ª. ed. Porto - Portugal: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2003. <http://www.fe.up.pt/~alvaro>.
- 249 MARQUES, A. S.; MARTINS, V. E. S. L. **Befícios da simulação computacional no processo de forjamento**. 16ª Conferência Internacional de Forjamento. Porto Alegre: Senafor. 22 a 24 outubro 2012. p. 1-15.
- 250 AUTODESK. Recursos do Moldflow. **Autodesk Simulation**. Disponível em: <<http://www.autodesk.com.br/products/autodesk-simulation-family/features/simulation-moldflow>>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- 251 SOLIDWORKS. SolidWorks Plastics. **SolidWorks Products**. Disponível em: <<http://www.solidworks.com/sw/products/simulation/plastics.htm>>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- 252 AZEVEDO, A. F. M. E. B. J. A. O. FEMIX. **Manual do Programa FEMIX**. Disponível em: <http://civil.fe.up.pt/software/Femix_V3_1/Femix_3.1_Manual.htm>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- 253 MAGMASOFT. MAGMA Solution. Disponível em: <<http://www.magmaflow.com/en/>>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- 254 ANSYS. ANSYS - Simulation Driven Product Development. **MAXWELL**. Disponível em: <<http://www.ansys.com/>>. Acesso em: 22 jul. 2013.
- 255 SIMÕES, M. R. **Simulação computacional de escoamento turbulento em compressor axial utilizando ferramenta de CFD**. Rio de Janeiro: Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. 1 - 130 p. Dissertação de Mestrado.

- 256 PRECISION MICRODRIVES. Nano Planetary™ DC gearmotors. **Precision Microdrives**. Disponível em: <<http://www.precisionmicrodrives.com/dc-gearmotors/dc-gear-motor-ranges/nano-planetary-range>>. Acesso em: 23 jul. 2013.
- 257 GIERAS, J. F. Advancements in electric machines. **Power Systems**, 2008. 135-156.
- 258 VINHAIS, H. F. **Projeto de um micro-motor eletrostático**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Engenharia Mecatrônica. Trabalho de Conclusão.
- 259 FAYYAZ, A. et al. Fabrication of cemented tungsten carbide components by micro-powder injection moulding. **Journal of Materials Processing Technology**, 214, 2014. 1436–1444.
- 260 HENG, S. Y. et al. Micro-powder injection molding (μ PIM) of tungsten carbide. **Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, 45, 19 abr. 2014. 189–195.
- 261 RAJABI, J. et al. The effect of nano-sized stainless steel powder addition on mechanical and physical properties of micropowder injection molded part. **Materials and Design**, 31 maio 2014. 223–232.
- 262 CHOI, J.-P.; LYU, H.-G.; LEE, W.-S. E. L. J.-S. Investigation of the rheological behavior of 316L stainless steel micro-nano powder feedstock for micro powder injection molding. **Powder Technology**, 261, 18 abr. 2014. 201–209.
- 263 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B 703 - 94 - Standard Test Method for Apparent Density of Powders Using Arnold Meter**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 4. 1999. (DOI: 10.1520/B0703-10).
- 264 MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 48**. MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. Princeton, EUA, p. 4. 2012.
- 265 CENTRO DE TECNOLOGIA ESTRATÉGICAS DO NORDESTE - CETENE. Microscopia Eletrônica de Transmissão. Disponível em: <<https://www.cetene.gov.br/pdf/met.pdf>>. Acesso em: 25 janeiro 2015.
- 266 GALLETI, S. R. INTRODUÇÃO A MICROSCOPIA ELETRÔNICA. **Biológico**, São Paulo, jan./dez. 2003. Disponível em: <http://pointer.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce1302/Microscopio_Eletronico.pdf>. Acesso em: 25 janeiro 2015.
- http://pointer.esalq.usp.br/departamentos/leb/aulas/lce1302/Microscopio_Eletronico.pdf.
- 267 ROA, D. B. **Nanofibras de carbono verticalmente alinhadas**: estudo do crescimento por microscopia eletrônica de transmissão. Belo Horizonte: Programa de pós graduação do

Instituto de Ciências Exatas da Universidade Federal de Minas Gerais, 2008. Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Instituto de Ciências Exatas.

268 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B331 - 10 - Compressibility of Metal Powder in Uniaxial Compaction**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 4. 2010. (DOI: 10.1520/B0331-10).

269 MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 45 - Determination of Compressibility of Metal Powders**. MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. Princeton, EUA. 2007.

270 MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. **MPIF Standard 42 - Determination of Density of Compacted or Sintered Metal Powder Products**. MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. Princeton, EUA, p. 4. 1977.

271 BANNACH, G. et al. Efeitos da história térmica nas propriedades do polímero pet: um experimento para ensino de análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. No. 10, p. 1825-1829, 2011. ISSN 0100-4042. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422011001000016>.

272 CALISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Tradução de S. M. S. SOARES e J. R. M. D'ALMEIDA. 8ª. ed. Utah e Iowa, EUA: Gen / LTC, v. 1, 2012. 144 p. ISBN ISBN 978-85-216-2124-9.

273 HECK, N. C. ENG06638-Introdução à engenharia metalúrgica. **Módulo de elasticidade ou de Young**, 2013. Disponível em:

<<http://www.ct.ufrgs.br/ntcm/graduacao/ENG06638/IEM-Texto-4.pdf>>. Acesso em: 2015 dez. 15.

274 BHAVE, P. Metal Injection Molding Standards Review. **The International Journal of Powder Metallurgy**, 26. 277-280.

275 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 10 - 14 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 32. 2014. (DOI: 10.1520/E0010-14).

276 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 384 - 11 - Standard Test Method for Microhardness of Materials**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 43. 2011. (DOI: 10.1520/E0384-11E01).

277 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E 3 - 11 - Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens**. ASTM - AMERICAN

- SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 12. 2011. (DOI: 10.1520/E0003-11).
- 278 BISH, D. L.; REYNOLDS, R. C. Sample preparation for X-ray diffraction. In: BISH, D. L.; REYNOLDS, R. C. **Modern Powder Diffraction**. 1ª. ed. Washington,: Mineralogical Society of America, v. 20, 1989. Cap. 4, p. 73-97. Acesso em: 09 out. 2015.
- 279 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A773 /A773M - 01 (2009): Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 12. 2005. (DOI: 10.1520/A0773_A0773M-14).
- 280 ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6524 Fios e cabos de cobre duro e meio duro com ou sem cobertura protetora para instalações aéreas - Especificação**. Rio de Janeiro - RJ. 1998.
- 281 ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410 - Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro. 2008. (ISBN 978-85-07-00562-9).
- 282 MEEKER, D. femm.info/wiki/HomePage. **Finite Element Method Magnetics: HomePage**, 04 jun. 2014. Disponível em: <<http://www.femm.info/wiki/HomePage>>. Acesso em: 24 jan. 2015. dmeecker@ieee.org.
- 283 POWDERCOATING, TCK. Disponível em: <<http://tckpowdercoating.co.za/index.html>>. Acesso em: 23 jul. 2013.
- 284 ROMEIRO, S. B. B. QUÍMICA NA SIDERURGIA, 1997. Disponível em: <<http://www.iq.ufrgs.br/aeq/html/publicacoes/matdid/livros/pdf/siderurgia.pdf>>. Acesso em: 30 jan. 2015.
- 285 PAULLETTI, P. **Construção e análise do desempenho de um motor de indução trifásico com nucleo produzido via metalurgia do pó**. Porto Alegre: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2012. 1-81 p. Dissertação de mestrado.
- 286 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E10 - 15 - Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 32. 2015. (DOI: 10.1520/E0010-15).
- 287 TOLEDO, T. F. **Siliciação de aço silício**. Belo Horizonte: Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais da REDEMAT - REDE TEMÁTICA EM ENGENHARIA DE MATERIAIS, 2007. 1-148 p. Dissertação de Mestrado.

- 288 ZORZI, J. E.; PEROTTONIA, C. A. E. D. J. A. H. A new partially isostatic method for fast debinding of low-pressure. **Materials Letters**, 57, 17 February 2003. 3784–3788.
- 289 ZORZI, J. E.; PEROTTONIA, C. A. E. D. J. A. H. Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pó submicrométricos. **Cerâmicas**, 50, 2004. 202-208.
- 290 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A370 - Standard Methods and Definition for Mechanical Testing of steel Products**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 58. 1977.
- 291 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E8 / E8M - 13a - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 27. 2012.
- 292 BRASKEM. Catalogo de produtos. Disponível em:
<<http://www.braskem.com.br/site.aspx/Consultar-Produtos?codProduto>>. Acesso em: 15 Fevereiro 2015.
- 293 ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM B331 - Compressibility of Metal Powder in Uniaxial Compaction**. ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. West Conshohocken, PA. EUA, p. 4. 2010.
- 294 SOMASUNDRAM, I. M.; CENDROWICZ, A.; WILSON, D. I. E. J. M. L. Phenomenological study and modelling of wick debinding. **Chemical Engineering Science**, 63, 3 May 2008. 3802-3809.
- 295 SOMASUNDRAM, I. M. et al. 2-D simulation of wick debinding for ceramic part sin close proximity. **Chemical Engineering Science**, 2010. 5990–6000.
- 296 LIN, F.-C.; LIU, B.-H.; HUANG, C.-T. E. C. Y.-M. Evaporative heat transfer model of a loop heat pipe with bidisperse wick structure. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 54, 2 July 2011. 4621–4629.
- 297 GORJAN, L.; KOSMAC, T. E. D. A. Single-step wick-debinding and sintering for powder injection molding. **Ceramics International** 40, 40, 29 June 2013. 887–891.
- 298 EDUFER TRANSFORMADORES. Edufer Transformadores. Disponível em:
<<http://www.edufer.com.br/tabela-de-resistividade-dos-materiais-condutores-semicondutores-e-isolantes/>>. Acesso em: 15 Fevereiro 2015.

299 ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Informações Técnicas.

Tarifas Residenciais Vigentes, Março 2015. Disponível em:

<<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=493>>. Acesso em: 10 Setembro 2015.

300 SINNECKER, J. P. Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos.

Revista Brasileira de Ensino de Física, 22, Setembro 2000.

301 VEDOY, D. R. L. **Compostos de EVA modificados com resinas Hidrocarbônicas**.

Porto Alegre: Programa PPGE3M da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

Dissertação de mestrado.

302 ROCHA, M. C. G.; COUTINHO, F. M. B.; BALKE, S. Índice de Fluidez: Uma

Variável de Controle de Processos de Degradação Controlada de Polipropileno por Extrusão Reativa. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, 1994. 33-37.

303 OURIQUE, P. A. et al. **Efeito da cera de carnaúba na reologia de suspensões**

cerâmicas para moldagem por injeção em baixa pressão. 56° Congresso Brasileiro de Cerâmica. Curitiba. PR: Associação Brasileira de Cerâmica. 2011. p. 1-8.

304 MPIF - METAL POWDER INDUSTRIES FEDERATION. Research developments in carbonyl iron powders for MIM. **MPR**, New Jersey, May 1992. 68-77.

305 SURYANARAYANA, C. Mechanical alloying and milling. In: SURYANARAYANA, C. **Progress in Materials Science**. Orlando, EUA: Elsevier Science Ltd., v. 46, 2001. p. 1-184. ISBN doi:10.1016/S0079-6425(99)00010-9.

306 TAKIMI, A. S. **Obtenção de superligas de NiCrAlY nanoestruturados por moagem de alta energia e sua aplicação por aspensão térmica hipersônica (HVOF)**. Porto Alegre:

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M da UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL, 2004. Dissertação de mestrado.

307 COSTA, A. C. F. M. et al. Síntese e caracterização de nanopartículas de TiO₂.

Cerâmica, 52, 2006. 255-259.

308 NASCIMENTO, A. et al. Síntese e caracterização de nanopartículas de nio pelo Método Pechini, 2014. Disponível em:

<http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/105/42105302.pdf>.

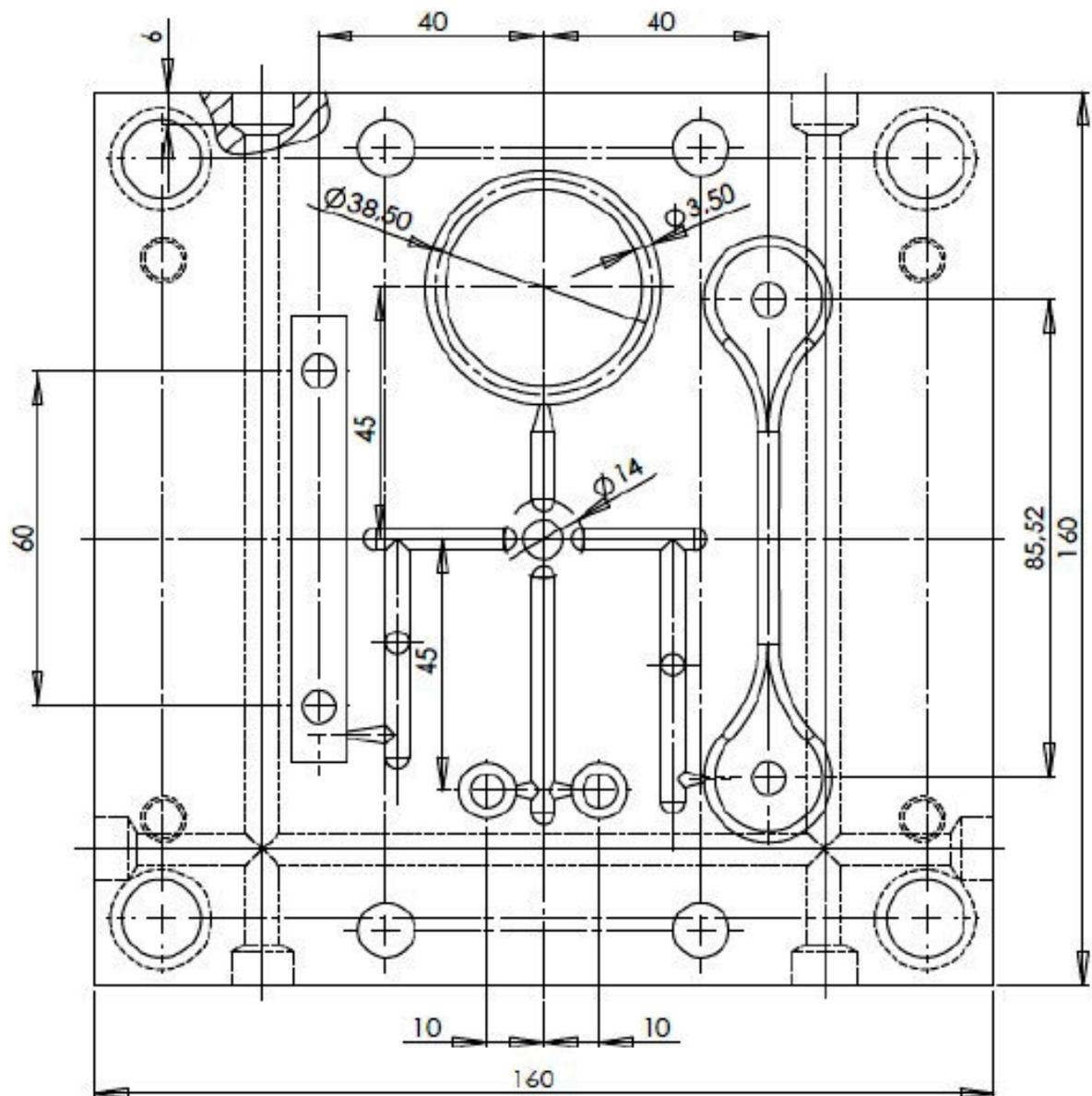
Acesso em: 05 maio 2015.

309 OMAR, M. A.; DAVIES, H. A.; MESSER, P. F. E. E. B. The influence of PMMA content on properties of 316L stainless steel MIM compact. **journal of Materials processing Technology**, 113, 2001. 477 - 481.

310 SURYANARAYANA, C. **Mechanical alloying and milling**. New York: Marcel Dekker, v. 46, 2004. 457 p.

APÊNDICES

Apêndice I - Detalhamento do Molde de Ensaio para a obtenção do corpo de prova.



Apêndice II - Dureza Brinell das composições compactadas e sinterizadas.

Composição / Amostra	1ª Medida (HB)	2ª Medida (HB)	3ª Medida (HB)	4ª Medida (HB)	5ª Medida (HB)	Média (HB)
Ferro puro / II	19	11	14	13	15	14,4
Ferro puro / III	40	30	26	28	40	32,8
Ferro puro / IV	27	21	41	35	37	32,2
Ferro puro / V	28	23	34	29	31	29,0
Ferro puro / VI	50	39	31	42	40	40,4
Ferro puro / VII	38	34	34	35	37	35,6
Ferro puro / VIII	21	28	33	27	32	28,2
Ferro puro / IX	21	34	45	35	36	34,2
Ferro puro / X	32	46	41	34	44	39,4
Ferro 1% Silício / II	35	37	37	36	35	36,0
Ferro 1% Silício / III	44	48	47	48	45	46,4
Ferro 1% Silício / IV	55	51	56	56	52	54,0
Ferro 1% Silício / V	55	58	54	56	58	56,2
Ferro 1% Silício / VI	51	54	56	68	50	55,8
Ferro 1% Silício / VII	62	61	61	60	61	61,0
Ferro 1% Silício / VIII	52	62	56	58	54	56,4
Ferro 1% Silício / IX	58	57	58	56	58	57,4
Ferro 1% Silício / X	55	66	55	54	58	57,6
Ferro 2% Silício / II	58	63	62	62	61	61,2
Ferro 2% Silício / III	73	70	78	75	72	73,8
Ferro 2% Silício / IV	80	70	79	78	75	76,3
Ferro 2% Silício / V	84	81	81	84	82	82,2
Ferro 2% Silício / VI	87	84	90	90	84	86,9
Ferro 2% Silício / VII	84	84	86	83	87	84,7
Ferro 2% Silício / VIII	87	88	92	91	88	89,5
Ferro 2% Silício / IX	87	87	79	87	83	84,7
Ferro 2% Silício / X	92	86	88	90	87	88,5
Ferro 3% Silício / I	54	57	57	52	68	57,6
Ferro 3% Silício / II	80	76	83	86	80	81,0
Ferro 3% Silício / III	85	85	81	88	84	84,6
Ferro 3% Silício / IV	90	88	92	94	89	90,6
Ferro 3% Silício / V	95	95	98	100	98	97,2
Ferro 3% Silício / VI	109	93	105	102	97	101,2
Ferro 3% Silício / VII	105	104	109	102	106	105,2
Ferro 3% Silício / VIII	107	110	98	107	108	106,0
Ferro 3% Silício / IX	102	107	100	105	106	104,0
Ferro 3% Silício / X	110	109	105	106	107	107,4

Apêndice III - Microdureza Vickers das composições compactadas e sinterizadas.

Composição / Amostra	1ª Medida (HV)	2ª Medida (HV)	3ª Medida (HV)	4ª Medida (HV)	5ª Medida (HV)	Média (HV)
Ferro puro / II	84,92	84,3	93,75	94,52	95,23	90,5
Ferro puro / III	107,35	93,12	105,76	107,65	100,52	102,9
Ferro puro / IV	113,18	100,99	103,08	110,85	108,95	107,4
Ferro puro / V	117,29	106,88	119,15	111,65	123,50	115,7
Ferro puro / VI	122,29	117,48	111,16	122,74	128,69	120,5
Ferro puro / VII	118,39	124,44	125,46	110,57	120,32	119,8
Ferro puro / VIII	114,13	120,85	116,08	122,56	128,87	120,5
Ferro puro / IX	115,29	120,75	126,88	114,89	124,68	120,5
Ferro puro / X	119,57	126,69	118,39	118,22	118,97	120,4
Ferro 1% Silício / II	74,69	92,57	85,25	103,25	95,42	90,2
Ferro 1% Silício / III	105,37	105,88	102,53	105,62	106,76	105,2
Ferro 1% Silício / IV	111,98	126,83	111,78	114,54	128,72	118,8
Ferro 1% Silício / V	130,66	140,93	127,53	126,93	139,55	133,1
Ferro 1% Silício / VI	132,39	129,88	141,20	144,94	148,62	139,4
Ferro 1% Silício / VII	140,49	139,28	134,25	144,52	149,95	141,7
Ferro 1% Silício / VIII	133,98	140,65	137,82	144,65	145,96	140,6
Ferro 1% Silício / IX	135,85	139,85	143,45	139,82	141,56	140,1
Ferro 1% Silício / X	138,91	135,95	144,67	135,82	149,25	140,9
Ferro 2% Silício / II	93,25	91,65	85,82	85,87	92,72	89,9
Ferro 2% Silício / III	106,38	108,18	107,14	113,32	110,71	109,1
Ferro 2% Silício / IV	121,89	136,53	130,73	126,55	128,52	128,8
Ferro 2% Silício / V	164,92	165,42	152,75	148,95	160,96	158,6
Ferro 2% Silício / VI	165,49	161,12	160,25	151,42	165,73	160,8
Ferro 2% Silício / VII	159,59	155,82	161,85	160,45	169,87	161,5
Ferro 2% Silício / VIII	161,58	169,55	157,77	162,68	156,85	161,7
Ferro 2% Silício / IX	162,95	161,85	155,95	169,37	159,25	161,9
Ferro 2% Silício / X	162,02	164,67	153,28	166,86	160,02	161,4
Ferro 3% Silício / I	56,88	59,90	60,69	55,19	71,29	60,79
Ferro 3% Silício / II	84,17	79,37	87,59	90,27	80,20	84,32
Ferro 3% Silício / III	119,75	108,84	110,71	135,45	126,17	120,18
Ferro 3% Silício / IV	130,81	138,90	127,07	128,07	127,91	130,55
Ferro 3% Silício / V	177,70	175,85	185,55	169,37	169,02	175,50
Ferro 3% Silício / VI	185,39	161,10	180,22	191,51	185,33	180,71
Ferro 3% Silício / VII	199,23	160,96	180,36	187,54	193,75	184,37
Ferro 3% Silício / VIII	179,67	176,27	192,37	186,39	180,55	183,05
Ferro 3% Silício / IX	183,09	170,05	181,32	197,12	177,78	181,87
Ferro 3% Silício / X	168,88	190,20	183,09	181,65	187,04	182,17

Apêndice IV - Microdureza e dureza das composições injetadas e sinterizadas.

Composição / Amostra	1ª Medida (HV)	2ª Medida (HV)	3ª Medida (HV)	4ª Medida (HV)	5ª Medida (HV)	Média (HV)
Ferro puro 13 / Borda	90,05	65,06	74,72	80,86	62,22	72,00
Ferro puro 13 / Borda	68,10	73,78	68,04	62,88	74,30	
Ferro puro 13 / Núcleo	69,83	68,65	64,55	80,56	68,00	70,16
Ferro puro 13 / Núcleo	74,40	62,39	67,00	76,23	69,95	
Ferro puro 13 / Barra	95,80	69,04	90,08	71,47	63,89	77,36
Ferro puro 13 / Barra	60,42	66,62	85,79	81,44	89,02	
Fe 3Silício 9 / Borda	173,01	176,92	153,56	176,80	144,28	172,72
Fe 3Silício 9 / Borda	178,57	184,98	178,28	188,82	171,98	
Fe 3Silício 9 / Núcleo	168,73	166,73	175,43	170,02	182,80	171,37
Fe 3Silício 9 / Núcleo	165,74	178,57	166,22	166,35	173,15	
Fe 3Silício 9 / Barra	178,28	192,65	180,67	175,30	178,72	185,11
Fe 3Silício 9 / Barra	194,53	176,37	184,24	196,10	194,21	
Composição / Amostra	1ª Medida (HB)	2ª Medida (HB)	3ª Medida (HB)	4ª Medida (HB)	5ª Medida (HB)	Média (HB)
Ferro puro 13 / Borda	57	62	58	58	55	58,0
Ferro puro 13 / Núcleo	53	55	53	56	56	54,6
Ferro puro 13 / Barra	35	48	35	43	38	39,8
Fe 3Silício 9 / Borda	105	85	102	90	95	95,4
Fe 3Silício 9 / Núcleo	102	92	100	98	96	97,6
Fe 3Silício 9 / Barra	109	93	105	102	97	101,2

Apêndice V - Evolução da moagem do pó de ferro

Tempo em horas	(máximo) Tamanho da partícula (µm)	(mínimo) Tamanho da partícula (µm)
2	30,753	17,453
6	25,126	12,749
10	19,876	10,985
14	17,765	8,654
18	7,642	5,128
28	10,634	2,572
32	5,351	1,863
36	2,517	0,895
43	0,987	0,513
47	0,225	0,170
53	0,080	0,060

Apêndice VI - Microdureza e dureza de ferro nanométrico injetado e sinterizado.

Composição / Amostra	1ª Medida (HV)	2ª Medida (HV)	3ª Medida (HV)	4ª Medida (HV)	5ª Medida (HV)	Média (HV)
Ferro Nano 3 / Borda	215,45	192,65	177,2	174,75	172,96	182,8
Ferro Nano 3 / Borda	175,48	180,25	174,86	173,43	191,11	
Ferro Nano 3 / Núcleo	173,29	153,29	148,92	156,47	148,08	158,2
Ferro Nano 3 / Núcleo	159,01	164,87	158,2	159,82	159,91	
Ferro Nano 3 / Barra	266,32	160,06	171,84	153,56	189,38	187,7
Ferro Nano 3 / Barra	175,03	191,28	199,33	182,59	187,64	
Composição / Amostra	1ª Medida (HB)	2ª Medida (HB)	3ª Medida (HB)	4ª Medida (HB)	5ª Medida (HB)	Média (HB)
Ferro Nano 3 / Borda	204	183	168	166	164	173
Ferro Nano 3 / Borda	166	171	165	164	182	
Ferro Nano 3 / Núcleo	165	145	141	148	141	150
Ferro Nano 3 / Núcleo	152	156	151	152	152	
Ferro Nano 3 / Barra	200	152	163	145	181	173
Ferro Nano 3 / Barra	166	181	190	176	180	

Apêndice VII - Microdureza e dureza de ferro micrométrico com 25% nanométrico.

Composição / Amostra	1ª Medida (HV)	2ª Medida (HV)	3ª Medida (HV)	4ª Medida (HV)	5ª Medida (HV)	Média (HV)
Ferro Misto 3 / Borda	94,28	92,12	93,12	95,74	89,13	92,54
Ferro Misto 3 / Borda	89,78	89,78	89,48	97,81	94,18	
Ferro Misto 3 / Núcleo	84,22	86,46	81,25	86,68	84,13	84,43
Ferro Misto 3 / Núcleo	83,80	83,86	86,31	86,51	81,12	
Ferro Misto 3 / Barra	104,12	111,26	100,81	101,25	114,18	106,47
Ferro Misto 3 / Barra	119,00	102,08	107,48	105,74	98,74	
Composição / Amostra	1ª Medida (HB)	2ª Medida (HB)	3ª Medida (HB)	4ª Medida (HB)	5ª Medida (HB)	Média (HB)
Ferro Misto 3 / Borda	90	87	88	90	85	88
Ferro Misto 3 / Borda	85	85	85	93	90	
Ferro Misto 3 / Núcleo	78	81	77	81	79	79
Ferro Misto 3 / Núcleo	79	79	81	81	77	
Ferro Misto 3 / Barra	99	106	95	96	109	101
Ferro Misto 3 / Barra	114	100	102	99	93	

Apêndice VIII - Microdureza e dureza de ferro micrométrico com 25% nanométrico.

Composição / Amostra	1ª Medida (HV)	2ª Medida (HV)	3ª Medida (HV)	4ª Medida (HV)	5ª Medida (HV)	Média (HV)
Estator Pó Micrométrico	98,06	110,10	114,18	100,34	110,10	102,27
	126,25	97,22	101,16	103,57	97,22	
	91,68	106,00	92,50	87,35	98,28	
Estator Pó Micro % Nano	77,55	75,30	84,99	81,12	63,98	82,72
	86,84	98,56	79,70	79,74	94,39	
	90,42	81,29	76,26	92,50	78,19	
Estator Pó Nanométrico	185,11	145,81	142,88	155,13	152,25	152,48
	163,39	155,79	146,53	150,51	183,38	
	135,17	121,91	144,07	151,27	154,00	

Apêndice IX - Drive de Acionamento do mini-motor de passo

Foi escolhido um sistema de acionamento para o mini-motor de passo, que atendesse as intenções de uso, ou seja, um sistema de obtenção de imagens (endoscópio). O circuito elétrico está apresentado na Figura 221 que demonstra com detalhes todos os componentes envolvidos.

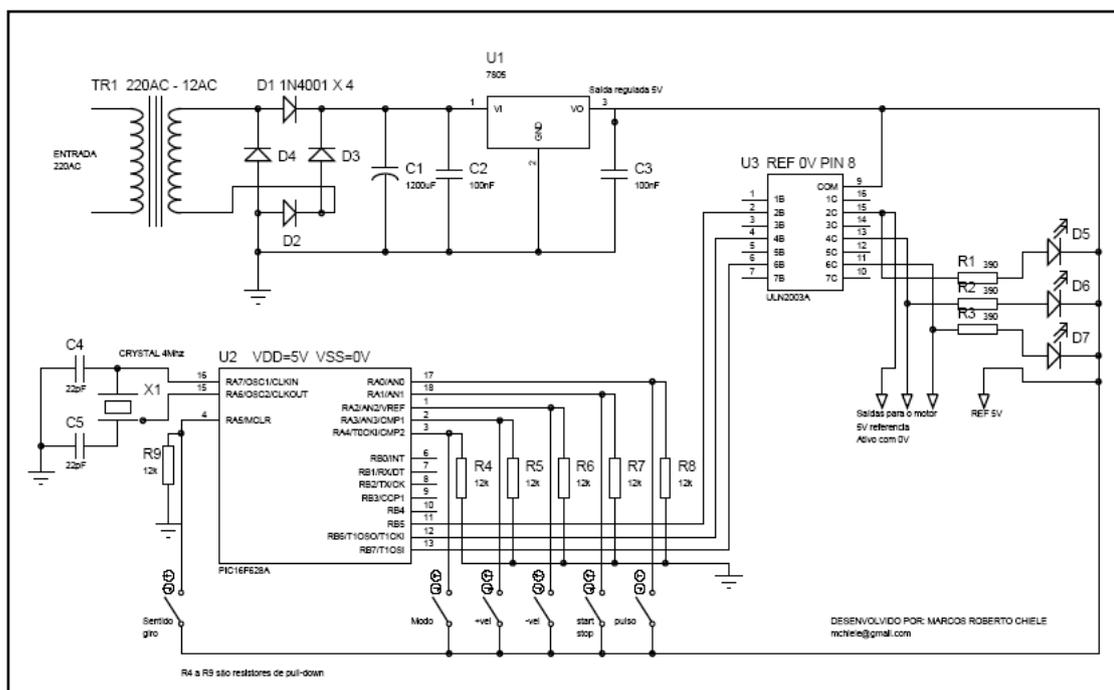


Figura 221: Esquema elétrico do sistema de acionamento

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

- Chave de seleção de acionamento contínuo ou pulsante manual.
- Chave de deslocamento angular de passo inteiro ou em micro passo.
- Botões para aumento ou diminuição de velocidade de giro.
- Chave de reversão de sentido de giro.
- Botão de comando pulsante manual utilizando as funções de passo, micro passo 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 mini-motor de passo.