

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 - PPGEM

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS DESENVOLVIDOS  
ATRAVÉS DA METALURGIA DO PÓ APLICADOS A NÚCLEOS DE MÁQUINAS  
ELÉTRICAS

JULIANO SOARES BARBOZA

Dissertação para a obtenção do título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre  
2009

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 - PPGEM

CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS DESENVOLVIDOS  
ATRAVÉS DA METALURGIA DO PÓ APLICADOS A NÚCLEOS DE MÁQUINAS  
ELÉTRICAS

JULIANO SOARES BARBOZA  
Engenheiro de Materiais

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia 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 obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Porto Alegre  
2009

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre 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. Lirio Schaeffer

Banca Examinadora:

---

Prof. Dr. -Ing. Paulo Wendhausen  
PGMat / UFSC

---

Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias  
ICET / Feevale

---

Prof. Dr. Eng. Marcos Telló  
Depto de Engenharia Elétrica / PUC-RS

---

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann  
Coordenador do PPGEM

“É muito melhor tentar, ainda que em vão, do que sentar sem nada fazer até o fim. Eu prefiro na chuva caminhar, que em dias tristes em casa me esconder. Prefiro ser feliz, embora tido como louco, que no conformismo viver”.

Martin Luther King, Jr.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer pela confiança em mim depositada, me orientando nesta dissertação de mestrado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, coordenado pelo Prof. Dr. -Ing. Lirio Schaeffer, pela disponibilização da infra-estrutura que utilizei durante a execução deste projeto.

Ao Prof. Dr. Eng. Moisés de Mattos Dias, pela co-orientação durante o mestrado e auxílio nas dúvidas ao longo deste período, além do incentivo durante as pesquisas e pela grande amizade neste curto período de tempo.

Aos Profs. Vicente Canalli e Marcos Telló da PUC-RS, pelo auxílio em testes realizados na PUC-RS.

Aos demais colegas do LdTM pelo auxílio quando necessário e pela amizade.

Ao GDER, um agradecimento especial aos Engs<sup>o</sup> Jorge Lewis e Luciano Cerva, pela dedicação em nossos projetos, pela parceria nos trabalhos desenvolvidos e pela grande amizade que criamos.

Aos meus familiares, por terem dado todo apoio necessário em qualquer situação e sem os quais não estaria na posição que me encontro hoje.

Ao CNPq pela bolsa de mestrado que me financiou neste período.

A todos que colaboraram de alguma forma para o desenvolvimento deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	viii
LISTA DE QUADROS E TABELAS.....	xi
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xiii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 DESEMPENHO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS.....	4
2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS.....	6
2.2.1 Propriedades Mecânicas.....	6
2.2.2 Propriedades Magnéticas.....	7
2.2.3 Propriedades Elétricas.....	8
2.3 GRANDEZAS MAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS.....	9
2.3.1 Curva de histerese.....	9
2.3.2 Magnetização.....	10
2.4 METALURGIA DO PÓ.....	12
2.4.1 Vantagens.....	14
2.4.2 Desvantagens.....	14
2.4.3 Características da matéria-prima.....	15
2.4.4 Mistura dos componentes.....	16
2.4.5 Compactação.....	17
2.4.6 Sinterização.....	18
2.5 COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS (SMC).....	19
2.5.1 Materiais Magnéticos Macios por Metalurgia do Pó.....	22
2.5.2 Processamento.....	24
2.5.3 Seleção de Materiais.....	26
2.6 RESINAS TERMOFIXAS.....	27
2.6.1 Cura e reticulação.....	29

2.6.2	Densidade de reticulação .....	29
2.6.3	Grau de cura .....	30
3.	MATERIAIS E MÉTODOS.....	31
3.1	COMPONENTE METÁLICO DAS LIGAS .....	31
3.2	RESINAS UTILIZADAS.....	32
3.2.1	Resina Fenólica HRJ-10236 .....	33
3.2.2	Resina Fenólica SBP-128 .....	33
3.2.3	Resina Fenólica SP6600 .....	34
3.2.4	Resina Fenólica SP6601 .....	34
3.3	PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS.....	35
3.3.1	Identificação e mistura de constituintes.....	35
3.3.2	Compactação das Amostras.....	35
3.3.3	Processo de Cura .....	37
3.3.4	Acabamento e densidade das amostras.....	38
3.4	ANÁLISE TÉRMICA DOS COMPÓSITOS.....	39
3.5	ENSAIOS MECÂNICOS.....	41
3.6	ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS.....	43
3.6.1	Propriedades Magnéticas .....	43
3.6.2	Propriedades Elétricas .....	48
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	49
4.1	ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA .....	50
4.2	PROPRIEDADES MECÂNICAS.....	56
4.2.1	Análise Micrográfica .....	61
4.4	PROPRIEDADES MAGNÉTICAS .....	66
4.4.1	Curva de Histerese.....	66
4.4.2	Magnetização.....	70
4.5	PROPRIEDADES ELÉTRICAS.....	72
5.	CONCLUSÕES .....	77
6.	SUGESTÕES DE CONTINUIDADE.....	78
	ANEXO - APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS ESTUDADOS .....	79
	REFERÊNCIAS .....	81

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modificação do processo de fabricação de chapas de aço laminadas para núcleos maciços por M/P.....	2
Figura 2 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético. ....	9
Figura 3 - Ciclo de histerese para material magnético duro e macio. ....	10
Figura 4 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H. ....	11
Figura 5 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial.....	11
Figura 6 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo. ....	12
Figura 7 - Etapas da metalurgia do pó [18]. ....	15
Figura 8 - Obtenção de pós por atomização [16].....	15
Figura 9 - Exemplos de pós atomizados. (a) cobre atomizado à água, (b) ferro atomizado à água, (c) alumínio atomizado à gás hélio e (d) liga de aço atomizada à gás nitrogênio [16]. ....	16
Figura 10 - Alguns tipos de misturadores. (a) cone duplo, (b) dupla concha ou “V” e (c) “Ribbon Blender” [17]. ....	17
Figura 11 - Seqüência de compactação de duplo efeito [16].....	18
Figura 12 - (a) sinterização por fase sólida, (b) sinterização por fase líquida [16]. ....	19
Figura 13 - Esquema dos componentes do núcleo por compósito magnético macio. A resina atua como material isolante e adesivo entre as partículas de ferro. ....	20
Figura 14 - Regiões aplicáveis para materiais magnéticos macios usados em campos magnéticos AC [31]. ....	21
Figura 15 - Aplicação de SMC: (a) estator de motor síncrono CC e (b) transformador desenvolvido no LdTM. ....	22
Figura 16 - Rotor de liga Fe-50Ni sinterizado.....	23
Figura 17 - Processamento de materiais magnéticos macios. ....	24
Figura 18 - Processo químico de cura de termofixos. ....	28
Figura 19 - Foto das resinas identificadas pelos nomes comerciais, sendo RA, RB, RC e RD, respectivamente. ....	34
Figura 20 - Misturador utilizado na mistura das ligas resinadas. ....	35
Figura 21 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra. ....	36

Figura 22 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra. ....	36
Figura 23 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra. ....	36
Figura 24 - Prensa utilizada para compactar as amostras e sistema para aquisição de dados. ....	37
Figura 25 - Ciclo de cura das ligas resinadas. ....	38
Figura 26 - Amostras para realização dos ensaios de caracterização das ligas. (a) forma cilíndrica, (b) forma de barra (antes e após usinagem) e (c) forma toroidal. ....	38
Figura 27 – Curva genérica TGA e sua derivada, DTG. ....	40
Figura 28 - Equipamento de termogravimetria do LaPol. ....	41
Figura 29 - Durômetro do LAFUN. ....	42
Figura 30 - Máquina Universal de Ensaio Mecânicos INSTRON. (a) Equipamento e captação de dados, (b) detalhe do dispositivo de ensaio. ....	42
Figura 31 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético. ....	43
Figura 32 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário. ....	44
Figura 33 - Traçador de Curvas de Histerese (TLMP-TCH-14). ....	47
Figura 34 - Software de aquisição de dados (GLB-BH 3.0). ....	47
Figura 35 - Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade elétrica e dispositivo para as medições. ....	49
Figura 36 - Análises de TG da liga Fe-RA. (a) RA pura curada, (b) Fe-RA0,5 e (c) Fe-RA3,0. .	51
Figura 37 - Análises de TG da liga Fe-RB. (a) RB pura curada, (b) Fe-RB0,5 e (c) Fe-RB3,0. .	53
Figura 38 - Análises de TG da liga Fe-RC. (a) RC pura curada, (b) Fe-RC0,5 e (c) Fe-RC3,0. .	54
Figura 39 - Análises de TG da liga Fe-RD. (a) RD pura curada, (b) Fe-RD0,5 e (c) Fe-RD3,0. .	56
Figura 40 - Gráfico relacionando o módulo elástico em função do teor de resina. ....	58
Figura 41 - Gráfico relacionando deformação à compressão em função do teor de resina. ....	58
Figura 42 - Gráfico relacionando Dureza Brinell em função do teor de resina. ....	59
Figura 43 - Ensaio de compressão em (a) material dúctil, deformação sem ruptura, e (b) material frágil, ruptura sem deformação lateral [52]. ....	59
Figura 44 - Amostra resinada após ensaio de compressão identificando o comportamento da fratura. ....	60
Figura 45 - Micrografias da liga Fe-RA. (a) Fe-RA0,5, (b) Fe-RA1,0, (c) Fe-RA1,5, (d) Fe-RA2,0, (e) Fe-RA2,5 e (f) Fe-RA3,0. Aumento de 100x. ....	61

Figura 46 - Micrografias da liga Fe-RB. (a) Fe-RB0,5, (b) Fe-RB1,0, (c) Fe-RB1,5, (d) Fe-RB2,0, (e) Fe-RB2,5, (f) Fe-RB3,0. Aumento de 100x. ....	62
Figura 47 - Micrografias da liga Fe-RC. (a) Fe-RC0,5, (b) Fe-RC1,0, (c) Fe-RC1,5, (d) Fe-RC2,0, (e) Fe-RC2,5, (f) Fe-RC3,0. Aumento de 100x. ....	62
Figura 48 - Micrografias da liga Fe-RD. (a) Fe-RD0,5, (b) Fe-RD1,0, (c) Fe-RD1,5, (d) Fe-RD2,0, (e) Fe-RD2,5, (f) Fe-RD3,0. Aumento de 100x.....	63
Figura 49 - Amostras para análise no MEV. Setas indicam a região analisada. ....	63
Figura 50 - Micrografias da liga Fe-RA, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.....	64
Figura 51 - Micrografias da liga Fe-RB, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina. ....	64
Figura 52 - Micrografias da liga Fe-RC, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina. ....	64
Figura 53 - Micrografias da liga Fe-RD, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.....	65
Figura 54 - Análise de composição por EDS. ....	65
Figura 55 - Curva de histerese determinada na condição quase estática e a 60Hz para ferro puro sinterizado.....	66
Figura 56 - Curvas de histerese das ligas estudadas para cada teor de resina utilizado. ....	67
Figura 57 - Indicação dos pontos de medida de $H_c$ e $B_r$ .....	68
Figura 58 - Relação da redução de perdas em função do aumento do teor de resina.....	70
Figura 59 - Curvas de magnetização e permeabilidade magnética relativa das ligas Fe-RA e Fe-RB.....	70
Figura 60 - Curvas de magnetização e permeabilidade magnética relativa das ligas Fe-RC e Fe-RD.....	71
Figura 61 - Relação de curva de magnetização, (a), com curva de permeabilidade (b), para obtenção da permeabilidade relativa das ligas estudadas.....	72
Figura 62 - Gráfico comparativo da resistividade elétrica em função do teor de resina. ....	74
Figura 63 - Relação entre a redução de perdas e o aumento da resistividade em função da adição de resina.....	75
Figura 64 - Servemotor da WEG.....	79
Figura 65 - Montagem do estator com a liga Fe-RA0,5. (a) Seguimentos do estator, (b) estator bobinado e (c) montagem na carcaça. ....	79

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Especificações técnicas da resina HRJ-10236. ....	33
Quadro 2 - Especificações técnicas da resina SBP-128. ....	33
Quadro 3 - Especificações técnicas da resina SP6600. ....	34
Quadro 4 - Especificações técnicas da resina SP6601. ....	34
Tabela 1 - Parâmetros dependentes na composição e no processo de fabricação. ....	25
Tabela 2 - Propriedades magnéticas DC para materiais por M/P. ....	27
Tabela 3 - Propriedades eletromagnéticas típicas de ligas por metalurgia do pó [16]. ....	31
Tabela 4 - Parâmetros de compactação para cada tipo de amostra. ....	37
Tabela 5 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RA. ....	39
Tabela 6 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RB. ....	39
Tabela 7 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RC. ....	39
Tabela 8 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RD. ....	39
Tabela 9 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RA para ensaio da curva de histerese. ....	45
Tabela 10 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RB para ensaio da curva de histerese. ....	45
Tabela 11 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RC para ensaio da curva de histerese. ....	46
Tabela 12 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RD para ensaio da curva de histerese. ....	46
Tabela 13 - Propriedades eletromagnéticas de interesse de ferro sinterizado. ....	49
Tabela 14 - Medidas das propriedades mecânicas do ferro sinterizado. ....	49
Tabela 15 - Medidas de Dureza Brinell das amostras estudadas. ....	57
Tabela 16 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RA. ....	57
Tabela 17 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RB. ....	57
Tabela 18 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RC. ....	57
Tabela 19 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RD. ....	57
Tabela 20 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RA. ....	67
Tabela 21 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RB. ....	67
Tabela 22 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RC. ....	68

Tabela 23 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RD.....	68
Tabela 24 - Permeabilidade relativa das ligas resinadas em função do teor de resina.....	72
Tabela 25 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RA.....	73
Tabela 26 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RB.....	73
Tabela 27 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RC.....	73
Tabela 28 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RD.....	73
Tabela 29 - Propriedades elétricas e magnéticas das ligas selecionadas com melhores propriedades.....	75

## LISTA DE SÍMBOLOS

$P_h$	Perdas por histereze	[W/kg]
$F$	Frequencia do campo aplicado	[Hz]
$W_{cmp}$	Densidade de energia armazenada no campo	[J/m <sup>3</sup> ]
$\rho_m$	Densidade do material	[kg/m <sup>3</sup> ]
$P_p$	Perdas por calor	[W/kg]
$k$	Constante de proporcionalidade	
$B$	Indução magnética	[T]
$x$	Espessura da peça	[m]
$\rho_e$	Resistividade elétrica	[ $\Omega$ .m]
$\mu_r$	Permeabilidade magnética relativa	
$B_m$	Indução de saturação ou máxima indução	[T] ou [G]
$H_c$	Coercitividade magnética ou força coercitiva	[A/m] ou [Oe]
$B_r$	Retentividade magnética ou magnetização remanente	[T] ou [G]
$I$	Corrente elétrica	[A]
$H$	Campo magnético	[A/m] ou [Oe]
$N_p$	Número de espiras no enrolamento primário	
$L$	Comprimento do circuito magnético	[mm]
$d_{ext}$	Diâmetro externo do anel	[mm]
$d_{int}$	Diâmetro interno do anel	[mm]
$R$	Resistência elétrica	[ $\Omega$ ]
$V$	Tensão	[V]
$L$	Comprimento da barra	[m]
$A$	Área da seção transversal da barra	[m <sup>2</sup> ]

## LISTA DE ABREVIATURAS

M/P	Metalurgia do Pó
SMC	<i>Soft Magnetic Composites</i> (Compósitos Magnéticos Macios)
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
LdTM	Laboratório de Transformação Mecânica - UFRGS
T <sub>g</sub>	Temperatura de transição vítrea
HRJ-10236	Nome comercial de resina fenólica - identificada como RA
SBP-128	Nome comercial de resina fenólica - identificada como RB
SP6600	Nome comercial de resina fenólica - identificada como RC
SP6601	Nome comercial de resina fenólica - identificada como RD
TG	Análise termogravimétrica
HB	Dureza Brinell
TCH	Traçador de Curva de Histerese

## RESUMO

Neste trabalho foi realizada a pesquisa, o desenvolvimento e a caracterização de compósitos magnéticos macios aplicados a núcleos de máquinas elétricas rotativas através da Metalurgia do Pó (M/P). Usualmente o núcleo (estator e rotor) de máquinas elétricas é fabricado por chapas de aço laminadas, onde este processo de fabricação demanda uma série de etapas e desperdício de material. Com a aplicação das técnicas da metalurgia do pó é possível reduzir etapas de fabricação e desperdício de matéria-prima, além da possibilidade do desenvolvimento de materiais com melhores desempenhos em sua aplicação.

Os materiais estudados são compósitos de ferro puro misturado com resina fenólica. No procedimento experimental, os compósitos são misturados, compactados e curados. Como referência utilizou-se ferro puro sinterizado e outras ligas magnéticas, materiais com suas características conhecidas e aplicadas como material magnético macio. Foram confeccionadas amostras na forma adequada para o desenvolvimento dos núcleos citados, compreendendo a avaliação de propriedades de interesse. Para caracterização dos compósitos foram feitas análises de termogravimetria, das propriedades mecânicas e análise de sua microestrutura para avaliar o comportamento da resina presente no compósito. Na avaliação do desempenho dos compósitos foram analisadas propriedades magnéticas e elétricas, que são as propriedades de interesse para aplicação como núcleo de motores elétricos.

Mecanicamente, os compósitos se comportam com base nas propriedades mecânicas da resina pura. Em relação às propriedades magnéticas, os compósitos estudados apresentam baixa indução de saturação, mas as perdas magnéticas são significativamente inferiores às referências. Os compósitos apresentam elevada resistividade elétrica, sendo um fator preponderante quanto à redução de perdas magnéticas.

## **ABSTRACT**

This work presents the research, the development and the characterization done for soft magnetic composites applied to rotative electrical machines cores through Powder Metallurgy (P/M). The core (stator and rotor) of electrical machines is usually made of laminated steel sheets, and this manufactory process demands a series of stages and waste of material. When powder metallurgy techniques are used, it is possible to reduce both the manufacturing stages and the waste of raw-material. Besides, there is the possibility of developing materials with better performance when using them.

The materials studied in this research are composites of pure iron mixed with phenolic resin. During the experiment, the composites are mixed, pressed and cured. Pure iron and other magnetic alloys were used as reference due to their well-known characteristics and applications as a soft magnetic material. Samples were manufactured in an accurate shape in order to develop the cores as mentioned before, regarding the analysis of the properties of interest. Analysis of thermogravimetry, of mechanical properties and microstructure were made with the objective of characterizing the composites concerning the behavior of the resin contained in the composite. When evaluating the composites performance, the magnetic and electrical properties were analyzed, which are the properties of interest when applied as a core of electric motors.

Mechanically, the composites behave based on the mechanical properties of the pure resin. The composites studied for this work present low saturation induction, however, the magnetic losses are significantly inferior when comparing to the references and regarding magnetic properties. The composites present high electrical resistivity, and this is the most important aspect regarding the decreasing of the magnetic losses.

## 1. INTRODUÇÃO

A busca pela qualidade na produção e, conseqüentemente, pela capacidade de competir no mercado em que se atua, é a incansável meta de todas as indústrias, independentemente de seu porte em termos de produção e de capital. Esse cenário é acompanhado pelo rápido desenvolvimento dos equipamentos voltados à automação de processos, outrora relacionados a altos investimentos, não importando o tamanho da empresa ou do processo a ser automatizado. Tais avanços trouxeram essa tecnologia ao alcance de todas as indústrias, sejam quais forem seus produtos finais.

Os motores elétricos representam uma quantia significativa desses investimentos, assim como os equipamentos para seu acionamento e controle. Isso se deve ao fato dos mesmos terem aplicações nas mais diversas áreas e atividades, como por exemplo, braços mecânicos, esteiras de transportes, desbobinadeiras de matéria prima, bobinadeiras de produtos finais (papel ou lâminas de aço, por exemplo) e sistemas de içamento, entre outros. Com o intuito de buscar alternativas àqueles produtos de empresas consagradas no mercado nacional e internacional, tão qualificados quanto os mesmos, porém a um custo acessível às pequenas aplicações, realizou-se um estudo de viabilidade de substituição do processo convencional de confecção de núcleos de máquinas elétricas rotativas pela utilização do processo de Metalurgia do Pó.

A Metalurgia do Pó é uma técnica de fabricação de componentes utilizada em diversas aplicações, onde a geometria e o tamanho do produto final fazem com que este processo seja mais econômico quando comparado a outros processos de fabricação como fundição, estampagem e usinagem.

A topologia dos núcleos magnéticos ativos das máquinas elétricas rotativas encontra-se no limite de seu aprimoramento. Usualmente, rotor e estator de máquinas elétricas são construídos por chapas laminadas de aço baixo carbono, de espessura de 0,23mm a 0,64mm. Máquinas de alto rendimento são fabricadas com aço-silício, com percentual de silício entre 1 e 3%. O processo de fabricação dos núcleos magnéticos (rotor e estator) consiste em laminação do aço, estampagem, tratamento térmico para isolamento, empacotamento e fixação. O tratamento de isolamento consiste em um tratamento térmico onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um tempo, havendo a oxidação da superfície das chapas, e conseqüente formação de uma

camada isolante de óxido de ferro entre as chapas confinadas. Este processo é uma solução utilizada para diminuir as perdas provocadas por correntes induzidas. Sob o aspecto da composição das chapas, elas representam um compromisso entre as características elétricas e magnéticas das chapas.

Atualmente estão disponíveis processos de obtenção de materiais que apresentam alta permeabilidade magnética aliada à baixa condutividade elétrica, fazendo com que perdas por correntes induzidas e histerese diminuam significativamente. Através da metalurgia do pó podem-se obter peças maciças sem necessidade de etapas como as usualmente aplicadas (Figura 1).



Estator de pacote de chapas laminadas



Estator de segmentos maciços por M/P

Figura 1 - Modificação do processo de fabricação de chapas de aço laminadas para núcleos maciços por M/P.

A partir desta constatação, é consenso entre projetistas de motores elétricos que somente o desenvolvimento e aplicação de novos materiais poderão aumentar o rendimento das máquinas. Assim, o desenvolvimento de novos materiais através dos processos da metalurgia do pó em substituição aos materiais convencionais utilizados em máquinas elétricas, deverão melhorar sua performance em pelo menos, três aspectos: diminuição das perdas com a utilização de materiais magnéticos macios de alta resistividade elétrica e alta permeabilidade magnética, na construção dos núcleos de estatores e rotores; redução no custo e etapas na produção da máquina com a manufatura de blocos únicos de estatores e rotores, dispensando assim a laminação e empacotamento das chapas; menor manutenção quando comparado às máquinas elétricas com escovas e anéis deslizantes (ou comutadores), necessários para captação de corrente para alimentação dos enrolamentos do rotor, como é o caso das máquinas síncronas trifásicas com alimentação de campo externo e as máquinas de corrente contínua.

A literatura cita núcleos maciços de motores elétricos construídos a partir dos processos de metalurgia do pó, entretanto, os dados relativos à construção destes núcleos são vagos. Obviamente isto se deve ao fato de que, tais procedimentos, têm caráter inovador, certamente com registros e pedidos de patentes. É importante salientar também que, em um futuro relativamente próximo, muitos destes núcleos magnéticos de motores (bem como de outros dispositivos eletromagnéticos como transformadores, reatores, relés, etc) serão construídos a partir dos processos da metalurgia do pó.

Neste trabalho foram desenvolvidos e caracterizados compósitos magnéticos macios aplicados a núcleos de máquinas elétricas. Usualmente construídos por chapas de aço laminadas, a fabricação destes núcleos demanda uma série de etapas em sua obtenção, sendo assim visa-se a substituição deste processo de fabricação pela aplicação das técnicas da metalurgia do pó.

Aliado à substituição do processo de fabricação está o objetivo de obter ligas com melhor desempenho em propriedades elétricas e magnéticas. Estas propriedades são o foco principal de caracterização deste estudo de materiais magnéticos macios.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 DESEMPENHO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS ROTATIVAS

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor das máquinas elétricas são construídas com chapas de aço baixo carbono. Algumas máquinas de maior rendimento ainda são construídas com chapas de aço-silício, com um percentual de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, corte, tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. No caso das chapas de aço baixo carbono, o processo para isolação consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas, e em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes [1].

As chapas são construídas a partir do ferro pois este é um material ferromagnético e apresenta alta permeabilidade magnética. Em circuitos magnéticos compostos por bobinas, núcleos de ferro e entreferro, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos, menor será o campo magnético nos núcleos, e maior será a intensidade de campo no entreferro. Nos motores, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido, é proporcional a densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, se os núcleos do estator e do rotor são construídos com materiais com maior permeabilidade magnética, o motor poderá apresentar uma melhor performance [1].

Entretanto não basta aos núcleos magnéticos possuir alta permeabilidade. Deve possuir também elevada indução de saturação, possibilitando então que a máquina trabalhe num ponto de fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação [1].

Utiliza-se aço baixo carbono, pois este é um material magnético macio e apresenta baixa coercitividade. A perda por histerese é proporcional a área do ciclo de histerese, que representa matematicamente uma densidade de energia. Portanto, quanto mais estreito o ciclo de histerese, menor a coercitividade, e menor a perda por ciclo de histerese. Perdas por histerese,  $P_h$  [W/kg], está representada pela equação 1, onde  $f$  é a frequência do campo magnético aplicado [Hz],  $W_{cmp}$

a densidade de energia armazenada no campo [ $J/m^3$ ] (área do laço de histerese) e  $\rho_m$  a densidade do material dada em [ $kg/m^3$ ] [2].

$$P_h = \frac{fW_{cmp}}{\rho_m} \quad (1)$$

Sempre que há a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas neste núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas uma vez que, esta isolação entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. A corrente induzida total, será a soma das correntes induzidas em cada chapa. Entretanto, a corrente induzida total, será consideravelmente menor, comparada a uma máquina com estator e rotor construídos com material maciço. A redução das correntes induzidas pode ser interpretada como um aumento da resistência elétrica do corpo, uma vez que são grandezas físicas inversamente proporcionais. Este efeito de redução das correntes induzidas, também pode ser obtido com um aumento da resistividade elétrica do material. Portanto, quanto maior a resistividade do material, menor serão as correntes induzidas e menores as perdas por correntes parasitas [1,2]. Devido ao efeito Joule, estas correntes parasitas geram perdas por calor,  $P_p$  [W/kg], e está representada na equação 2, onde  $k$  é uma constante de proporcionalidade (adimensional),  $B$  a indução magnética [T],  $x$  a espessura da peça [m],  $f$  a frequência do campo magnético [Hz] e  $\rho_e$  a resistividade elétrica [ $\Omega.m$ ] [3].

$$P_p = k \frac{B^2 f^2 x^2}{\rho_e} \quad (2)$$

Em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades [3]:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade ou resistência elétrica;
- Alta indução de saturação.

As perdas relativas totais num pacote de chapas são consideravelmente menores que as perdas relativas num bloco único maciço de mesmas dimensões.

Os materiais magnéticos macios mais utilizados são as ligas de aço em geral, com exceção de algumas ligas de aço inox que são paramagnéticos e apresentam a mesma permeabilidade magnética relativa do vácuo. Em geral são utilizadas na construção de motores, geradores e transformadores como núcleo de bobinas alimentadas com corrente alternada, o que induz correntes parasitas, causando apreciável perda. Por este motivo rotores e estatores de motores, bem como núcleo de transformadores são construídos com chapas de aço ferromagnético laminadas, justapostas e isoladas para restringir o fluxo de correntes parasitas e reduzir as perdas, aumentando a resistividade [4].

## **2.2 CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS MAGNÉTICOS MACIOS**

Para aplicação dos materiais magnéticos desenvolvidos, estes devem apresentar algumas propriedades físicas de interesse. Sendo assim, o desenvolvimento do material para esta aplicação segue o método de caracterização do material de acordo com os requisitos para utilização como núcleo de máquina elétrica rotativa.

### **2.2.1 Propriedades Mecânicas**

As ligas desenvolvidas devem apresentar ductilidade, dureza e resistência mecânica, necessários para suportar os esforços originados dos campos magnéticos no núcleo, bem como resistir a vibrações originadas quando a máquina estiver operando.

Para determinação das ligas a serem utilizadas no desenvolvimento dos motores, foram analisadas as propriedades mecânicas de dureza e resistência a compressão. Foram feitas análises metalográficas para verificação da morfologia da microestrutura e imperfeições microestruturais relacionando-as com o comportamento das propriedades de interesse.

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó, como propriedades magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, sendo que aqueles considerados de

maior importância no desenvolvimento estão relacionadas ao processamento do material. No caso de materiais sinterizados, a maioria dos materiais ferrosos possuem resistividade elétrica maior devido principalmente a porosidade e a oxidação superficial das partículas. Portanto é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças feitas pela metalurgia do pó, neste caso com possibilidade de aumento da propriedade com utilização de material resinado como constituinte. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade independente do tipo de material. Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e aumento da coercitividade [5-8].

Outro fator que também afeta as propriedades magnéticas é o tamanho de partícula de pó [7-9]. O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização, ou cura como é caso deste trabalho em questão, também alteram algumas propriedades físicas [10].

### **2.2.2 Propriedades Magnéticas**

Para utilização das ligas desenvolvidas para aplicação como núcleos magnéticos, estas devem apresentar algumas propriedades físicas de interesse [9-11].

#### **Elevada permeabilidade magnética ( $\mu_r$ )**

Quanto maior a permeabilidade magnética das ligas, menor o campo magnético no núcleo e maior o campo no entreferro. Em uma máquina elétrica rotativa (motor ou gerador), o entreferro (espaço compreendido entre o núcleo do rotor e estator), deve apresentar o maior campo magnético possível (mais precisamente a maior indução magnética possível). No caso de um motor elétrico, o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido na ponta de eixo pela máquina é proporcional ao fluxo magnético de entreferro (fluxo, indução e campo magnético são grandezas relacionadas e proporcionais). No caso de um gerador, a tensão induzida nos enrolamentos de armadura também é proporcional ao fluxo de entreferro. Ligas ferrosas

proporcionam alta permeabilidade magnética e baixas perdas totais, resultando em dispositivos com alta eficiência.

### **Elevada Indução de Saturação ( $B_m$ )**

Quanto maior a indução de saturação, maior será o fluxo de entreferro. A saturação magnética limita a indução, ou seja, aquela região da curva de histerese do material onde, mesmo com o aumento do campo magnético, a indução magnética pouco se altera.

### **Baixas Coercitividade ( $H_c$ ) e Retentividade ( $B_r$ )**

O ideal é a curva de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, baixas coercitividade e retentividade. A área da curva de histerese representa as perdas por ciclo de histerese em um dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada.

### **2.2.3 Propriedades Elétricas**

A liga desenvolvida deve apresentar elevada resistividade elétrica. Todo dispositivo eletromagnético alimentado com corrente alternada apresenta tensões induzidas no núcleo de ferro do dispositivo. Esta tensão induz correntes no núcleo, conhecidas por correntes parasitas ou correntes de Foucault que são responsáveis por uma apreciável perda nos núcleos destes dispositivos. Por este motivo, estes núcleos são construídos a partir de finas lâminas com espessura menor que um milímetro e isoladas eletricamente uma da outra. Isto limita e reduz as correntes induzidas, diminuindo as perdas por correntes parasitas. Outra forma de atenuar os efeitos das correntes parasitas e em consequência as perdas, é desenvolver um material que, sem perder as características magnéticas, apresente elevada resistividade elétrica [9-11].

## 2.3 GRANDEZAS MAGNÉTICAS ENVOLVIDAS NO ESTUDO DE MÁQUINAS ELÉTRICAS

### 2.3.1 Curva de histerese

Se uma peça (por exemplo cilíndrica) for colocada dentro de uma bobina (fio enrolado com várias voltas), e circular por esta bobina uma corrente elétrica  $I$ , um campo magnético  $H$  será gerado no interior desta bobina, e a peça irá sofrer uma indução magnética  $B$ .

Se o material, do qual foi obtida a peça, for diamagnético ou paramagnético, pouca linha de fluxo magnético será induzido e a relação  $B \times H$  será mais ou menos linear. Se o material for ferromagnético muitas linhas de fluxo serão induzidas (fenômeno de magnetização) e a relação  $B \times H$  será uma curva (Figura 2). Esta curva é denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. Estes materiais também são conhecidos como materiais magnéticos [12,13].

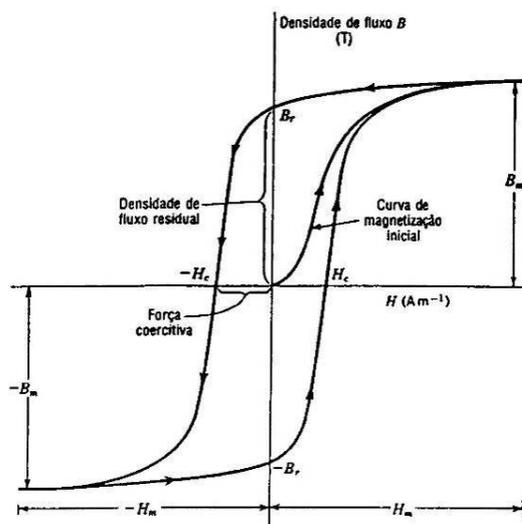


Figura 2 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético.

O ponto em que a curva corta o eixo de  $B$  no quadrante superior esquerdo é denominado de magnetismo remanente ou retentividade (quando o material foi saturado) e representa a indução magnética residual que permanece no espécime mesmo após a sua retirada de dentro da bobina, ou seja sem campo magnético aplicado ( $H = 0$ ).

O ponto em que a curva corta o eixo de H no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade (quando o material foi saturado) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ). Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético  $BH_{máx}$  que está associado com a densidade de energia armazenada no material.

A Figura 3 mostra dois ciclos de histerese, um largo que representa um material magnético duro também conhecido como ímã permanente, e um estreito que representa um material magnético macio. Os materiais magnéticos duros também são conhecidos por ímãs permanentes e devem apresentar elevada retentividade e coercitividade. Os materiais magnéticos macios são os aços magnéticos em geral (com exceção de algumas ligas de aço inox que são paramagnéticas) utilizados na construção de núcleos magnéticos, e as ferritas macias utilizadas na construção de indutores [12,13].

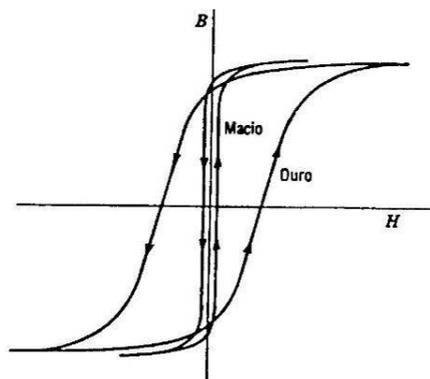


Figura 3 - Ciclo de histerese para material magnético duro e macio.

### 2.3.2 Magnetização

Uma curva típica de uma material magnético é mostrado pela curva sólida da Figura 4a. Para fins de comparação, a figura mostra quatro linhas tracejadas, correspondendo às permeabilidades relativas constantes,  $\mu$ , de 1, 10, 100 e 1000. A Figura 4b mostra um gráfico de permeabilidade relativa como função do campo H aplicado. A permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação B e H é máxima, e é designada por  $\mu_{máx}$ .

Quando  $H$  é aumentado, o valor de  $B$  aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficientes altos de  $H$  a curva tende a ficar assintótica. Esta condição é chamada de saturação magnética. Assim, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em duas seções: (1) a seção íngreme e (2) a seção plana, estando o ponto  $P$  no lugar superior da parte íngreme conforme mostra a Figura 5. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana corresponde à condição de difícil magnetização [14].

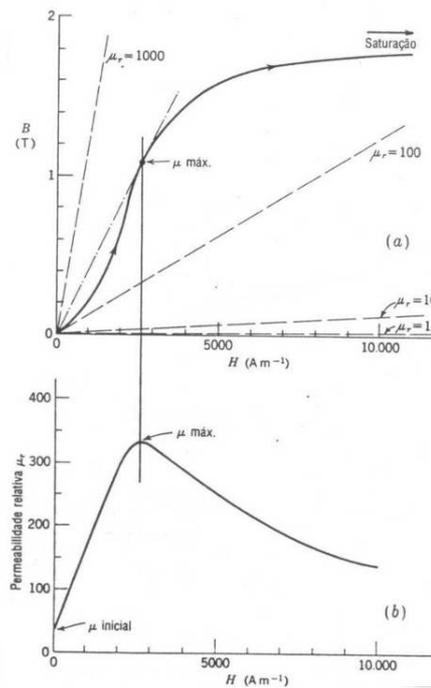


Figura 4 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado  $H$ .

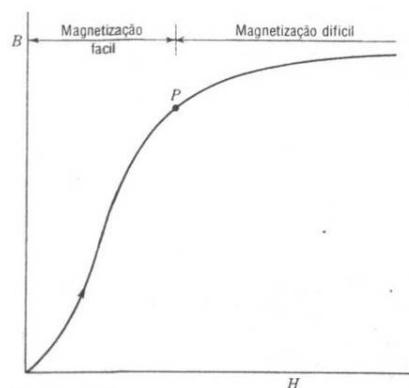


Figura 5 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial.

Para entender o fenômeno da magnetização, pode-se considerar um fragmento de um material magnético. Este fragmento, geralmente, não consiste de um único cristal ou grão, mas de agregados de grãos que por sua vez se dividem nos domínios magnéticos, de acordo com a Figura 6a. Os domínios se orientam de tal forma que a energia seja mínima, ou seja, os domínios adjacentes estão com polaridade contrária, diminuindo a energia no campo magnético, e tendo como consequência uma magnetização total nula. Com a aplicação de um campo magnético  $H$  (Figura 6b), alguns domínios com polaridade opostas ou perpendiculares ao campo aplicado, tornam-se instáveis e giram rapidamente para outro sentido de fácil magnetização, na mesma direção do campo ou bem próximo a este. Aumentando-se mais o campo aplicado (Figura 6c), todos os domínios alinham-se na direção do campo. Entretanto este aumento de magnetização é mais difícil e podem ser necessários campos muito fortes para a saturação [14].

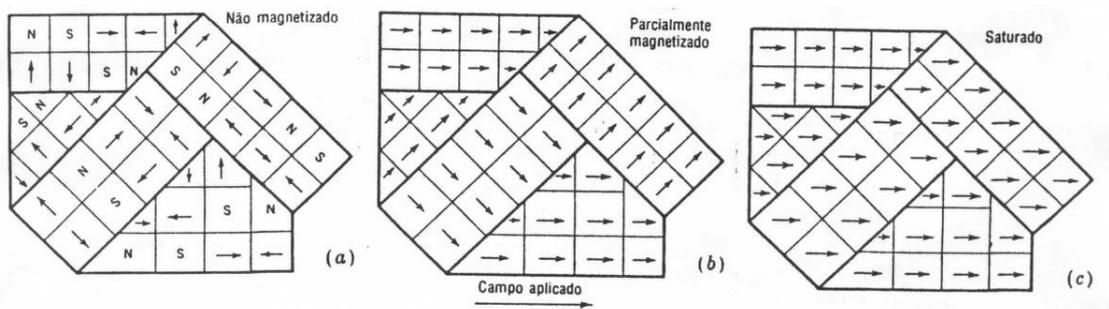


Figura 6 - Estágios sucessivos de magnetização de uma amostra policristalina com o crescimento do campo.

## 2.4 METALURGIA DO PÓ

O processo de metalurgia do pó consiste na obtenção de pó metálico e na sua transformação através de etapas importantes como compactação e tratamento de sinterização em temperaturas abaixo do ponto de fusão do metal base, resultando em produtos de alta precisão e propriedades desejadas [15-17].

A metalurgia do pó é um processo de fabricação de peças metálicas, cerâmicas ou compósitos, que se distingue dos processos metalúrgicos convencionais pelas seguintes características:

- Matéria-prima como pós metálicos e não-metálicos;

- Ausência ou presença parcial de fase líquida durante o processo de fabricação;
- Produção de peças definitivas sem necessidade de operações posteriores;
- Produção de componentes com características físicas impossíveis de obter em outro processo;
- Obtenção de peças em grande série de produção, tornando o processo altamente competitivo em relação a outros processos.

A técnica de metalurgia do pó vem sendo utilizada pelo homem a milênios, porém sob o ponto de vista industrial a obtenção de peças sinterizadas é recente, se comparada com outros processos metalúrgicos. Os principais avanços ocorreram no início do século XX, com o domínio dos processos de fabricação de pós por redução e eletrólise e a busca de uma técnica que permitisse a fabricação de peças de metais refratários de alto ponto de fusão, como o tungstênio e o molibdênio, até então limitados pelos processos existentes. Assim, os primeiros produtos que marcaram o desenvolvimento da metalurgia do pó tinham o tungstênio como metal de base, tais como o metal duro, os filamentos de lâmpadas elétricas, e os contatos elétricos.

O desenvolvimento experimentado pela metalurgia de pó nos anos 70 permitiu um avanço da tecnologia, oferecendo um melhor controle da microestrutura, homogeneidade de composição e materiais com propriedades mecânicas em níveis iguais (ou frequentemente melhores do que) aos produtos obtidos por fundição ou conformação mecânica.

Os materiais fundidos apresentam falhas resultantes das diferentes capacidades dos constituintes de se solidificarem a partir da fase líquida. No caso de produtos sinterizados a adequada mistura de pós e sinterização com transformações na fase sólida, permitem um alto grau de uniformidade do material com homogeneidade de microestrutura e conseqüentemente melhores propriedades mecânicas.

Alguns fatores econômicos contribuem para que atualmente a metalurgia do pó venha sendo utilizada em larga escala, tais como, o número reduzido de operações na produção da peça acabada, em relação a outros processos, e o aproveitamento quase total da matéria prima.

Em relação aos processos convencionais de conformação mecânica, seguem algumas vantagens e desvantagens da metalurgia do pó:

### **2.4.1 Vantagens**

- As temperaturas de sinterização utilizadas são baixas em relação a outros processos, com utilização de fornos de concepção simples com menor consumo de energia;
- O produto final possui estreita tolerância dimensional, e excelente acabamento superficial não precisando na maioria dos casos de operações finais;
- É possível produzir componentes com formas complexas, muitas vezes inacessíveis a outros processos de fabricação;
- Perfeito controle da composição química do material, podendo ser produzidos componentes de alta pureza;
- Possibilidade de obtenção de materiais com propriedades físicas e/ou químicas para os quais a metalurgia do pó é a única técnica viável de fabricação. Ex: materiais porosos, metal duro, materiais refratários;
- O processo é de alta produtividade proporcionando a fabricação de grande quantidade de bens de consumo em menor tempo, além de facilitar a automação, minimizando o custo de inspeções para controle de qualidade;
- Peças para protótipos podem ser atualmente produzidas a um custo mais baixo devido ao desenvolvimento de processo de moldagem com laser.

### **2.4.2 Desvantagens**

- A forma geométrica da peça é limitada, devendo possibilitar que seja extraída de uma matriz de compactação;
- Nos processos convencionais de compactação e sinterização o tamanho da peça é limitado, uma vez que as potências requeridas para compactação são proporcionais a sua área transversal. Algumas técnicas avançadas da metalurgia do pó em desenvolvimento já superam esse problema;
- O processo produz uma porosidade residual que deve ser eliminada, no caso de aplicações que requerem altas solicitações mecânicas.

Este processo de conformação mecânica demanda algumas etapas em sua aplicação para produção de peças (Figura 7). Na metalurgia do pó convencional usualmente existem etapas de obtenção da matéria-prima, a mistura dos componentes, a compactação do material, sinterização do compactado e possíveis etapas complementares.

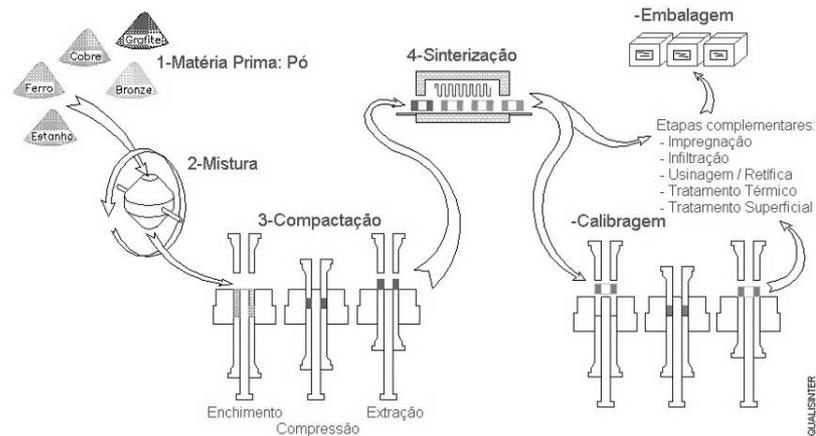


Figura 7 - Etapas da metalurgia do pó [18].

### 2.4.3 Características da matéria-prima

A obtenção dos pós é feita por uma série de processos, em função das propriedades do material (resistência mecânica, ponto de fusão e comportamento químico), e das características que a aplicação requer do mesmo. Dentre os processos mecânicos constam a quebra e moagem, atomização (Figura 8), processos químicos e termoquímicos.

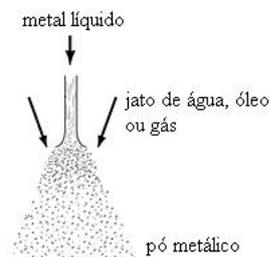


Figura 8 - Obtenção de pós por atomização [16].

Cada processo leva a um pó com um conjunto de propriedades distintas. A escolha do processo de obtenção do pó depende de características como granulometria das partículas e distribuição de tamanho, área superficial, compressibilidade, escoabilidade e densidade aparente

do pó, necessárias para obtenção do produto sinterizado com as propriedades adequadas à sua aplicação. Na Figura 9 são mostradas fotos feitas em microscópio eletrônico de pós atomizados por processos diferentes, demonstrando a forma e tamanho das partículas em diferentes tipos de atomização.

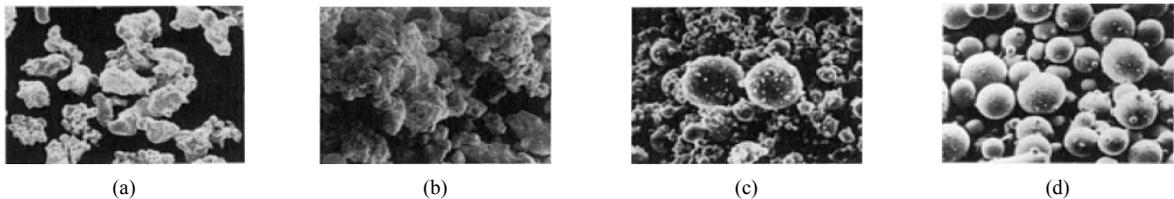


Figura 9 - Exemplos de pós atomizados. (a) cobre atomizado à água, (b) ferro atomizado à água, (c) alumínio atomizado à gás hélio e (d) liga de aço atomizada à gás nitrogênio [16].

Algumas características dos pós são importantes para o produto final. Dentre as quais, a pureza e a composição química são muito importantes, pois um nível elevado de impurezas pode alterar as propriedades do produto acabado. A composição química desejada é controlada nesta técnica. Pós de diferentes metais podem ser misturados nas proporções especificadas, podendo partir direto de pós pré-ligados, ou misturar pré-ligados com outros pós metálicos.

A forma e tamanho são as características mais importantes devido às influências na densidade aparente (do pó), na densidade a verde (do compactado), e em parâmetros de processo como velocidade de escoamento, compressibilidade e superfície aparente. A resistência do compactado decresce com o aumento do tamanho de partícula, ao passo que a densidade a verde aumenta.

#### **2.4.4 Mistura dos componentes**

Além da matéria-prima a ser misturada, há a possibilidade de utilizar um lubrificante para reduzir o atrito entre as partículas de pó e a parede da matriz. Este lubrificante atua também como um agente para reduzir a força de extração das pelotas após compactação. Em sistemas de um componente, a mistura tem função de promover uma distribuição uniforme do lubrificante na liga desejada. A mistura quando correta evita formação de aglomerados de pós. Outro parâmetro na mistura é o tempo a ser realizado, onde este deve ser controlado para promover máxima homogeneidade da mistura. A Figura 10 ilustra algumas técnicas utilizadas para mistura de pós.

Na utilização de mais componentes ligados ou compósitos, a mistura é necessária para homogeneizar as partículas além do lubrificante se utilizado. Este lubrificante é removido do compactado durante o aquecimento na etapa de sinterização.

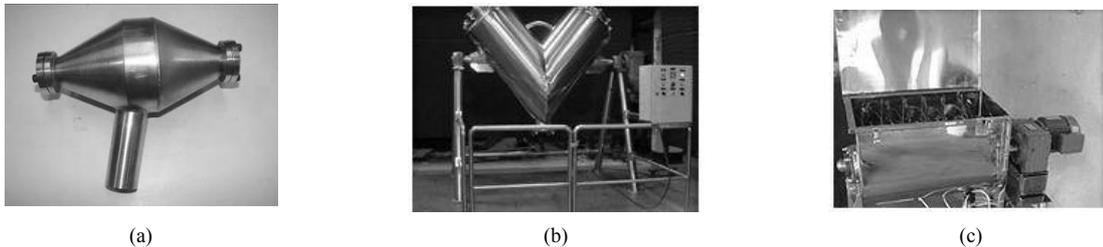


Figura 10 - Alguns tipos de misturadores. (a) cone duplo, (b) dupla concha ou “V” e (c) “*Ribbon Blender*” [17].

### 2.4.5 Compactação

Esta etapa consiste em aplicar pressão sobre a mistura de pós, consolidando o material no formato desejado. Esta é a primeira das operações de consolidação da metalurgia do pó. O objetivo é conformar o pó na forma projetada, conferindo as dimensões finais da peça e obter adequada densidade a verde do compactado e resistência mecânica necessária para manuseio posterior. Mas o fator mais importante é de proporcionar o necessário contato entre as partículas de pó, para que a operação de sinterização seja efetuada de modo mais eficiente.

A compactação é executada em prensas mecânicas ou hidráulicas, podendo ser um processo dinâmico ou em escala laboratorial. Os sistemas de compactação utilizados são: compactação unidirecional de ação simples e ação dupla, compactação isostática, laminação de pós, extrusão e forjamento de pré-formas sinterizadas. Estes sistemas podem ser empregados em regime a quente ou a frio.

Entre os parâmetros de controle do processo, a densidade a verde é a densidade da peça compactada antes de ser sinterizada. A densidade é função da pressão, composição da mistura, distribuição, tamanho e forma das partículas e uso ou não de lubrificante.

O método mais empregado é a compactação em matriz, representado pela técnica de compactação de duplo efeito (Figura 11). Este sistema é utilizado para peças de um dois níveis que devem ser pressionados com forças a partir de duas direções, produzindo peças com densidade mais uniforme.

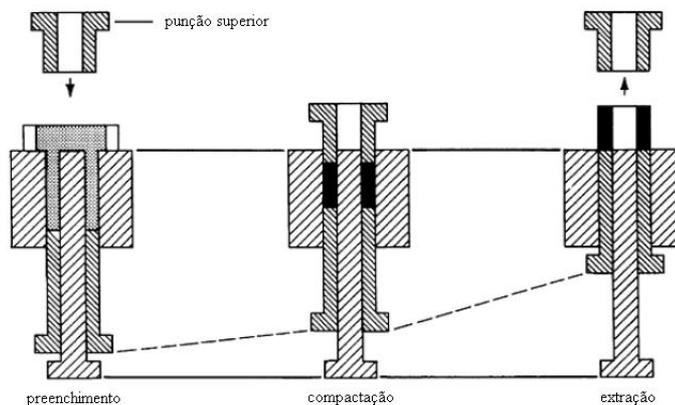


Figura 11 - Seqüência de compactação de duplo efeito [16].

#### 2.4.6 Sinterização

Após a compactação as peças passam pela sinterização. Esta é a operação fundamental da técnica de metalurgia do pó, porque constitui a fase final do ciclo de consolidação dos pós metálicos, ciclo esse iniciado com a compactação. A sinterização consiste no aquecimento do compactado verde a temperaturas elevadas, porém abaixo do ponto de fusão do metal ou do principal constituinte da liga metálica considerada. Este é submetido sob controle de tempo, temperatura e meio ambiente. Como resultado, as partículas que constituem o compactado ligam-se entre si e o material adquire as características desejadas de densidade, dureza e resistência mecânica.

A temperatura especificada de sinterização é da ordem  $2/3$  a  $3/4$  da temperatura de fusão da liga considerada.

A sinterização é tipicamente um processo de difusão no estado sólido (Figura 12a), podendo ocorrer em fase sólida e fase líquida (Figura 12b). No primeiro caso a temperatura promove a união das partículas do pó sob temperaturas abaixo do ponto de fusão do material, porém suficiente para criar um “pescoço” de ligação entre as partículas de pó. Já na ocorrência de fase líquida, sinteriza-se o material utilizando elementos com ponto de fusão diferente e o material com menor ponto de fusão se liquefaz e interconecta a partícula do outro material.



Figura 12 - (a) sinterização por fase sólida, (b) sinterização por fase líquida [16].

Na aplicação da metalurgia do pó no desenvolvimento de materiais magnéticos macios curados, a principal diferença destes compósitos (metal + resina) é que neste caso não ocorre a sinterização e sim a cura da resina que tem como finalidade agregar as partículas metálicas. Esta resina é responsável pela estabilidade mecânica da peça e pelo isolamento elétrico.

A produção de componentes magnéticos por metalurgia do pó, além de oferecer as vantagens típicas associadas à minimização de usinagem, permite obter características únicas de desempenho. Na produção de materiais magnéticos, como magneticamente macios para aplicações em máquinas elétricas e magneticamente duros para ímãs permanentes, tem sido empregada esta técnica. A metalurgia do pó permite que sejam obtidas peças com forma definitiva de usinagem e retificação, além de obter as propriedades magnéticas desejadas.

O setor de metalurgia do pó vem experimentando desenvolvimento tecnológico significativo no sentido de aperfeiçoar as propriedades dos materiais e o seu desempenho em serviço, a fim de atender indústrias altamente sofisticadas como aeroespacial, eletrônica e nuclear.

Os principais avanços incluem desde os novos processos de consolidação, as recentes técnicas para produção de pós, e superligas com propriedades superiores aquelas fabricadas pelos processos metalúrgicos tradicionais.

## 2.5 COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS (SMC)

Os chamados SMC (*Soft Magnetic Composites*), Compósitos Magnéticos Macios, têm revolucionado algumas áreas tecnológicas. Estes materiais são utilizados em eletrônicos, computadores e indústrias de telecomunicação. Durante as últimas décadas diferentes tipos de

materiais magnéticos foram desenvolvidos incluindo ligas como Fe-Ni, Fe-Ni-P, Fe-Nd-B e Fe-Si. Diferentes aspectos de processamento, propriedades, efeito de aditivos nas propriedades magnéticas e aplicações dessas ligas são discutidas por muitos pesquisadores [19-23]. Novos materiais incluindo materiais amorfos, materiais nanocristalinos e hoje compósitos magnéticos macios estão na história do desenvolvimento em materiais magnéticos [24-26].

A idéia de utilizar compósitos de ferro-resina para aplicações magnéticas não é nova. Isto existe a mais de 100 anos, mas compósitos ferro/resina são raramente usados por causa de suas propriedades, pois a tecnologia de processamento para confecção dos materiais não é suficientemente desenvolvida. Entretanto, estas limitações estão sendo superadas com o desenvolvimento de melhores matérias-primas e novas tecnologias de forma. Estes compósitos têm uma crescente aplicação em motores elétricos, substituindo os existentes materiais laminados. [27-33]. O desenvolvimento destes materiais é para promover propriedades magnéticas competitivas (boa permeabilidade magnética e indução de saturação), mas com elevada resistividade elétrica. Pós de ferro isolados (Figura 13) propõe algumas vantagens sobre aços tradicionais em algumas aplicações, por exemplo, a natureza isotrópica dos SMC's combinado com possibilidades únicas de geometria possibilitando *designs* tridimensionais [34].

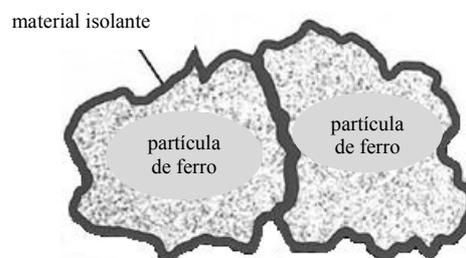


Figura 13 - Esquema dos componentes do núcleo por compósito magnético macio. A resina atua como material isolante e adesivo entre as partículas de ferro.

Nos anos recentes, efeitos do tamanho de partícula, composição das partículas (Fe-Ni, Fe-Ni-Co, Fe-Si), parâmetros de compactação (compactação a quente, pressão, lubrificante), resinas e métodos químicos úmidos para criação de camadas isolantes ao redor das partículas vem sendo estudados [35].

As propriedades exclusivas de materiais compósitos magnéticos macios incluem isotropia magnética e térmica, baixas correntes parasitas e perdas totais relativamente baixas a altas

freqüências, alta permeabilidade magnética, alta magnetização residual, alta resistividade, redução em tamanho e peso, baixa coercitividade e alta temperatura de Curie [36].

A Figura 14 mostra as regiões aplicáveis para materiais magnéticos macios usados em campos magnéticos CA. Ferrita apresenta baixas perdas totais a altas freqüências, mas devido a sua baixa densidade de fluxo magnético, requer um grande núcleo. Aços elétricos têm alta densidade de fluxo magnético, mas aços elétricos não podem ser aplicados em altas freqüências devido a excessivas perdas totais. Núcleos por metalurgia do pó são materiais magnéticos que envolvem a região onde estas duas classes de materiais não podem ser aplicadas [31].

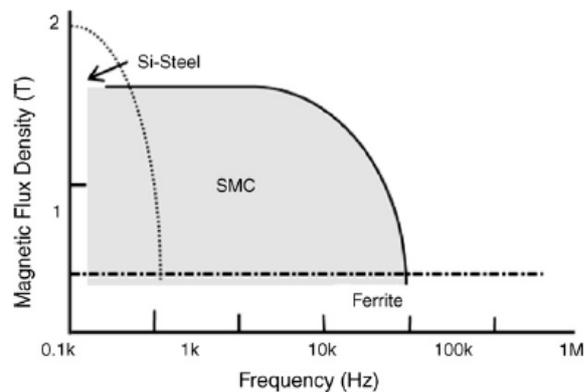


Figura 14 - Regiões aplicáveis para materiais magnéticos macios usados em campos magnéticos AC [31].

As aplicações para materiais magnéticos macios são tipicamente classificadas em aplicações CC e CA [34-39]. Aplicações CC ou corrente contínua são caracterizadas por uma aplicação constante de campo. As aplicações mais comuns são em automóveis. As características chave desta aplicação são permeabilidade, força coerciva e indução de saturação. Para aplicações CA ou corrente alternada, um campo variável é aplicado. Os materiais para circuitos eletromagnéticos CA requerem alta indução e baixas perdas por correntes parasitas. Estes são altamente influenciados pela freqüência e indução de trabalho, e também pela magnitude e densidade da resistividade elétrica do material. Os parâmetros magnéticos chave em aplicações CA são permeabilidade, saturação e perdas totais resultantes do campo magnético alternado. Contudo, a recente introdução de revestimento polimérico em pó de ferro tem aberto as portas para utilização da metalurgia do pó no desenvolvimento de materiais para aplicações CA. Esse revestimento polimérico em pó é normalmente aplicado em condição compactada, não

requerendo a sinterização. Em aplicações onde indução de saturação é o parâmetro magnético chave, este tipo de material é ideal para materiais ferrosos não ligados.

Compósitos magnéticos macios contendo pó de ferro suprem o uso em uma variedade de aplicações incluindo: design do núcleo composto com característica ferromagnética isotrópica tridimensional, núcleos em pó para suprimentos de resistência elétrica, bobina de reatância de corrente contínua, indutor ressonante, materiais sinterizados para sensores de freio anti-travante, dispositivos de acionamento eletromagnético, substituição de aços laminados em motor síncrono CC (Figura 15a), máquinas rotativas, filtros de baixa frequência, bobinas de indução de campo, sistemas de selamento magnético, transformadores (Figura 15b), aplicações em altas temperaturas e motores de pequenas aeronaves.

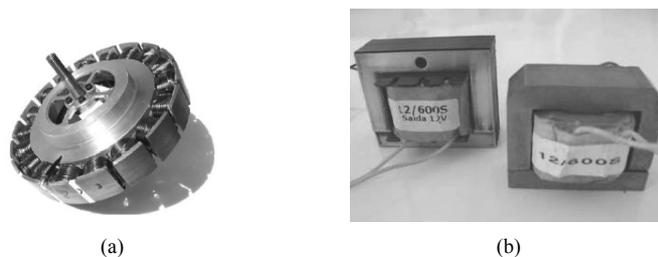


Figura 15 - Aplicação de SMC: (a) estator de motor síncrono CC e (b) transformador desenvolvido no LdTM.

Estes materiais podem ser usados em alternadores, geradores em motores elétricos, que são usados em ampla variedade de aplicações envolvendo partes em pó, como brocas, serras, dispositivos de corte e lixamento e ferramentas para jardinagem.

### **2.5.1 Materiais Magnéticos Macios por Metalurgia do Pó**

Peças de magnéticos macios produzidos por M/P podem ser amplamente divididos em núcleos magnéticos sinterizados, que são fabricados pelo processo convencional da M/P e núcleos magnéticos compactados sem o processo de sinterização.

#### **Materiais Magnéticos Macios Sinterizados**

As propriedades magnéticas de corrente contínua de compactados sinterizados são determinadas pela composição química do material e a densidade e tamanho de grão do

sinterizado. Compactados sinterizados de ferro puro exibem comparativamente alta densidade de fluxo magnético. Geralmente, a densidade de fluxo dos materiais ferrosos mostra uma forte relação com a pureza do material e a densidade do sinterizado.

Conseqüentemente, alta densidade de fluxo pode ser obtida usando pós de ferro com alta pureza e obtendo uma alta densidade do compactado através da compactação a quente. Em peças sinterizadas, adição de pequenas quantidades de fósforo ao ferro puro proporciona crescimento de grão, sendo possível de produzir compactados sinterizados com tamanho de grão grosseiro [36].

Além da composição do material e a densidade do compactado sinterizado, as propriedades magnéticas CA são também fortemente relacionadas a forma da peça. Exemplos são comandos eletromagnéticos, usados em vários tipos de motores em campo magnético CA. Perdas de núcleo ocorrem quando materiais magnéticos macios são usados em um campo magnético de corrente alternada.

Um trabalho base para este estudo é a construção de uma máquina síncrona de relutância trifásica com rotor de material magnético macio sinterizado (Figura 16). Este trabalho foi desenvolvido no LdTM da UFRGS utilizando uma liga sinterizada Fe-50Ni, onde o desempenho do protótipo construído apresentou parâmetros semelhantes aos motores de relutância trifásico com gaiola existentes.



Figura 16 - Rotor de liga Fe-50Ni sinterizado.

### **Materiais Magnéticos Macios Curados**

Núcleos em pó são feitos de partículas com aproximadamente 100 $\mu$ m em tamanho, que são isolados individualmente. Na fabricação destes núcleos, os pós metálicos são isolados com uma camada inorgânica, e o pó é misturado com uma pequena quantidade de resina orgânica como ligante. A mistura é compactada e tratada termicamente. Neste caso, a temperatura deve ser

aplicada a ponto de não destruir o isolamento inorgânico ou a resina. Isso significa que a densificação como resultado do processo de sinterização, como em material magnético sinterizado, não pode ser aplicada [36]. Portanto, alta densidade deve ser obtida no processo de compactação.

## 2.5.2 Processamento

Pós magnéticos macios são principalmente componentes de SMC's que são encobertos por uma camada isolante, Figura 13. Dependendo dos parâmetros de processamento dos materiais, uma ampla faixa de propriedades pode ser obtida.

Compósitos magnéticos macios são produzidos pela compactação tradicional de pós seguido de um tratamento térmico a baixas temperaturas, segundo ciclo da Figura 17, que não degrada a camada de material isolante envolta nas partículas de ferro. Diferentes propriedades magnéticas e mecânicas são obtidas dependendo do ligante, aditivos lubrificantes e revestimentos orgânicos nas partículas de ferro assim como compactação a quente ou a frio.

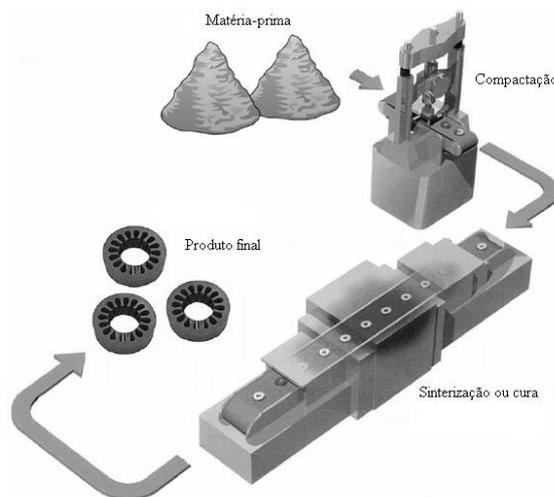


Figura 17 - Processamento de materiais magnéticos macios.

A preparação de SMC's consiste nas seguintes etapas: (a) provendo de pós com baixo carbono de um material magnético macio selecionado de um grupo consistindo de um pó atomizado essencialmente de ferro puro ou ferro pré-ligado contendo Si, Ni, Al ou Co, (b)

provendo de partículas de pó com camada eletricamente isolante, (c) mistura dos pós com material lubrificante, (d) compactação do pó e (e) aquecimento do compósito entre 400 a 700°C (de acordo com o material utilizado).

A Tabela 1 mostra as mudanças típicas de algumas propriedades dos materiais devido às variações na composição e no processo de compactação [38]. Para uma dada aplicação um acordo entre os parâmetros na tabela define a composição e o processo de fabricação para obter melhores propriedades. Em um material com um ligante a resistência aumenta com aumento da compactação enquanto o oposto ocorre em um material sem o ligante.

Tabela 1 - Parâmetros dependentes na composição e no processo de fabricação.

	I	II	III	IV	V
Permeabilidade	↑	↓	↓	↑	↑
Máxima densidade de fluxo	↑	↓	↓	↑	↑
Coercitividade	↑	-	-	↑	↓
Resistividade	↓	↑	↑	↓	↓
Condutividade térmica	↑	↓	↓	↑	↑
Resistência	↓	↓	↑	↑↓ <sup>a</sup>	↑

(I) Aumento do tamanho de partícula; (II) adição de lubrificante; (III) adição de ligante; (IV) aumento da pressão de compactação; (V) tratamento térmico.

<sup>a</sup> Em um material incluindo ligante a resistência aumenta a 200°C, devido a uma distribuição refinada do ligante, aumento adicional deteriora o ligante e a resistência diminui. Um material sem ligante (incluindo um lubrificante) mostra um aumento uniforme em resistência com aumento da temperatura.

## Compactação

Compactação a quente não é um processo econômico para produção em massa de componentes comerciais. De maneira ideal, o método de produção de maior custo efetivo é compactar o material seguido da aplicação de baixa temperatura.

Novas tecnologias de compactação estão sendo exploradas podendo eliminar o trabalho a frio dos pós de ferro. Novas técnicas de ferramental e lubrificantes são necessárias para uma redução significativa da necessidade de lubrificante pré-misturado. Geralmente dois tipos de amostras são feitas para medidas magnéticas; são toróides e vergalhão. De acordo com o teste magnético, tamanho e dimensões podem variar. A combinação de pó aquecido e alta pressão de compactação resultam no escoamento do polímero formando uma matriz contínua ao redor das partículas de ferro.

A densidade apresenta um significativo efeito na performance das peças. Alta densidade de peças por M/P apresentam alta permeabilidade e indução de saturação sem nenhuma degradação da força coerciva. Densidade e tensões residuais tem um efeito significativo nas perdas magnéticas e na performance do material. Os métodos de compactação a quente e dupla compactação aumentam a indução magnética, permeabilidade magnética e densidade e diminui as perdas de núcleo [39].

A tecnologia referenciada é baseada na fabricação de SMC's, que em seu processo de compactação são aplicadas pressões na faixa de 600MPa a 800MPa, seguido da etapa de cura do compactado [11].

### **2.5.3 Seleção de Materiais**

A escolha correta do pó metálico é diferente para magnéticos CA e CC e deve ser tratado diferentemente. Sabe-se que as propriedades magnéticas dos pós são uma função da composição química, método de fusão, processo de endurecimento e tratamento térmico. As ligas magneticamente macias devem combinar as seguintes características a um custo moderado:

- Baixas perdas de histerese;
- Baixas perdas por correntes parasitas;
- Alta permeabilidade a baixa intensidade de campo;
- Alta saturação;
- Características magnéticas uniformes.

Pós magnéticos macios ou ligas ferrosas são um dos componentes dos SMC's que são geralmente substitutos de aços elétricos laminados ou ferritas em algumas aplicações. A função mais comum destas ligas é aplicação como núcleo de transformadores.

Ferrosos ligados proporcionam alta permeabilidade magnética e baixas perdas totais de núcleo e resulta em dispositivos mais eficientes que os usando ferro puro. Adição de elementos de liga aumenta a resistividade, mas ainda com perdas, mesmo a 50 Hz. Impurezas como carbono e tensões podem ser contribuintes para perdas de histerese. A maioria dos aços laminados tem baixo teor de carbono, e muitas vezes 1 a 3% em peso de silício. Para proporcionar boa

performance magnética, essas ligas possuem baixa quantidade de carbono, nitrogênio e oxigênio. Estes contam com adições como fósforo, níquel, silício, ou cobalto para melhorar permeabilidade, força coerciva, ou indução. A Tabela 2 mostra algumas propriedades magnéticas CC de ligas feitas por M/P [40].

Tabela 2 - Propriedades magnéticas DC para materiais por M/P.

Liga	Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	Máxima permeabilidade	Força coerciva [Oe]	Máxima indução [kG]	Resistividade [μΩ.m]
Fe	6,8 - 7,2	1800 - 3500	1,5 - 2,5	10 - 13	0,10
Fe/P	6,8 - 7,4	2500 - 6000	1,2 - 2,0	10 - 14	0,30
Fe/Si	6,8 - 7,3	2000 - 6000	0,8 - 1,2	9 - 13	0,60
50 Ni/50 Fe	7,2 - 7,6	5000 - 1500	0,2 - 0,5	9 - 14	0,45

## 2.6 RESINAS TERMOFIXAS

Como o foco é desenvolver um material para aplicação como núcleo de máquinas elétricas, é preciso caracterizar o mesmo, e neste caso é importante saber que tipo de resina é utilizada e seu comportamento. No estudo em questão são utilizadas resinas termofixas que terão função de isolantes e dar estabilidade ao compósito magnético macio.

Assim como o próprio nome sugere, resinas termofixas tornam-se fixas (não fusíveis e não solúveis) como consequência das reações químicas intermoleculares de reticulação (*crosslink*) que acompanham a cura. A maioria das formulações requer calor ou irradiação para curar, o polímero resultante, caso seja apropriadamente formulado e processado, é altamente reticulado em uma rede tridimensional “infinita”. Os termofixos diferem da maioria dos outros polímeros em um ponto, seu processamento inclui a reticulação (cura). A cura de termofixos é complexa e envolve diversos passos, conforme ilustrado na Figura 18 [41]. A química da cura inicia com a formação e crescimento linear das cadeias (Figura 18a), em seguida as cadeias ramificam-se e, logo após, reticulam-se (Figura 18b). Com o andamento da reação, o crescimento da massa molar é acelerado e eventualmente diversas cadeias ligam-se formando uma rede de infinita massa molar, conforme ilustra a Figura 18c. Essa transformação abrupta e irreversível de um líquido viscoso para um gel elástico é chamado ponto gel (*gel point*). O ponto gel de um sistema de reticulação química pode ser definido como o instante no qual a massa molar média diverge para o infinito. Após o ponto gel a reação prossegue na direção de uma rede infinita com

um substancial incremento da densidade de reticulação, temperatura de transição vítrea, e propriedades físicas finais, como pode ser observado na Figura 18d.

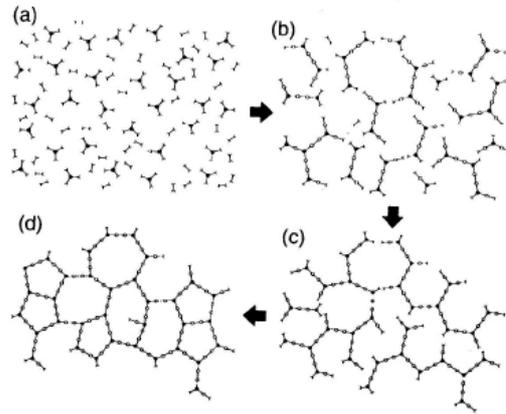


Figura 18 - Processo químico de cura de termofixos.

A principal diferença entre os polímeros termoplásticos e termofixos é a maneira como polimerizam. A polimerização de termoplásticos ocorre na maioria das vezes de forma linear enquanto que a polimerização de termofixos, também chamada de reticulação (cura), ocorre de forma tridimensional. Essa é a causa fundamental para a diferença de propriedades entre os dois tipos de materiais.

Do ponto de vista químico, a funcionalidade dos monômeros define de que forma a reticulação ocorre durante a cura. A funcionalidade indica o número de ligações que o monômero pode fazer com outras moléculas.

Os monômeros de polímeros termoplásticos têm funcionalidade igual a dois, ou seja, eles podem estar ligados a dois outros pontos reativos. Esses pontos reativos podem ser monômeros ou cadeias poliméricas. Monômeros com funcionalidade maior que dois podem prosseguir a reação após a polimerização linear haver ocorrido, eles podem formar reticulações entre as cadeias poliméricas [42].

### 2.6.1 Cura e reticulação

Reações de reticulação são aquelas responsáveis pela reticulação química de macromoléculas resultando em uma rede polimérica, sendo também conhecidas por reações de cura. A reticulação é um processo aleatório de interação entre diferentes pontos funcionais das moléculas [43].

A cura de polímeros termofixos é um processo de polimerização, sendo assim, durante a cura ocorre um aumento da massa molar média do polímero. A reação de cura é normalmente exotérmica, porém, quase sempre requer um fornecimento de energia para sua inicialização. Uma característica comum a todos os sistemas termofixos é o alto valor do calor de reação. As propriedades das resinas termofixas dependem diretamente das condições de cura utilizadas [44,45].

### 2.6.2 Densidade de reticulação

A mais importante característica geral de polímeros reticulados (termofixos) é a densidade de reticulação (*crosslink density* - XLD). A densidade de reticulação refere-se ao número de reticulações, expresso em mol, por unidade de volume para o polímero termofixo. A reticulação é o segmento de cadeia que faz a ligação entre as cadeias moleculares dos polímeros termofixos [46].

A diferença entre a funcionalidade dos monômeros tem um efeito significativo na densidade de reticulação que o polímero termofixo pode atingir. Um monômero com funcionalidade três pode formar apenas a metade das reticulações que um monômero com funcionalidade quatro.

A densidade de reticulação depende da massa molar média das moléculas da resina, da funcionalidade média e da proporção de moléculas que já reagiram. Quanto maior a densidade de reticulação, maior é a dureza, a resistência química do polímero, e sua temperatura de transição vítrea ( $T_g$ ) [46].

### 2.6.3 Grau de cura

O grau de cura é definido como a razão entre número de insaturações interligadas e o número de insaturações iniciais. Refere-se à proporção de polímero reticulado em relação à massa total. Por exemplo, um grau de cura de 90% significa que 10% da massa pode ser extraída da amostra com um solvente adequado e não fazer parte da reticulação [47].

O grau de cura representa o nível reticulação de um polímero termofixo. O grau de cura é relativo, isso significa que é necessário definir a condição do polímero não curado e do polímero totalmente curado para obter seu valor. Uma vez definidas essas condições o grau de cura e a densidade de reticulação passam a estar diretamente correlacionados. O termo “totalmente curado” descreve a máxima reticulação possível de atingir na prática [47].

A caracterização do comportamento de cura possibilita diferenciar a cura completa da cura ideal. Sistemas termofixos de cura completa são aqueles onde a reação de reticulação atinge 100% de conversão fornecendo as propriedades intrínsecas ao material. Por outro lado, sistemas termofixos de cura ideal são aqueles onde a reação de reticulação não atinge 100% de conversão, mas, mesmo assim, suas propriedades são satisfatórias. Na prática, as resinas são normalmente definidas como sistemas termofixos ideais [45].

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 COMPONENTE METÁLICO DAS LIGAS

Para a compactação com material resinado é necessário um material metálico puro ou uma liga pré-ligada. Isto se deve ao fato de que no processo em questão a cura da mistura não iria difundir os metais no caso de se utilizar dois ou mais pós metálicos diferentes na mistura além da resina [48,49]. A escolha correta do pó é quesito importante para a pesquisa. É comum que as propriedades magnéticas dos pós sejam relacionadas com a composição química da liga e posterior tratamento térmico.

Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável principalmente para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido a sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidade altas, e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicação de corrente contínua [16].

Tabela 3 - Propriedades eletromagnéticas típicas de ligas por metalurgia do pó [16].

Liga	Resistividade [ $\mu\Omega.m$ ]	Magnetização máxima $B_{m\acute{a}x}$ [T]	Magnetização remanente $B_r$ [T]	Força coerciva [Oe]	Máxima permeabilidade
410L	0,9	1,2	4,1	3,5	960
430L	0,93	1,1	4,8	2,7	630
434L	1,04	1,1	5,7	2,3	1300
Fe	0,2	1,6	1,2	1,4	4000
Fe-49Co-2V	0,4	2,0	5,6	3,0	3000
Fe-50Co	0,6	1,7	0,56	2,0	2000
Fe-5Mo	-	1,6	1,3	1,8	2900
Fe-2Ni	0,15	1,5	1,2	1,0	-
Fe-50Ni	0,4	1,3	0,9	0,3	25000
Fe-0,45P	0,21	1,4	1,2	1,1	4000
Fe-0,8P	0,23	1,8	1,3	0,4	6100
Fe-3Si	0,45	1,4	1,3	0,9	4500
Fe-6,5Si	0,81	1,3	1,2	0,3	4000

Devido às dificuldades na obtenção ou aquisição de ligas pré-ligadas, conforme aquelas citadas na Tabela 3, optou-se por um estudo das ligas resinadas somente a partir do ferro puro, com variação do percentual das resinas. Importante salientar que, as ligas resinadas não passam

por processo de sinterização, mas somente de cura da resina que, nesta aplicação, serve para adesão das partículas de pó e isolamento elétrica entre as partículas, reduzindo as correntes parasitas.

Na sinterização, as ligas são obtidas a partir dos pós constituintes, compactação e sinterização. O processo da formação da liga ocorre na sinterização. No processo de obtenção de peças resinadas, não ocorrendo sinterização, não ocorre a formação de ligas. Portanto, os pós a serem utilizados neste processo já devem ser a liga propriamente dita, que pode ser obtida por fundição e posterior transformação em pós, ou por outro processo conhecido por Mecano Síntese (*Mechanical Alloying*), onde os pós constituintes da liga são colocados em moinho atritor de alta velocidade e por impactos mecânicos, ocorrendo a formação da liga já na forma de pó.

### **3.2 RESINAS UTILIZADAS**

Segundo dados de fabricantes, existem muitos tipos de resinas para estas aplicações, ou seja, misturadas a pós metálicos ou cerâmicos e após, curadas, onde existem as seguintes variações:

- Temperatura de cura
- Temperatura de utilização
- Dureza
- Ductilidade
- Resistividade elétrica
- Resistência a vibração

Entre os materiais poliméricos utilizados temos resinas termofixas fenólicas adquiridas por fornecedores sendo as seguintes descritas.

### 3.2.1 Resina Fenólica HRJ-10236

Esta é uma resina fenólica modificada em pó, tipo Novolaca, que contém hexametilenotetramina. É indicada principalmente para fabricação de pastilhas de freios, lonas pesadas ou leves e discos de embreagem. A resina HRJ-10236 proporciona médio coeficiente de atrito ao material de fricção, com boa estabilidade térmica e baixo “*fading*” (perda de atrito). Os demais itens, como resistência mecânica, desgaste e recuperação de atrito, são considerados bons. Na área de materiais abrasivos, a HRJ-10236 é utilizada em discos de corte e rebolos em geral. Outra aplicação para esta resina é na área de confecção do disco de alumínio em pó prensado para discos diamantados. Neste trabalho a resina é identificada como “RA”.

Quadro 1 - Especificações técnicas da resina HRJ-10236.

Fluxo à 125°C	20 - 45 mm
Cura à 154°C	50 - 90 s
Teor de Hexa	7,5 - 8,5 %
Granulometria (M#20)	mín. 97%

### 3.2.2 Resina Fenólica SBP-128

SBP-128 é uma resina fenólica em pó, tipo Novolaca, que contém hexametilenotetramina. É indicada principalmente para promover dureza, resistência mecânica e melhoria na resistência à abrasão em diversos tipos de elastômeros sintéticos e naturais, utilizados em compostos de cilindros, correias, protetores de borracha para barcos, amortecedores para absorver impacto de pontes na área da construção civil e outros tipos de artefatos de borracha. SBP-128 é recomendada ainda na produção de coletores de motores, materiais de fricção com amianto, como pastilhas de freio e lonas pesadas. Na fabricação de coletores de motores a SBP-128 pode ser aplicada por via úmida, devendo ser dissolvida em alcoóis. Na fabricação de materiais de fricção ou coletores pode ser aplicada por via seca num misturador para homogeneizar a resina, fibras em gerais e cargas inorgânicas. Esta resina é identificada como “RB”.

Quadro 2 - Especificações técnicas da resina SBP-128.

Fluxo à 125°C	15 - 40 mm
Cura à 154°C	30 - 65 s
Teor de Hexa	8,5 - 9,5 %
Granulometria (M#20)	mín. 97%

### 3.2.3 Resina Fenólica SP6600

É uma resina fenólica modificada com óleos em pó, tipo Novalaca que contém hexametileno-tetramina. Indicada principalmente para fabricação de pastilhas de freio, lonas leves para automóveis, lonas pesadas para ônibus e caminhões e discos de embreagem. A resina é identificada como “RC”.

Quadro 3 - Especificações técnicas da resina SP6600.

Fluxo à 125°C	30 - 60 mm
Cura à 154°C	15 - 30 s
Teor de Hexa	6,9 - 7,9 %
Granulometria (M#20)	mín. 97%

### 3.2.4 Resina Fenólica SP6601

É uma resina fenólica modificada em pó, termofixa, que contém hexametileno-tetramina. Indicada para promover dureza, resistência mecânica e melhoria na resistência à abrasão em diversos tipos de elastômeros sintéticos e naturais, utilizados em compostos de pneus, cilindros, correias, solados de sapatos e outros tipos de artefatos de borracha. Neste trabalho a resina é identificada como “RD”.

Quadro 4 - Especificações técnicas da resina SP6601.

Teor de Hexa	7,5 - 8,5 %
Teor de cinzas	máx. 1,0%
Solubilidade em acetona	mín. 98,5%
Granulometria (M#20)	mín. 99,9%

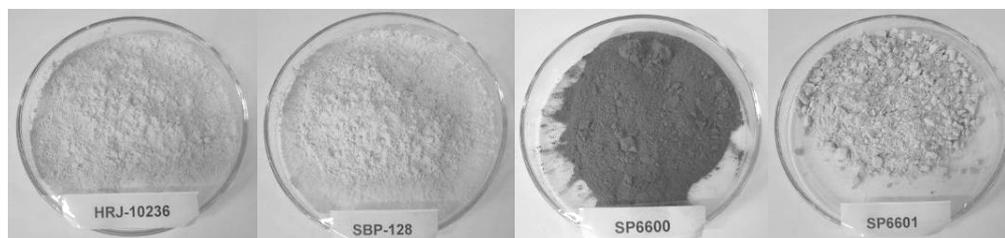


Figura 19 - Foto das resinas identificadas pelos nomes comerciais, sendo RA, RB, RC e RD, respectivamente.

### 3.3 PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS

#### 3.3.1 Identificação e mistura de constituintes

Para caracterização das propriedades eletromagnéticas, propriedades mecânicas, análise metalográfica e análises térmicas das amostras, foram elaboradas misturas para a realização dos ensaios, sendo que esta preparação parte da mistura de pó metálico com resina, compactação da mistura e em seguida a cura do compactado.

Para obtenção das amostras, os pós foram misturados nas devidas proporções das resinas em percentuais com a nomenclatura Fe-RA $_{xx}$ , Fe-RB $_{xx}$ , Fe-RC $_{xx}$  e Fe-RD $_{xx}$ , onde  $xx$  representa os percentuais em peso de 0,5%; 1,0%; 1,5%; 2,0%; 2,5% e 3,0%. Foi utilizado um misturador convencional tipo cone duplo (Figura 20), com tempo de mistura de 20 minutos.

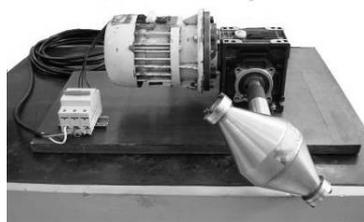


Figura 20 - Misturador utilizado na mistura das ligas resinadas.

#### 3.3.2 Compactação das Amostras

Para avaliação das propriedades, três formas de amostras foram elaboradas, e em conseqüência matrizes devem ser construídas. Cada tipo de amostra tem sua finalidade, e os seus respectivos ensaios estão relacionados nos seguintes itens.

### Amostra na forma de cilindro

Esta amostra é utilizada para avaliação das propriedades mecânicas e micrografia.



Figura 21 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra.

### Amostra na forma toroidal

Esta amostra é utilizada para medição das propriedades magnéticas.



Figura 22 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra.

### Amostra na forma de barra

Esta amostra é utilizada para medição da resistividade elétrica.



Figura 23 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra.

As amostras foram compactados a uma pressão de 600 MPa, onde  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ . Considerando que 1 ton é aproximadamente 10 kN, e as áreas das matrizes, a Tabela 4 descreve as pressões de compactação para cada amostra.

Tabela 4 - Parâmetros de compactação para cada tipo de amostra.

Amostra	Área (mm <sup>2</sup> )	Força (kN)
Cilindro	41	24
Barra	145	85
Toróide	393	231

A compactação das amostras foram feitas em uma prensa hidráulica manual, marca BOVENAU P30ST (Figura 24) com capacidade de 300 kN. Esta prensa possui manômetro de indicação de pressão em toneladas e é adaptada uma célula de carga para captação de dados através do software *CatMan Express 3.1*.



Figura 24 - Prensa utilizada para compactar as amostras e sistema para aquisição de dados.

### 3.3.3 Processo de Cura

O processo de cura foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. De acordo com o fabricante das resinas, sem informações detalhadas de cada etapa, para uma boa cura das resinas esta deve consistir de pré-cura até 90°C com patamar por 2 minutos, e posteriores aquecimentos a 155 °C e 220 °C, ambos com patamar de 2 minutos, como segue no ciclo térmico da Figura 25. As amostras (Figura 26) passam por um acabamento dimensional necessário a realização dos ensaios.

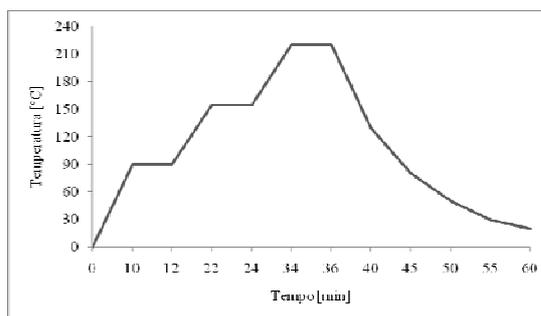


Figura 25 - Ciclo de cura das ligas resinadas.

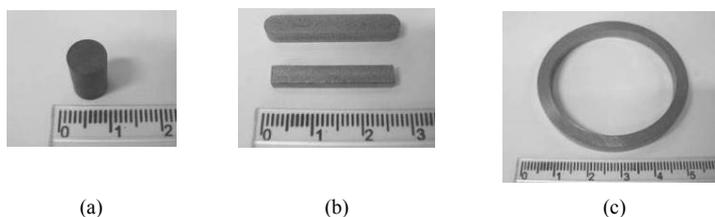


Figura 26 - Amostras para realização dos ensaios de caracterização das ligas. (a) forma cilíndrica, (b) forma de barra (antes e após usinagem) e (c) forma toroidal.

### 3.3.4 Acabamento e densidade das amostras

Devido ao tamanho médio relativamente reduzido, juntamente requer um procedimento e precauções especiais, diferentes dos fundidos e usinados. Considerando-se as propriedades inerentes, a peça em pó demanda considerações especiais em cerca de todas as operações secundárias, principalmente limpeza e rebarbação.

Nas Tabela 5 a 8 seguem os dados referentes às amostras elaboradas, com composição e dados relevantes para a caracterização das amostras como densidade antes da cura (densidade verde) e após cura (densidade curada). As medidas de densidade foram feitas a temperatura ambiente pela relação entre massa e volume das amostras. Os cálculos foram feitos através das medidas dimensionais das amostras cilíndricas, considerando as mesmas condições de preparo para as demais amostras.

Tabela 5 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RA.

Amostra	Altura [mm]		Diâmetro [mm]		Volume [mm <sup>3</sup> ]		Massa [g]		Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	
	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada
Fe-RA0,5	9,10	9,07	7,15	7,16	365,72	365,18	2,42	2,42	6,62	6,62
Fe-RA1,0	8,94	8,91	7,16	7,16	360,08	359,01	2,39	2,38	6,63	6,65
Fe-RA1,5	10,60	10,56	7,15	7,16	425,46	425,17	2,82	2,82	6,63	6,63
Fe-RA2,0	8,50	8,44	7,15	7,16	341,41	339,82	2,21	2,21	6,48	6,50
Fe-RA2,5	11,20	11,18	7,15	7,16	449,55	450,00	2,85	2,85	6,34	6,33
Fe-RA3,0	10,17	10,12	7,15	7,16	408,46	407,72	2,56	2,56	6,28	6,29

Tabela 6 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RB.

Amostra	Altura [mm]		Diâmetro [mm]		Volume [mm <sup>3</sup> ]		Massa [g]		Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	
	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada
Fe-RB0,5	9,57	9,58	7,13	7,16	382,09	386,18	2,62	2,61	6,87	6,76
Fe-RB1,0	8,97	8,99	7,13	7,16	358,40	362,90	2,43	2,43	6,79	6,70
Fe-RB1,5	9,42	9,42	7,13	7,17	376,37	380,60	2,50	2,50	6,65	6,58
Fe-RB2,0	9,27	9,31	7,13	7,17	370,24	376,16	2,43	2,43	6,57	6,48
Fe-RB2,5	8,97	9,00	7,13	7,17	358,13	363,37	2,33	2,33	6,52	6,42
Fe-RB3,0	9,09	9,13	7,13	7,18	362,93	369,77	2,32	2,32	6,39	6,27

Tabela 7 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RC.

Amostra	Altura [mm]		Diâmetro [mm]		Volume [mm <sup>3</sup> ]		Massa [g]		Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	
	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada
Fe-RC0,5	9,43	9,37	7,15	7,10	378,75	371,58	2,59	2,59	6,84	6,98
Fe-RC1,0	9,62	9,52	7,15	7,10	386,11	377,51	2,61	2,61	6,76	6,91
Fe-RC1,5	9,13	9,03	7,15	7,10	366,44	357,63	2,44	2,43	6,65	6,81
Fe-RC2,0	9,18	9,10	7,15	7,10	368,71	360,27	2,47	2,47	6,70	6,85
Fe-RC2,5	9,64	9,55	7,15	7,10	387,05	378,71	2,52	2,52	6,53	6,67
Fe-RC3,0	9,15	9,07	7,15	7,10	367,51	359,09	2,35	2,35	6,39	6,54

Tabela 8 - Medidas dimensionais e de densidade das amostras da liga Fe-RD.

Amostra	Altura [mm]		Diâmetro [mm]		Volume [mm <sup>3</sup> ]		Massa [g]		Densidade [g/cm <sup>3</sup> ]	
	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada	verde	curada
Fe-RD0,5	9,50	9,46	7,15	7,14	381,56	378,89	2,66	2,66	6,98	7,02
Fe-RD1,0	9,32	9,31	7,15	7,14	374,33	372,75	2,58	2,58	6,89	6,92
Fe-RD1,5	9,20	9,19	7,15	7,14	369,65	368,21	2,51	2,51	6,78	6,81
Fe-RD2,0	9,05	9,03	7,15	7,14	363,63	361,54	2,43	2,43	6,69	6,73
Fe-RD2,5	8,85	8,84	7,15	7,14	355,60	354,07	2,35	2,35	6,61	6,64
Fe-RD3,0	8,86	8,85	7,15	7,14	355,86	354,33	2,30	2,30	6,48	6,51

### 3.4 ANÁLISE TÉRMICA DOS COMPÓSITOS

Análise térmica é um termo que abrange um grupo de técnicas nas quais uma propriedade física ou química de uma substância, ou de seus produtos de reação, é monitorada em função do tempo ou temperatura, enquanto a temperatura da amostra, sob uma atmosfera específica, é

submetida a uma programação controlada. A análise térmica tem seu campo de atuação voltado ao estudo de: processos como catálises e corrosões, propriedades térmicas e mecânicas como expansão térmica e amolecimento, diagramas de fase e transformações.

O objetivo de fazer análise térmica por TG é verificar se durante o ciclo de cura utilizado não fez com que a resina se degradasse ou se a mesma não obteve sua cura ideal. Através das curvas de TG é feita uma comparação entre a resina pura curada com a amostra de resina misturada com o pó metálico, onde neste caso só foi feita análise das amostras com 0,5% e 3,0% de resina, pois todas as amostras foram curadas sob mesmas condições evitando também aumento de custo operador/máquina e tempo. Neste caso, como o teor de resina aplicado é muito baixo, durante a análise térmica haverá influência da oxidação do ferro.

Termogravimetria é a técnica na qual a mudança da massa de uma substância é medida em função da temperatura enquanto esta é submetida a uma programação controlada. Tipicamente curvas TGA e sua derivada (DTG) são apresentadas como na Figura 27.

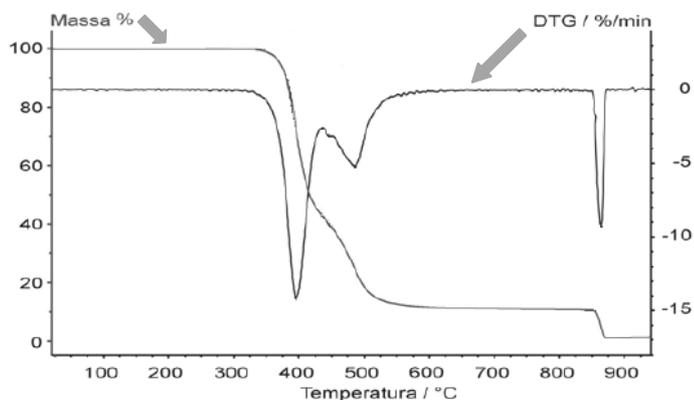


Figura 27 – Curva genérica TGA e sua derivada, DTG.

A ordenada é apresentada usualmente em percentual de massa (wt%). É preciso deixar claro que existem mudanças significativas, particularmente na temperatura da amostra, que podem refletir na curva TGA quando a massa inicial é significativamente variada entre experimentos.

O equipamento utilizado na análise termogravimétrica é basicamente constituído por uma microbalança, um forno, termopares e um sistema de fluxo de gás. A Figura 28 apresenta o

equipamento utilizado neste trabalho, localizado no LaPol (Laboratório de Materiais Poliméricos da UFRGS). Este ensaio segue a norma ASTM E 1131 (*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*).



Figura 28 - Equipamento de termogravimetria do LaPol.

### 3.5 ENSAIOS MECÂNICOS

Os ensaios mecânicos são realizados pela aplicação, em um material, de um dos tipos de esforços possíveis (tração, compressão, flexão, torção, cisalhamento e pressão interna), para determinar a resistência do material a cada um desses esforços.

A escolha do ensaio mecânico mais interessante ou mais adequado para cada produto metálico depende da finalidade do material, dos tipos de esforços que esse material vai sofrer e das propriedades mecânicas que se deseja medir. Em geral, existem especificações para todo o tipo de produto fabricado e nestas especificações constam os ensaios mecânicos que devem ser realizados para saber se tal produto está em conformidade com a finalidade proposta.

Além de propriedades eletromagnéticas, para serem utilizadas em núcleo de motores elétricos, as ligas devem ser analisadas segundo suas propriedades mecânicas em virtude de sua aplicação e a necessidade de suportar os esforços gerados quando a máquina estiver operando.

Nesta etapa as amostras foram submetidas a ensaios de Dureza Brinell e Compressão. O ensaio de Dureza Brinell foi submetido em um durômetro, utilizando endentador tipo esfera de 2,5 mm de diâmetro e carga de 3000 kgf (Figura 29), localizado no LAFUN (Laboratório de

Fundição da UFRGS). Este ensaio segue a norma ASTM E 10 (*Standard Test Methods for Brinell Hardness of Metallic Materials*).



Figura 29 - Durômetro do LAFUN.

Os ensaios de compressão foram realizados em um Equipamento Universal de Ensaios Mecânicos, marca INSTRON, localizado no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS) (Figura 30). Como parâmetro de controle do ensaio, a velocidade utilizada foi 1,5 mm/min. A norma referência é ASTM E9 (*Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*).



(a)



(b)

Figura 30 - Máquina Universal de Ensaios Mecânicos INSTRON. (a) Equipamento e captura de dados, (b) detalhe do dispositivo de ensaio.

Como parte de avaliação microestrutural das amostras são feitas análises metalográficas para verificar o comportamento dos constituintes do material desenvolvido. Há a possibilidade de fazer relações entre a microestrutura e as propriedades de interesse.

## 3.6 ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS

### 3.6.1 Propriedades Magnéticas

As propriedades magnéticas de indução de saturação, permeabilidade magnética relativa, coercitividade e retentividade são analisadas a partir da curva de histerese. Esta curva relaciona campo magnético,  $H$ , aplicado a um material com indução magnética,  $B$ , resultante. Para os materiais magnéticos de interesse deste trabalho, a relação  $B \times H$  tem as características mostradas na Figura 31.

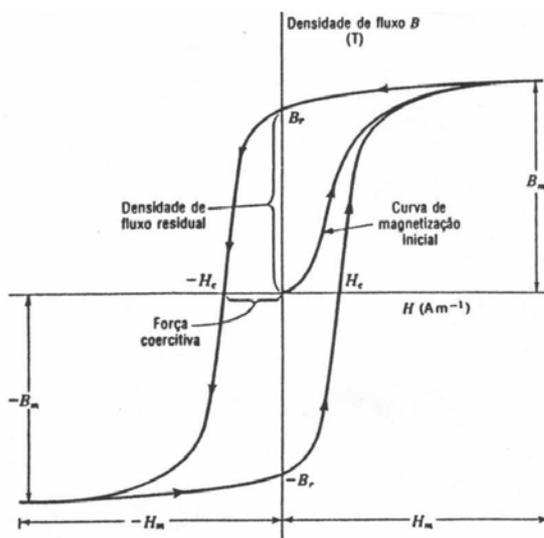


Figura 31 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético.

O ponto em que a curva corta o eixo de  $B$ , no quadrante superior esquerdo, é denominado de magnetismo remanente ou retentividade ( $B_r$ ) e representa a indução magnética residual que permanece no espécime após a retirada do campo magnético aplicado ( $H = 0$ ). No sistema MKS de unidades, a indução  $B$  é dada em Tesla [T] e no sistema CGS de unidades (mais utilizados para caracterização de materiais magnéticos),  $B$  é dado em Gauss [G]. O ponto em que a curva corta o eixo de  $H$  no mesmo quadrante é denominado de força coercitiva ou coercitividade ( $H_c$ ) e representa o campo magnético necessário para desmagnetizar o espécime ( $B = 0$ ).

No sistema MKS de unidades, o campo  $H$  é dado em Ampère/metro [A/m] e no sistema CGS  $H$  tem como unidade o Oersted [Oe]. A permeabilidade magnética relativa ( $\mu_r$ ) está relacionada com o ponto de maior declividade da curva de histerese. A indução de saturação ( $B_{max}$ ) pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula. [8,9].

Esta etapa de caracterização das propriedades magnéticas foi realizada pela obtenção de curvas de histerese das amostras estudadas e da referência (ferro puro sinterizado). O método utilizado segue a norma ASTM A773 (*Standard Test Method for dc Magnetic Properties of Materials Using Ring and Permeameter Procedures with dc Electronic Hysteresigraphs*). Este método fornece o procedimento de obtenção de curvas de histerese através de um Traçador de Curvas de Histerese Magnética, modelo *TLMP-TCH-14*, para determinação de propriedades magnéticas básicas dos materiais na forma de anel (toróide).

Para aplicação deste método é necessária a preparação de amostras, que consiste na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Roland (Figura 32). O procedimento consiste em: isolar o anel com filme plástico para evitar descascamento do fio esmaltado, enrolamento de espiras secundárias e novo isolamento seguido do enrolamento das espiras primárias.



Figura 32 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento secundário, (c) isolamento e (d) enrolamento do primário.

Entre os parâmetros de controle para as medições das propriedades magnéticas, são necessárias algumas medidas da amostra durante sua preparação, que constam nas tabelas a seguir onde estão relacionados os parâmetros das amostras medidas. Entre estes é preciso calcular a densidades de espiras no enrolamento primário, sendo obtido pela equação 3. Os enrolamentos foram padronizados para 270 espiras no secundário e 160 espiras no primário.

$$Dens.esp. = \frac{Np}{L} = \frac{Np}{\frac{\pi(d_{ext} + d_{int})}{2}} \quad (3)$$

Onde,  $Np$ , número de espiras no enrolamento primário,  $L$ , comprimento do circuito magnético [mm],  $d_{ext}$ , diâmetro externo do anel [mm] e  $d_{int}$ , diâmetro interno do anel [mm].

Tabela 9 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RA para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de espiras no primário [N <sub>p</sub> /m]	Número de espiras no secundário
Fe-RA0,5	a	1,95	6620	1106	270
	b	1,99		1108	
	c	1,88		1107	
Fe-RA1,0	a	1,85	6650	1106	270
	b	1,92		1106	
	c	2,02		1105	
Fe-RA1,5	a	2,05	6630	1105	270
	b	2,11		1105	
	c	2,11		1105	
Fe-RA2,0	a	1,74	6500	1107	270
	b	1,93		1108	
	c	1,80		1107	
Fe-RA2,5	a	1,87	6330	1108	270
	b	1,99		1107	
	c	1,85		1107	
Fe-RA3,0	a	1,60	6290	1105	270
	b	2,01		1105	
	c	1,97		1106	

Tabela 10 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RB para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de espiras no primário [N <sub>p</sub> /m]	Número de espiras no secundário
Fe-RB0,5	a	2,04	6760	1106	270
	b	1,94		1107	
	c	2,00		1106	
Fe-RB1,0	a	2,03	6700	1106	270
	b	2,01		1106	
	c	2,07		1107	
Fe-RB1,5	a	2,03	6580	1106	270
	b	1,97		1107	
	c	1,85		1106	
Fe-RB2,0	a	1,93	6480	1107	270
	b	1,97		1106	
	c	1,89		1106	
Fe-RB2,5	a	2,01	6420	1106	270
	b	1,91		1106	
	c	1,84		1106	
Fe-RB3,0	a	1,67	6270	1106	270
	b	1,93		1104	
	c	1,94		1106	

Tabela 11 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RC para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de espiras no primário [N <sub>p</sub> /m]	Número de espiras no secundário
Fe-RC0,5	a	2,03	6980	1107	270
	b	2,06		1106	
	c	1,86		1106	
Fe-RC1,0	a	2,03	6910	1109	270
	b	2,00		1107	
	c	2,05		1107	
Fe-RC1,5	a	1,99	6810	1109	270
	b	1,94		1108	
	c	1,97		1107	
Fe-RC2,0	a	1,97	6850	1106	270
	b	2,12		1105	
	c	2,06		1106	
Fe-RC2,5	a	1,89	6670	1106	270
	b	2,04		1106	
	c	1,95		1107	
Fe-RC3,0	a	1,89	6540	1110	270
	b	1,92		1106	
	c	2,09		1107	

Tabela 12 - Parâmetros de medida das amostras da liga Fe-RD para ensaio da curva de histerese.

Amostra		Área da seção $\times 10^{-5}$ [m <sup>2</sup> ]	Densidade [kg/m <sup>3</sup> ]	Densidade de espiras no primário [N <sub>p</sub> /m]	Número de espiras no secundário
Fe-RD0,5	a	2,06	7020	1108	270
	b	2,13		1106	
	c	2,09		1106	
Fe-RD1,0	a	2,06	6920	1108	270
	b	2,07		1109	
	c	2,12		1108	
Fe-RD1,5	a	2,05	6810	1107	270
	b	2,12		1108	
	c	2,04		1109	
Fe-RD2,0	a	2,13	6730	1104	270
	b	2,04		1106	
	c	2,12		1105	
Fe-RD2,5	a	2,04	6640	1107	270
	b	2,10		1106	
	c	2,00		1106	
Fe-RD3,0	a	2,06	6510	1106	270
	b	2,15		1106	
	c	2,03		1109	

Os resultados são obtidos pela média entre as três medidas “a”, “b” e “c” de cada amostra.

O TCH é constituído por um amplificador de corrente capaz de magnetizar pequenas amostras mantendo o campo magnetizante senoidal. Um resistor “*shunt*” fornece uma tensão

proporcional à corrente elétrica no enrolamento primário que permite estimar o campo magnetizante  $H$ . Um circuito integrador permite gerar um sinal proporcional à indução magnética  $B$ . O TCH também permite o registro da curva de histerese, da curva de magnetização e estimativa das perdas magnéticas de amostras maiores utilizando fontes externas de magnetização. Um enrolamento secundário isolado deve ser providenciado para realizar a medida da indução magnética.



Figura 33 - Traçador de Curvas de Histerese (TLMP-TCH-14).

A obtenção da curva de histerese e as propriedades magnéticas pelo método do TCH são feitas através de um software de aquisição de dados *GLB-BH 3.0*. Sua interface de obtenção de dados e curvas necessita de parâmetros de controle e medição das propriedades (Tabela 9 a 12). Na Figura 34 é demonstrada a interface do software.

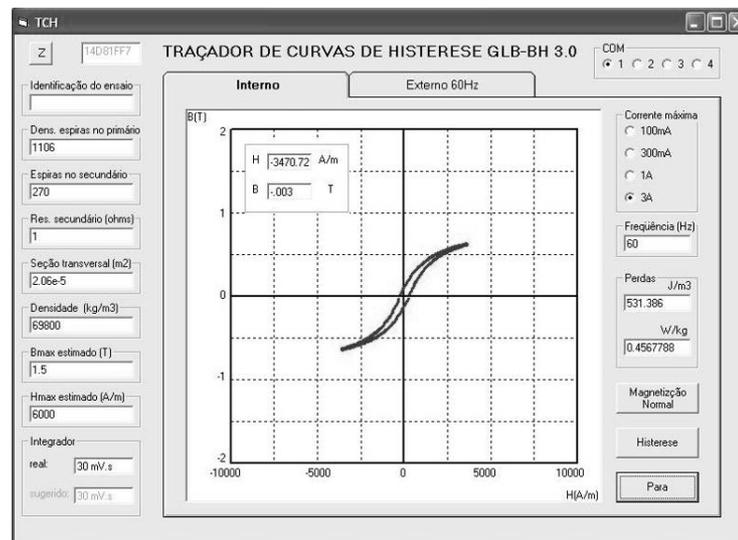


Figura 34 - Software de aquisição de dados (GLB-BH 3.0).

Os parâmetros de controle, resistência no secundário, corrente máxima e frequência são pré-determinadas para cada ensaio. A resistência é medida através de um multíteste para cada

amostra (1  $\Omega$  em média), a corrente aplicada é 3A e a frequência é de 60 Hz (frequência da rede elétrica).

### 3.6.2 Propriedades Elétricas

A determinação da resistividade elétrica de materiais pode ser realizada a partir da resistência elétrica de corpos com geometria perfeitamente conhecidas. Aplica-se uma tensão na amostra e mede-se a corrente elétrica. O inverso, porém é mais prático, ou seja, aplica-se uma corrente e mede-se a tensão. Portanto, a amostra para determinação da resistividade deve ter a forma de uma barra fina e comprida. A Lei de Ohm estabelece que:

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

Onde,  $R$ , resistência [ $\Omega$ ],  $V$ , tensão [V] e  $I$ , corrente [A]. A resistividade elétrica da barra,  $\rho$ , é calculada por:

$$\rho = R \frac{A}{l} = \frac{V}{I} \cdot \frac{A}{l} \quad (5)$$

Onde,  $\rho$ , resistividade elétrica [ $\mu\Omega.m$ ],  $l$ , comprimento da barra [m] e  $A$ , área da seção transversal da barra [ $m^2$ ].

A Figura 35 mostra o dispositivo para determinação da resistividade e o dispositivo elaborado para as medições. Observa-se neste desenho esquemático a existência de um dispositivo capaz de pressionar os contatos aos terminais da barra. Esta pressão possibilita uma maior superfície de contato entre as extremidades da barra e os contatos elétricos.

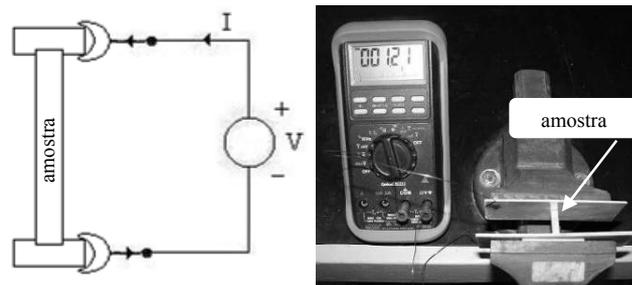


Figura 35 - Desenho esquemático do dispositivo para determinação da resistividade elétrica e dispositivo para as medições.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

O trabalho realizado é a caracterização de um material desenvolvido para aplicação como estatores e rotores de motores elétricos. No desenvolvimento deste material foram utilizadas várias técnicas para avaliação do mesmo. Com base em referências bibliográficas, além dos materiais a serem desenvolvidos, os resultados obtidos da caracterização das ligas resinadas são comparados com as propriedades de ferro sinterizado, sendo estas descritas na Tabela 13 para propriedades eletromagnéticas [50] e na Tabela 14 para propriedades mecânicas, sendo estas obtidas pelo mesmo procedimento utilizado para a caracterização das ligas resinadas [51].

Tabela 13 - Propriedades eletromagnéticas de interesse de ferro sinterizado.

Liga	Indução máxima		Indução remanente		Força coerciva		Permeabilidade relativa $\mu_r$	Resistividade [ $\mu\Omega.m$ ]
	$B_{max}$ [T]	[kG]	$B_r$ [T]	[kG]	$H_c$ [A/m]	[Oe]		
Ferro sinterizado	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2900	0,14
	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,6	3700	0,12
	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,5	4700	0,11

Tabela 14 - Medidas das propriedades mecânicas do ferro sinterizado.

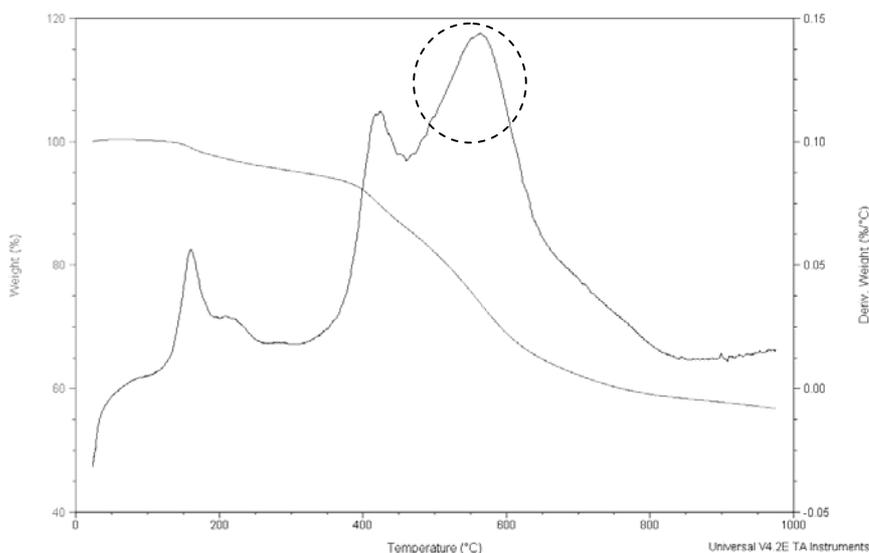
Liga	Densidade [ $g/cm^3$ ]		Dureza Brinell	Tensão de Compressão [MPa]	Deformação [mm/mm]	Módulo de Elasticidade [MPa]
	verde	sinterizado				
Ferro sinterizado	6,84	6,87	65	639,12	0,4796	2316,08

## 4.1 ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA

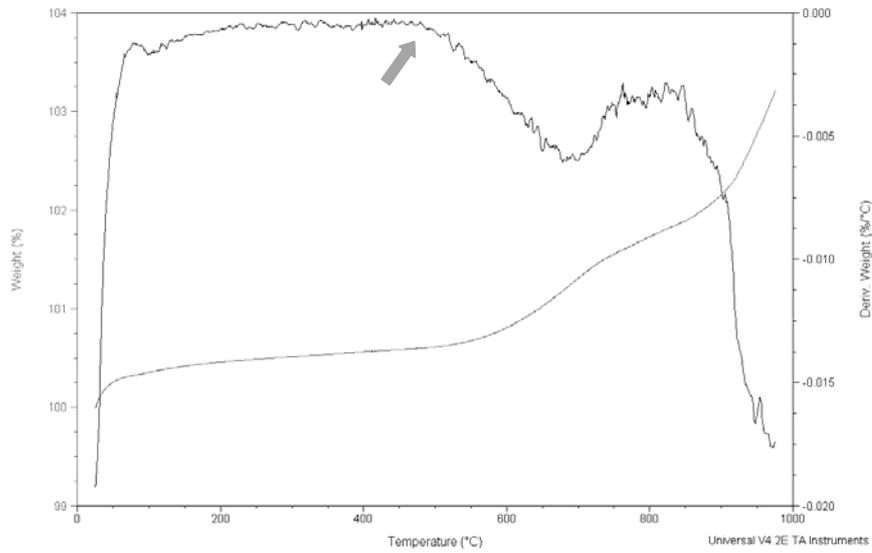
As características de resinas curadas são dependentes de seu grau de cura. Não apenas propriedades mecânicas como dureza, flexibilidade e resistência ao impacto, mas também o aspecto da resina, propriedades de escoamento durante a formação do compactado, resistência química e o tempo de vida são diretamente relacionados com o processo de cura. Antes de iniciar os testes físicos de interesse, as ligas foram analisadas termicamente. Como referência para cada liga foi utilizada a resina pura curada correspondente. O pico da curva representa a maior variação percentual em peso da amostra onde neste caso é destacado nos gráficos.

As análises térmicas foram feitas com taxa de aquecimento de 20°C/min. A temperatura em que houve pico de perda de massa (derivada da curva), pela possível degradação da resina, foi alcançada na faixa de 500°C a 600°C pras resinas RA e RB e 400°C a 500°C pras resinas RC e RD. A presença de ferro e pela pouca quantidade de material resinado, há influência na curva prejudicando a observação do pico na faixa de degradação da resina.

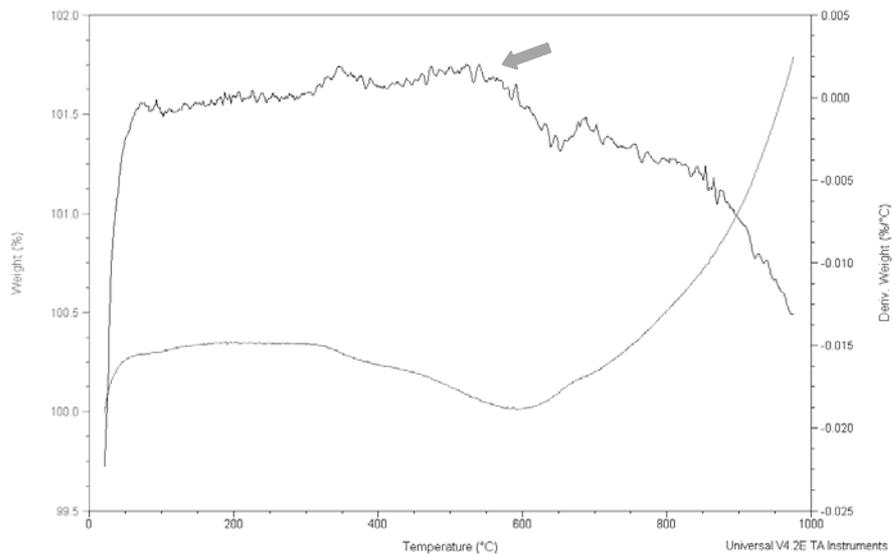
As seguintes figuras são os resultados das análises de TG, onde foi feita análise de resina pura (pico em destaque) e de amostras das misturas com 0,5% e 3,0% de resina.



(a)



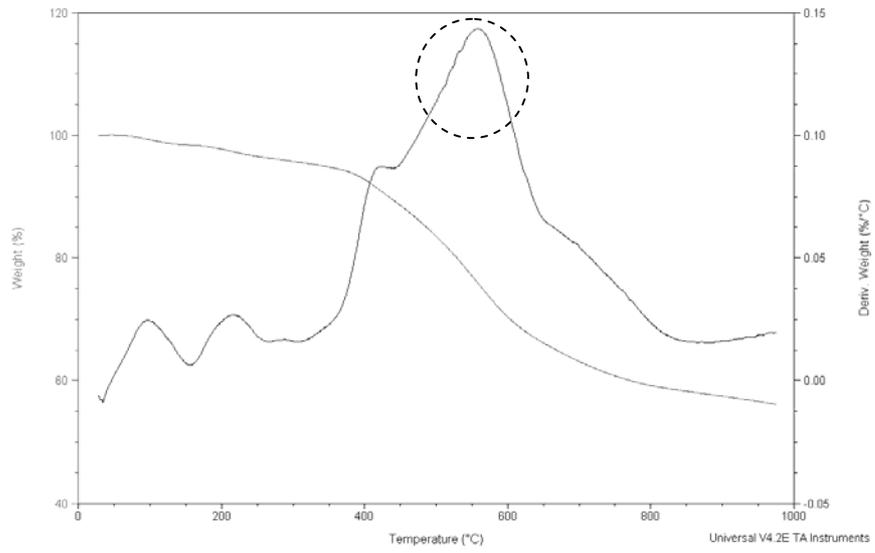
(b)



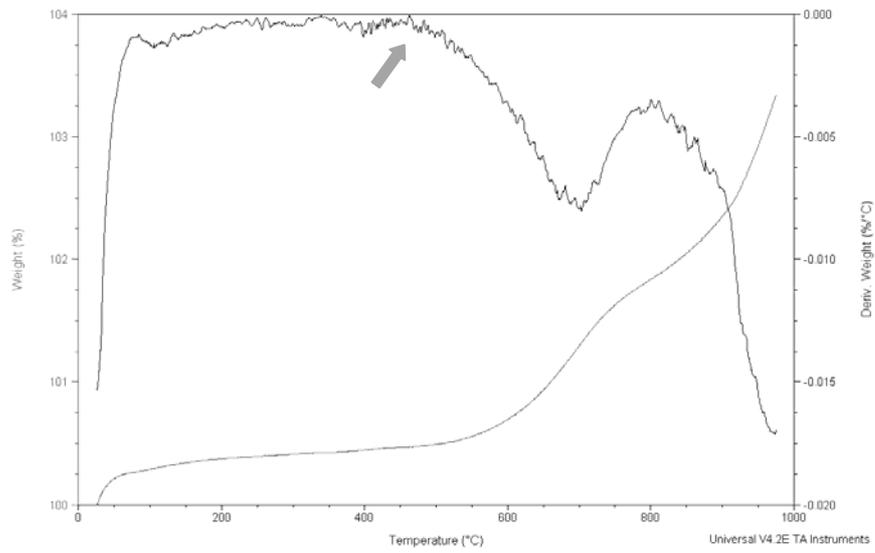
(c)

Figura 36 - Análises de TG da liga Fe-RA. (a) RA pura curada, (b) Fe-RA0,5 e (c) Fe-RA3,0.

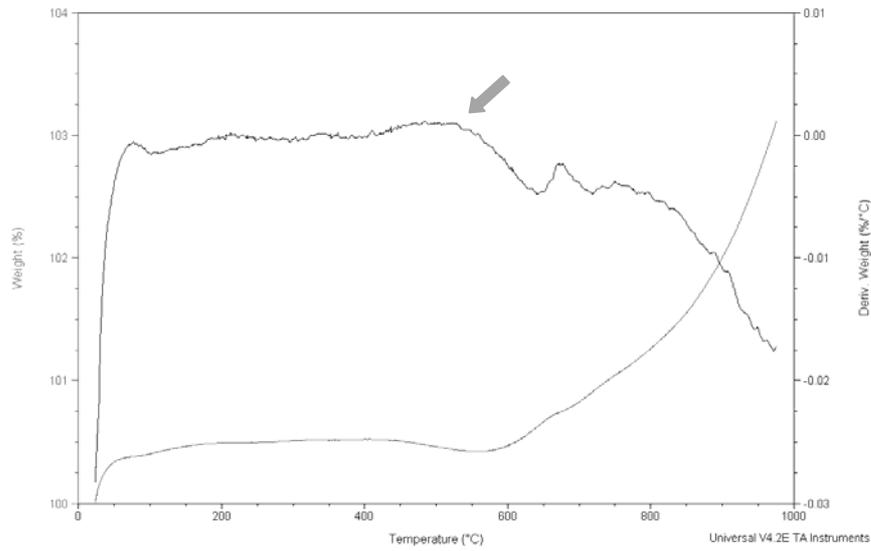
Em análise a estas curvas de TG, da liga Fe-RA (Figura 36), observa-se que o pico de variação de massa, indicado pelas setas, está na faixa de 450°C a 550°C e 500°C a 600°C das ligas com 0,5% e 3,0% de resina respectivamente.



(a)



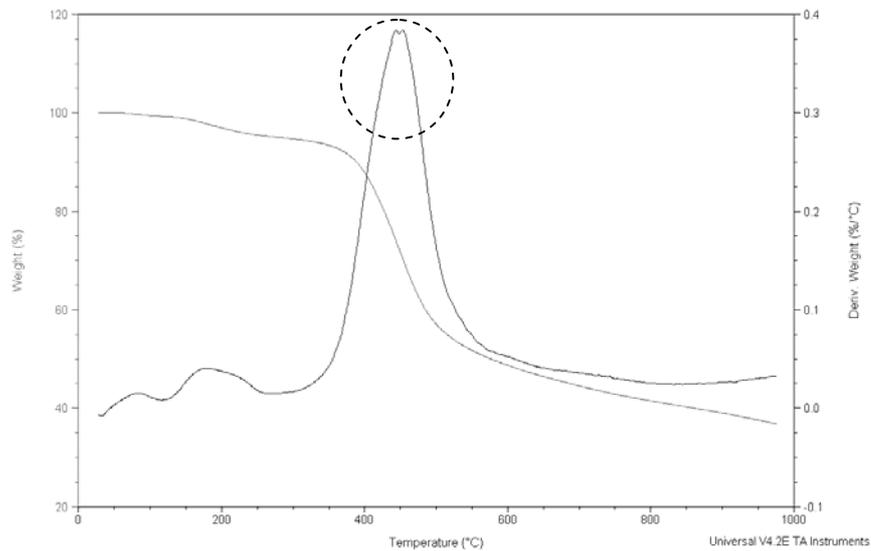
(b)



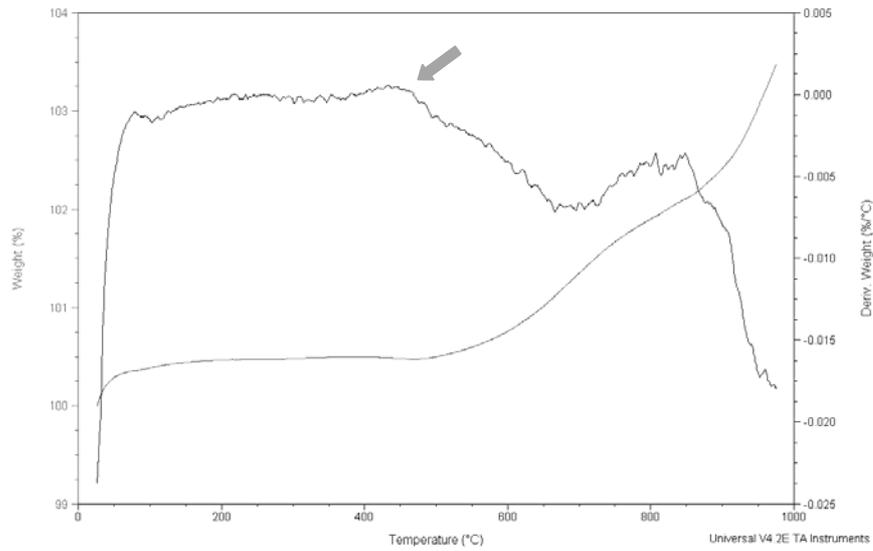
(c)

Figura 37 - Análises de TG da liga Fe-RB. (a) RB pura curada, (b) Fe-RB0,5 e (c) Fe-RB3,0.

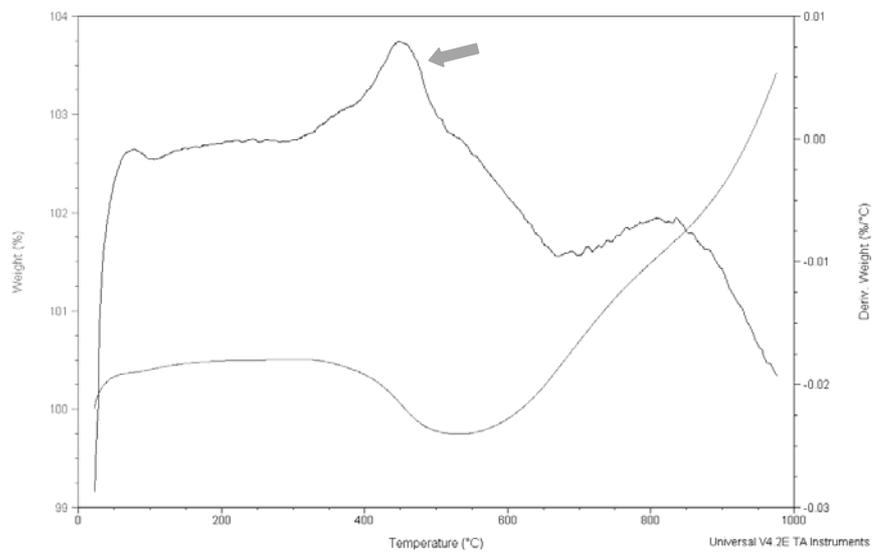
Em análise a estas curvas de TG, da liga Fe-RB (Figura 37), observa-se que o pico de variação de massa, indicado pelas setas, está na faixa de 450°C a 550°C e 450°C a 550°C das ligas com 0,5% e 3,0% de resina respectivamente.



(a)



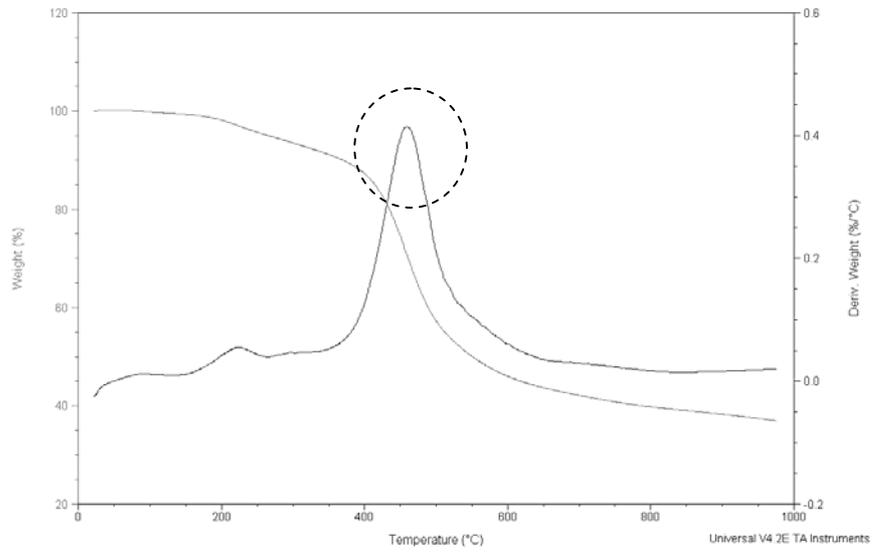
(b)



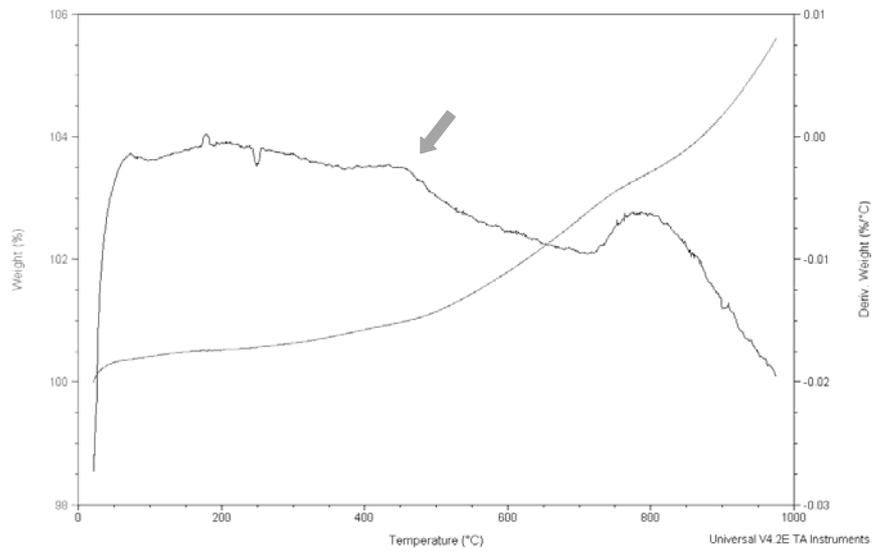
(c)

Figura 38 - Análises de TG da liga Fe-RC. (a) RC pura curada, (b) Fe-RC0,5 e (c) Fe-RC3,0.

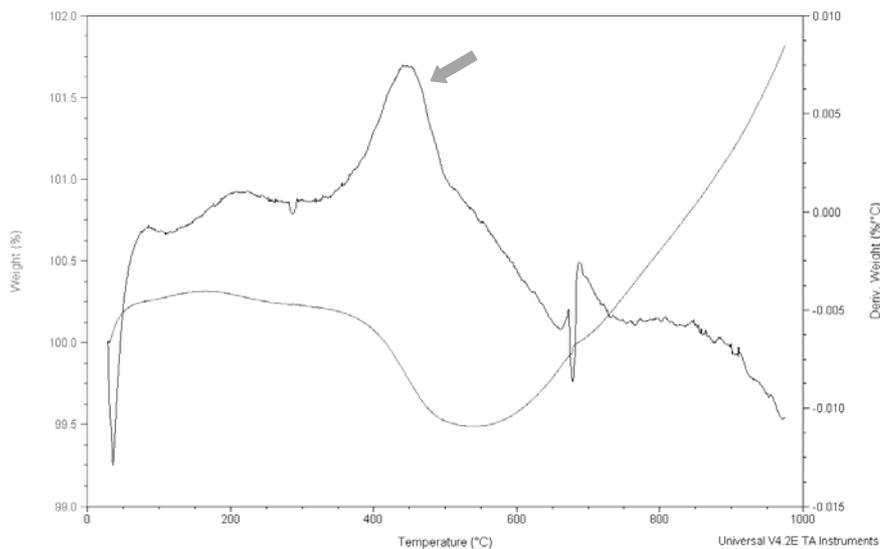
Em análise a estas curvas de TG, da liga Fe-RC (Figura 38), observa-se que o pico de variação de massa, indicado pelas setas, está na faixa de 400°C a 500°C e 400°C a 500°C das ligas com 0,5% e 3,0% de resina respectivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 39 - Análises de TG da liga Fe-RD. (a) RD pura curada, (b) Fe-RD0,5 e (c) Fe-RD3,0.

Em análise a estas curvas de TG, da liga Fe-RD (Figura 39), observa-se que o pico de variação de massa, indicado pelas setas, está na faixa de 400°C a 500°C e 400°C a 500°C das ligas com 0,5% e 3,0% de resina respectivamente.

Uma das dificuldades encontradas foi em adquirir picos representativos nas ligas com 0,5% de resina, além de ser um teor muito baixo houve também influência da oxidação do metal fazendo com que este pico não seja tão acentuado nestes casos. Mesmo com esta dificuldade pode-se observar que a variação de massa ocorre na mesma faixa de temperatura em comparação com a resina pura em todos os casos, ou seja, as ligas analisadas passaram por um ciclo de cura de acordo com o requisitado pela resina.

## 4.2 PROPRIEDADES MECÂNICAS

As máquinas elétricas em uso são submetidas a cargas, que além de exercer um torque resistivo contrário, podem resultar em vibração no sistema carga-máquina. Estas ligas estudadas devem apresentar comportamentos mecânicos compatíveis e necessários aos esforços quando a máquina estiver operando.

Entre as propriedades mecânicas analisadas, foram obtidos dados de Dureza Brinell (Tabela 15) e resistência a compressão (Tabela 16, 17, 18 e 19). Estas medidas são comparadas com ensaios feitos em amostras de ferro puro sinterizado (Tabela 14), sendo estas confeccionadas e caracterizadas da mesma forma que as ligas resinadas. Estes ensaios mecânicos foram realizados com três amostras para cada liga visando obter um desvio de medidas para cada resultado.

Tabela 15 - Medidas de Dureza Brinell das amostras estudadas.

Liga	Dureza Brinell de acordo com o teor de resina					
	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%
Fe-RA	101	97	97	97	95	81
Fe-RB	103	104	97	95	109	84
Fe-RC	106	100	99	93	90	93
Fe-RD	38	41	53	50	48	55

Tabela 16 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RA.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	9209,68	9896,85	5004,49	11319,33	10382,66	10920,41
Módulo de Elasticidade [MPa]	7452,59	7085,58	5254,25	10124,36	11533,25	9321,13
Tensão de Compressão [MPa]	227,66	245,56	123,02	280,34	257,14	243,69
Deformação [mm/mm]	0,0639	0,0624	0,0564	0,0730	0,0575	0,0667

Tabela 17 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RB.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	10146,76	10291,00	9942,21	10056,69	10374,17	9899,34
Módulo de Elasticidade [MPa]	10196,90	9690,10	15603,81	16364,88	9284,56	9265,12
Tensão de Compressão [MPa]	250,12	254,64	205,53	208,15	257,42	244,92
Deformação [mm/mm]	0,0450	0,0449	0,0312	0,0314	0,0466	0,0441

Tabela 18 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RC.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	9509,26	8380,96	8158,22	8991,08	8354,08	9417,51
Módulo de Elasticidade [MPa]	7839,37	8710,91	8864,99	9597,72	10040,78	9688,16
Tensão de Compressão [MPa]	230,77	207,37	202,44	222,68	207,10	234,32
Deformação [mm/mm]	0,0541	0,0441	0,0414	0,0430	0,0368	0,0403

Tabela 19 - Medidas do ensaio de compressão das amostras da liga Fe-RD.

Propriedades	Teor de resina					
	0,5 %	1,0 %	1,5 %	2,0 %	2,5 %	3,0 %
Força máxima [N]	7899,95	7702,25	7566,67	7390,61	7238,40	7028,65
Módulo de Elasticidade [MPa]	8451,92	8666,48	8464,71	7661,54	7892,49	6992,65
Tensão de Compressão [MPa]	195,38	190,40	187,40	181,85	178,27	172,46
Deformação [mm/mm]	0,0376	0,0415	0,0387	0,0431	0,0394	0,0432

A aplicação de um material como componente do núcleo de máquinas elétricas exige que este apresente propriedades compatíveis como dureza e ductilidade apropriadas. Para avaliação das propriedades mecânicas, o ensaio de compressão é realizado com a finalidade de caracterizar seu comportamento em relação ao tipo de fratura e mensurar sua resistência mecânica.

Os dados apresentados nas tabelas mostram os valores de resistência a compressão e módulo de elasticidade do material, sendo estas propriedades relevantes para caracterizar um material com comportamento frágil. Este comportamento é considerado pelo fato de estar sendo utilizado um material resinado como base mecânica e os resultados comprovam seu comportamento, tanto em valores como no aspecto de fratura apresentado.

O gráfico da Figura 40 faz uma relação do módulo de elasticidade do material em relação ao teor de resina, e o gráfico da Figura 41 relaciona a deformação sofrida pelo material em função do teor de resina.

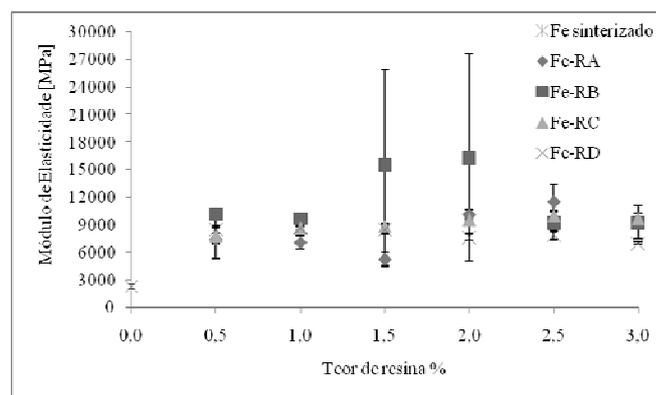


Figura 40 - Gráfico relacionando o módulo elástico em função do teor de resina.

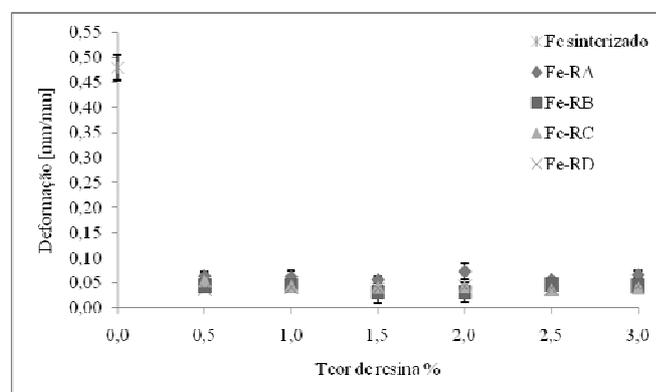


Figura 41 - Gráfico relacionando deformação à compressão em função do teor de resina.

Também é feita uma relação de dureza do material em função do teor de resina (Figura 42), caracterizando o comportamento mecânico pelo comportamento elástico do material, onde em alguns resultados os valores de dureza são maiores que para o material referência, ferro puro sinterizado.

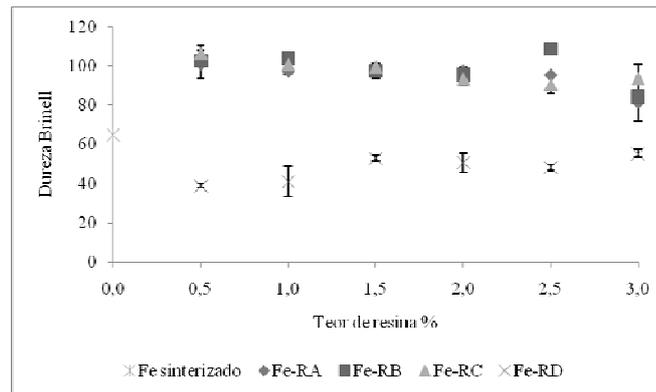


Figura 42 - Gráfico relacionando Dureza Brinell em função do teor de resina.

Para materiais onde a ductilidade é muito pequena, a propriedade mais importante é o limite de resistência à compressão, que difere em valor do limite de resistência à tração, sendo geralmente maior que esse. O limite de resistência à compressão é calculado pela carga máxima dividida pela secção original do corpo de prova. No caso de materiais frágeis, o ensaio de compressão pode ser efetuado numa própria peça acabada, obtendo-se assim apenas a carga de ruptura, desde que a peça caiba entre as placas da máquina. A Figura 43a mostra um corpo de prova de um material dúctil (cobre, por exemplo) completamente deformado. Por outro lado, um material frágil, como ferro fundido cinzento, não tem deformação lateral apreciável e a ruptura ocorre por cisalhamento e escorregamento, ao longo de um plano inclinado de aproximadamente 45°, conforme mostra a Figura 43b.

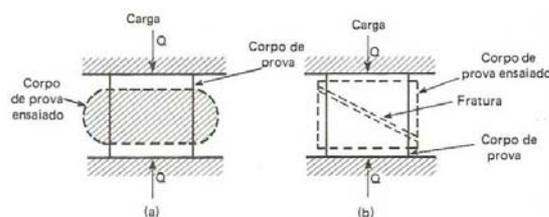


Figura 43 - Ensaio de compressão em (a) material dúctil, deformação sem ruptura, e (b) material frágil, ruptura sem deformação lateral [52].

Para caracterizar o material de comportamento frágil, utilizou-se a foto da fratura sofrida no ensaio de compressão (Figura 44), sendo este um comportamento de materiais de características frágeis.



Figura 44 - Amostra resinada após ensaio de compressão identificando o comportamento da fratura.

Como base de informação das propriedades mecânicas utilizou-se dados literários de resina fenólica do tipo Novolaca (como a utilizada neste trabalho). Através destes dados, constata-se que este tipo de resina apresenta módulo elástico com valores na faixa de 5,3GPa a 8,0GPa [53] e sua tensão de compressão fica na faixa de 117 a 179MPa [54]. Portanto relaciona-se material estudado às características de um material frágil pelo fato de que neste caso o agente mecânico é a resina e não o constituinte metálico do compósito. Sendo assim, a resina é considerada a matriz do compósito em estudo, onde é o responsável pelas características mecânicas de estabilidade dimensional e geométrica.

Como os materiais resinados não são sinterizados a resistência mecânica apresentada por estes materiais está abaixo de valores atingidos por aços laminados e ferro sinterizado. As solicitações mecânicas em uma máquina elétrica variam com o peso e a velocidade do rotor. Tipicamente o rotor sofre solicitações de duas fontes, movimento de rotação e do conjugado magnético entre os fluxos do estator e do rotor. O estator sofre a mesma solicitação de força eletromagnética do conjugado, porém não está em movimento. Em motores pequenos e girando a baixas rotações nenhuma destas forças será grande. As maiores solicitações nestes casos são concentradas nas condições de produção do motor (bobinagem dos enrolamentos e montagem da máquina). Geralmente os SMC's podem atingir valores de 50 a 150MPa de tensão de ruptura transversal. Estes valores podem ser melhorados dependendo das técnicas utilizadas para obtenção da peça final.

#### 4.2.1 Análise Micrográfica

Como referenciado sobre a aplicação de SMC, o aspecto formado pela liga resinada seria a partícula metálica envolta pela resina, sendo que na tecnologia existente a partícula metálica é micro encapsulada pelo material orgânico onde como resultado de cura teríamos todas as partículas metálicas envoltas pela resina. Na técnica utilizada em questão é feita a mistura da parte metálica com a parte orgânica e não a utilização de matéria-prima já preparada para esta aplicação, sendo assim o comportamento pós cura é diferente do esperado ou previsto com base nas referências citadas.

Neste caso foram feitas análises micrográficas para avaliar o comportamento dos materiais após a cura com objetivo de verificar o preenchimento de resina entre as partículas metálicas. Foram feitas análises metalográficas das ligas resinadas estudadas. As figuras em seguida apresentam o aspecto de cada liga avaliada.

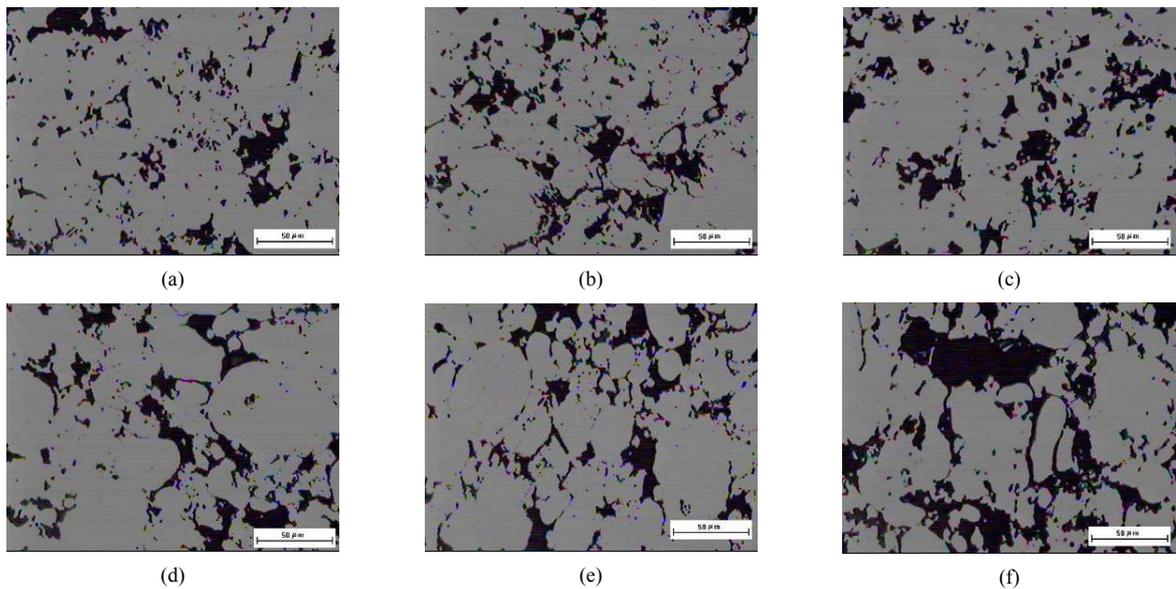


Figura 45 - Micrografias da liga Fe-RA. (a) Fe-RA0,5, (b) Fe-RA1,0, (c) Fe-RA1,5, (d) Fe-RA2,0, (e) Fe-RA2,5 e (f) Fe-RA3,0. Aumento de 100x.

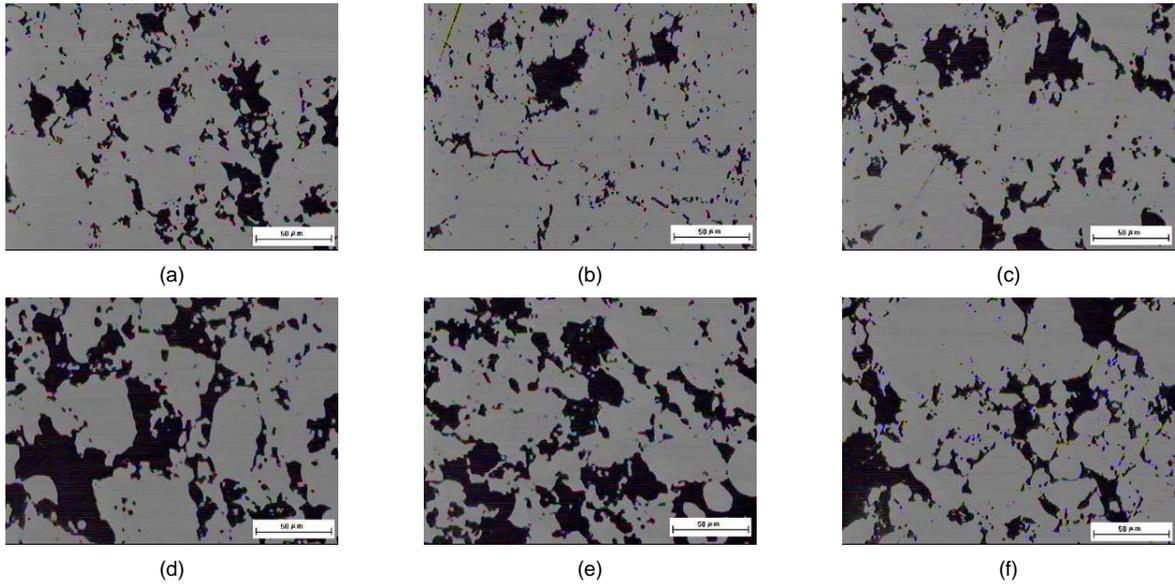


Figura 46 - Micrografias da liga Fe-RB. (a) Fe-RB0,5, (b) Fe-RB1,0, (c) Fe-RB1,5, (d) Fe-RB2,0, (e) Fe-RB2,5, (f) Fe-RB3,0. Aumento de 100x.

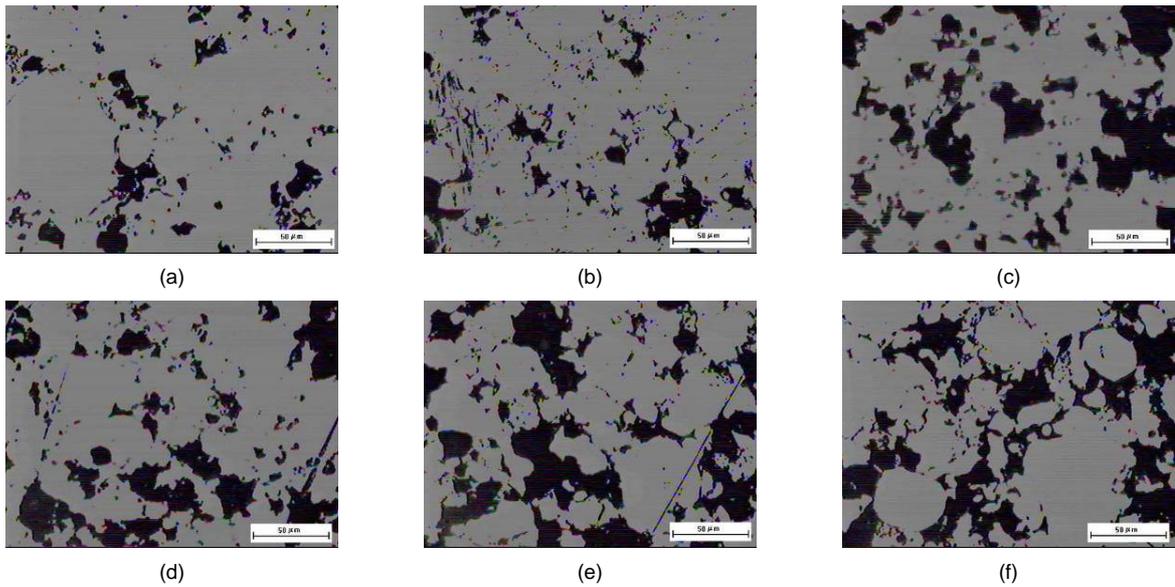
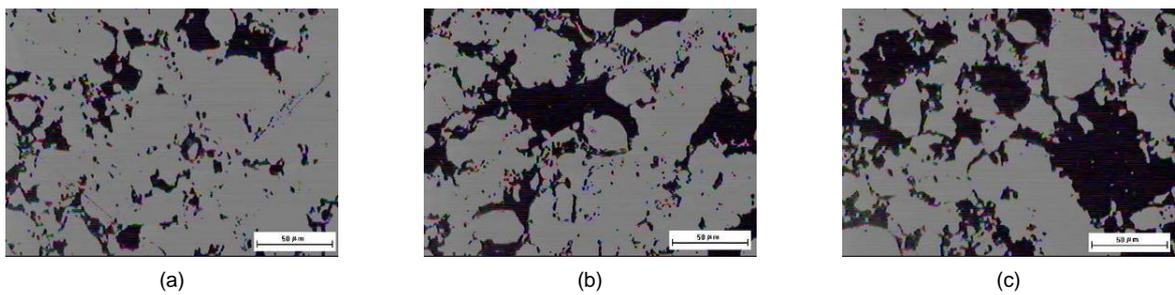


Figura 47 - Micrografias da liga Fe-RC. (a) Fe-RC0,5, (b) Fe-RC1,0, (c) Fe-RC1,5, (d) Fe-RC2,0, (e) Fe-RC2,5, (f) Fe-RC3,0. Aumento de 100x.



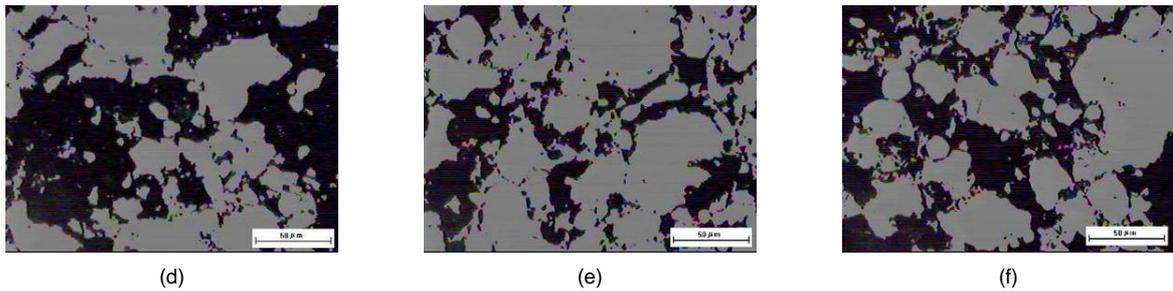


Figura 48 - Micrografias da liga Fe-RD. (a) Fe-RD0,5, (b) Fe-RD1,0, (c) Fe-RD1,5, (d) Fe-RD2,0, (e) Fe-RD2,5, (f) Fe-RD3,0. Aumento de 100x.

Observamos nas micrografias formação de aglomerados de ferro, representado pela parte clara. Já a parte escura considera-se que seja resina e vazios presentes na microestrutura do material. Este comportamento é proveniente do processo de mistura ou da própria compactação.

Como forma de complementar esta análise micrográfica, foram feitas micrografias em MEV (Microscopia Eletrônica de Varredura). Considerando o comportamento demonstrado pelas micrografias e as mesmas condições de preparação, foram feitas micrografias de amostras com 0,5% e 3,0% de resina para cada liga resinada. A região analisada é em uma fratura provocada em cada amostra, como demonstrada na Figura 49.

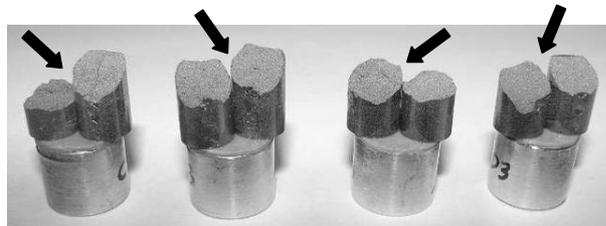
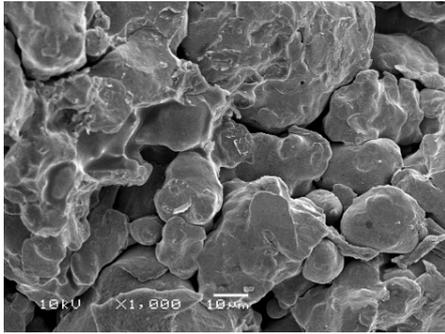
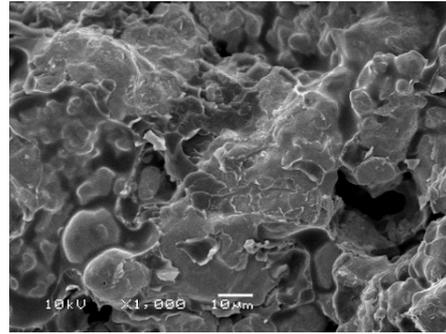


Figura 49 - Amostras para análise no MEV. Setas indicam a região analisada.

Nestas micrografias podemos observar os aglomerados de ferro e caminhos livres formados pela fratura da amostra para esta análise e pelo não preenchimento da resina. Observam-se também uma tendência de partículas mais aglomeradas com 3% de resina.

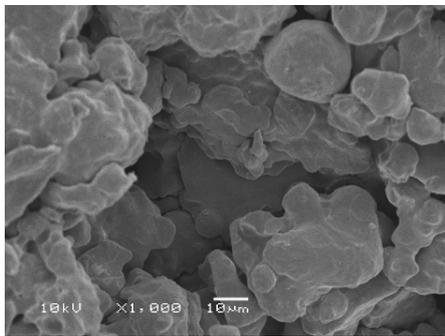


(a)



(b)

Figura 50 - Micrografias da liga Fe-RA, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.

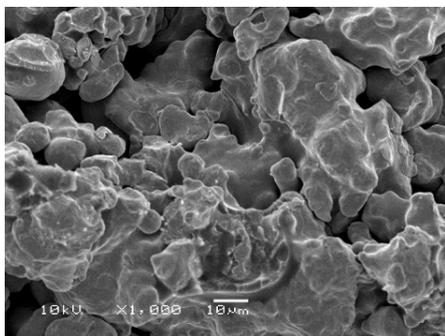


(a)

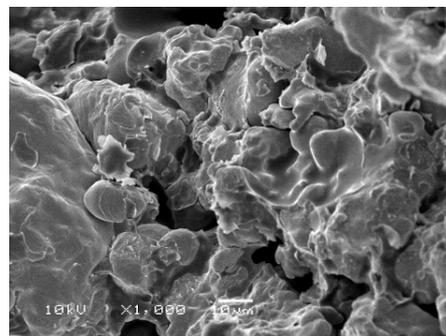


(b)

Figura 51 - Micrografias da liga Fe-RB, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.



(a)



(b)

Figura 52 - Micrografias da liga Fe-RC, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.

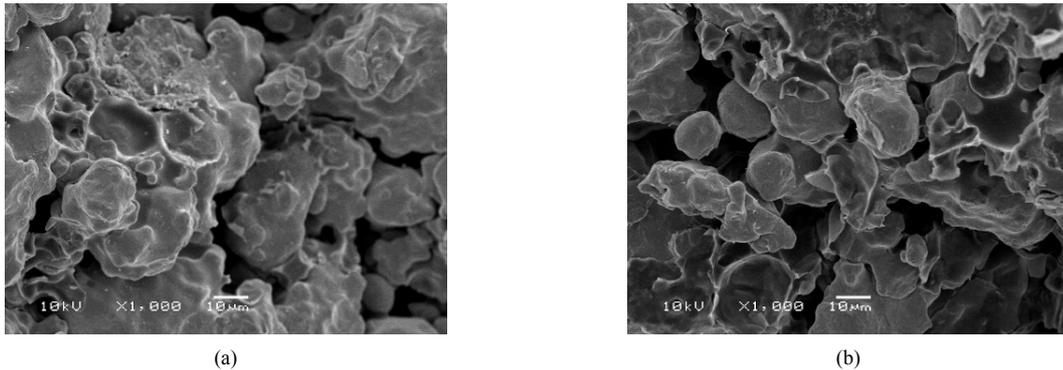


Figura 53 - Micrografias da liga Fe-RD, (a) 0,5% de resina e (b) 3,0% de resina.

Para complementar esta caracterização das amostras foi feita análise por EDS (Figura 54) de pontos específicos para detectar a composição do material, comprovando a presença de ferro puro em 99,% na composição, em pontos específicos como o mostrado na figura, mas não sendo possível identificar o material resinado, que neste caso não é possível pela técnica utilizada.

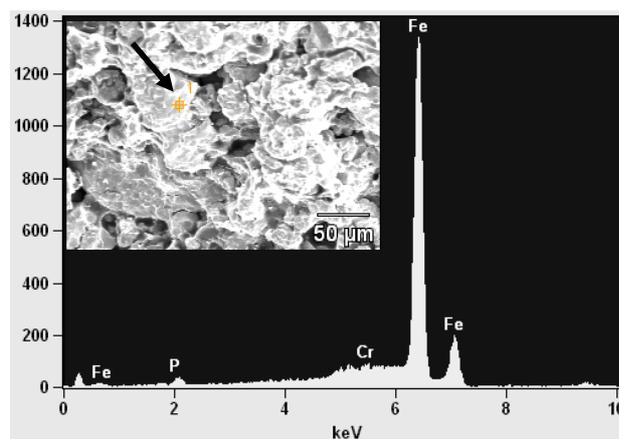


Figura 54 - Análise de composição por EDS.

Em relação às características micrográficas, outro fato a ser considerado é a presença de porosidade ou vazios na microestrutura, que atuam como barreiras dificultando a condutividade elétrica do material influenciando na resistividade elétrica do mesmo. Para esta avaliação da influencia nas propriedades elétricas há necessidade de avaliar o processo de compactação e o preenchimento da resina onde é esperado que a resina atue de forma que preencha os espaços formados entre as partículas metálicas.

## 4.4 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

A caracterização das propriedades magnéticas de interesse parte da obtenção das curvas de histerese para cada liga resinada em comparação com os dados de ferro puro sinterizado. Como dados de interesse, constam permeabilidade magnética, indução de saturação e perdas magnéticas, estas relacionadas com retentividade e coercitividade.

### 4.4.1 Curva de Histerese

O ideal de uma curva de histerese para um material magnético macio é que sua curva seja estreita, onde são representadas as perdas deste material. Outra característica ideal é uma alta indução de saturação do material. Na Figura 55 está representada a curva de histerese de ferro puro sinterizado, onde observamos as curvas feitas a frequências de 0,05Hz e 60Hz.

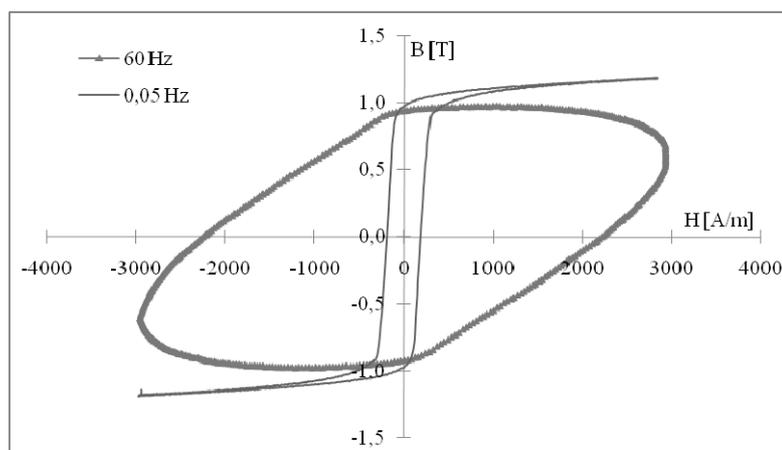


Figura 55 - Curva de histerese determinada na condição quase estática e a 60Hz para ferro puro sinterizado.

As curvas de histerese da Figura 56 representam o comportamento das ligas desenvolvidas neste trabalho. Estes materiais apresentam o mesmo comportamento ao traçar as curvas, com baixa indução de saturação e baixas perdas magnéticas totais. As curvas foram feitas a uma frequência de 60Hz, esta mesma da rede de alimentação de operação dos motores elétricos.

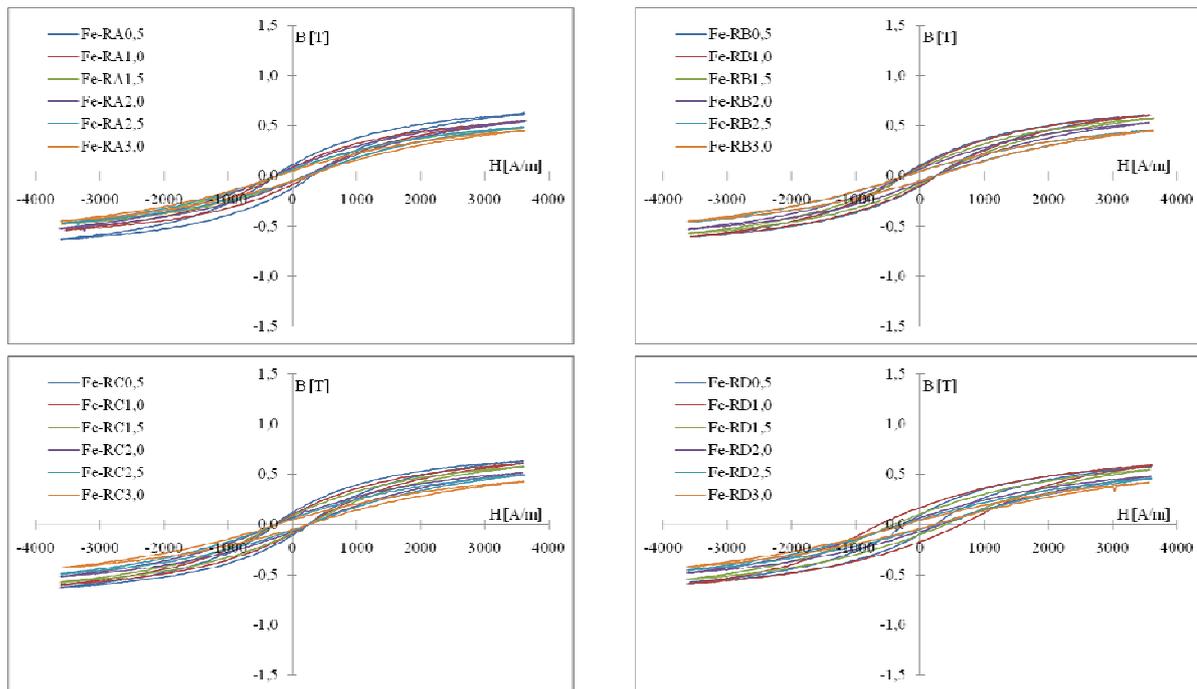


Figura 56 - Curvas de histerese das ligas estudadas para cada teor de resina utilizado.

Através destas curvas e o tratamento dos dados, foram obtidos os valores das propriedades de indução máxima, indução remanente (retentividade) e força coercitiva (coercitividade), estes representados pelas Tabela 20, 21, 22 e 23.

Tabela 20 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RA.

Liga	Indução máxima $B_{\text{máx}}$		Indução remanente $B_r$		Força coercitiva $H_c$	
	[T]	[T]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]
Fe-RA0,5	0,64	0,10	0,10	1,0	272	3,4
Fe-RA1,0	0,54	0,10	0,10	1,0	238	3,0
Fe-RA1,5	0,47	0,04	0,04	0,4	223	2,8
Fe-RA2,0	0,55	0,08	0,08	0,8	215	2,7
Fe-RA2,5	0,49	0,05	0,05	0,5	215	2,7
Fe-RA3,0	0,45	0,04	0,04	0,4	223	2,8

Tabela 21 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RB.

Liga	Indução máxima $B_{\text{máx}}$		Indução remanente $B_r$		Força coercitiva $H_c$	
	[T]	[T]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]
Fe-RB0,5	0,61	0,10	0,10	1,1	261	3,1
Fe-RB1,0	0,61	0,08	0,08	0,8	261	3,3
Fe-RB1,5	0,58	0,09	0,09	0,9	270	3,4
Fe-RB2,0	0,54	0,06	0,06	0,6	282	3,5
Fe-RB2,5	0,46	0,05	0,05	0,5	244	3,0
Fe-RB3,0	0,45	0,04	0,04	0,4	255	3,2

Tabela 22 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RC.

Liga	Indução máxima $B_{m\acute{a}x}$		Indução remanente $B_r$		Força coercitiva $H_c$	
	[T]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]	[Oe]
Fe-RC0,5	0,63	0,11	1,1	280	3,5	
Fe-RC1,0	0,61	0,08	0,8	249	3,2	
Fe-RC1,5	0,58	0,09	0,9	289	3,7	
Fe-RC2,0	0,52	0,07	0,7	305	3,8	
Fe-RC2,5	0,49	0,06	0,6	309	3,9	
Fe-RC3,0	0,43	0,05	0,5	271	3,4	

Tabela 23 - Propriedades magnéticas obtidas pela curva de histerese da liga Fe-RD.

Liga	Indução máxima $B_{m\acute{a}x}$		Indução remanente $B_r$		Força coercitiva $H_c$	
	[T]	[T]	[kG]	[A/m]	[Oe]	[Oe]
Fe-RD0,5	0,58	0,11	1,1	260	3,3	
Fe-RD1,0	0,60	0,17	1,7	660	8,3	
Fe-RD1,5	0,55	0,11	1,1	401	5,0	
Fe-RD2,0	0,48	0,06	0,6	370	4,6	
Fe-RD2,5	0,46	0,05	0,5	265	3,3	
Fe-RD3,0	0,42	0,04	0,4	243	3,0	

A propriedade de indução de saturação é obtida no ponto máximo da ordenada da curva de histerese, onde para estas ligas resinadas há uma redução de B com o aumento do teor de resina, variando de valores entre o máximo de 0,64 T, para Fe-RA0,5 e mínimo de 0,42 T, para Fe-RC3,0.

As grandezas retentividade e coercitividade são obtidas através dos pontos que interceptam o eixo das ordenadas e abcissas, respectivamente. A Figura 57 mostra os pontos de interceptação, onde são medidos os valores de  $H_c$  e  $B_r$  indicados no gráfico.

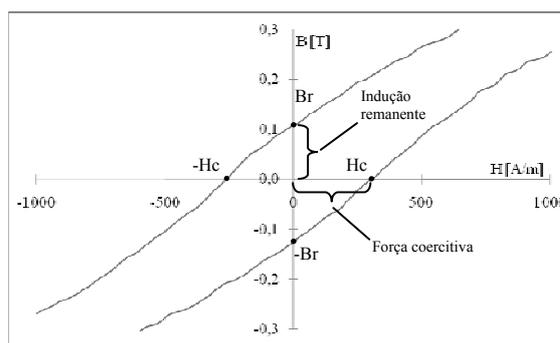


Figura 57 - Indicação dos pontos de medida de  $H_c$  e  $B_r$ .

Sendo assim, observando os valores obtidos na indução máxima destas ligas, seria interessante testar um material ferromagnético com valor superior desta grandeza, como por exemplo a liga Fe-50Ni pré-ligado ou atomizado. Portanto, tendo esta liga ferromagnética valores

superiores ao ferro puro, seria possível obter melhores resultados para com os compósitos estudados.

Como a maioria destas aplicações se dá em máquinas excitadas em corrente alternada, surge um segundo parâmetro de seleção desses materiais, as perdas magnéticas. Como a magnetização não é um fenômeno reversível, o processo cíclico de magnetizar e desmagnetizar a cada 1/120 de segundo leva à ocorrência de histerese. Devido à existência da histerese magnética e da circulação de correntes elétricas parasitas, induzidas pela variação do fluxo magnético no interior do material, o processo de inversão da magnetização ocorre com dissipação de energia, ou seja, com perdas magnéticas, também conhecidas como perdas no ferro. Dada a importância do rendimento energético das máquinas, e como as perdas no ferro costumam ser muito maiores que as perdas no cobre, as perdas magnéticas são o principal parâmetro técnico de seleção e controle desses materiais.

A Figura 55 mostra a curva de histerese obtida para ferro sinterizado quando excitada a 60 Hz. A área interna dessa curva é a energia dissipada por ciclo, em W/kg. Conforme se reduz a frequência, a energia dissipada diminui, ou seja, a curva se estreita, mas a área nunca vai a zero. A curva de histerese mais estreita, na mesma figura, foi traçada em 20s, ou seja, numa frequência da ordem de 0,05 Hz. Isso mostra que, mesmo em condições quase-estáticas, existe uma histerese e energia dissipada no processo. Essa é a chamada parcela histerética das perdas magnéticas.

Entretanto, como neste trabalho o foco é o estudo de materiais para utilização como núcleos (estatores e rotores) de motores elétricos, é necessário que estas propriedades sejam medidas a uma frequência de 60 Hz. Portanto, ao mensurar as perdas magnéticas do ferro sinterizado foi obtido um valor de 57 W/kg de energia dissipada à 60 Hz e considerando ligas comercializadas para estator e rotor, como aço carbono e aço silício, sendo estes laminados, suas perdas ficam na faixa de 1 a 7 W/kg.

Já para os materiais desenvolvidos as perdas magnéticas medidas são significativamente inferiores às referências, onde com o aumento do teor de resina há redução destas perdas. No gráfico da Figura 58 observamos esta relação de redução das perdas magnéticas em função do teor de resina nas ligas, estando estes valores entre máximo de 1,69 W/kg, para Fe-RD0,5 e 0,29

W/kg, para Fe-RD3,0. Mesmo em condições quase estáticas, a 0,05 Hz, este comportamento se mantém.

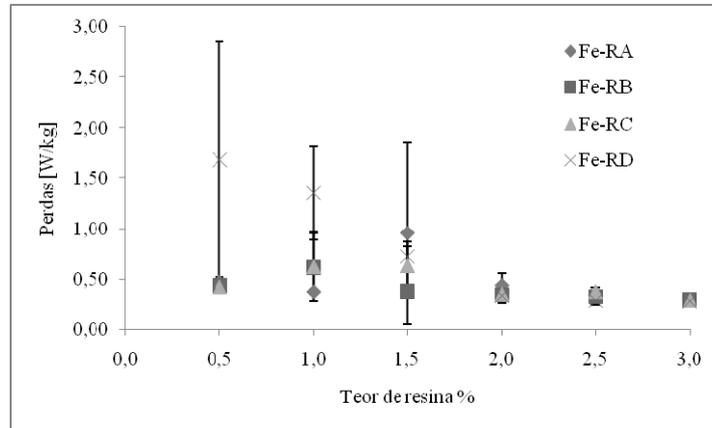


Figura 58 - Relação da redução de perdas em função do aumento do teor de resina.

#### 4.4.2 Magnetização

Em uma curva de magnetização, ao aumentar o campo H, o valor de B aumenta rapidamente e após tem um aumento lento até sua saturação. Nas Figura 59 e 60 os gráficos demonstram as curvas de magnetização e permeabilidade das ligas desenvolvidas.

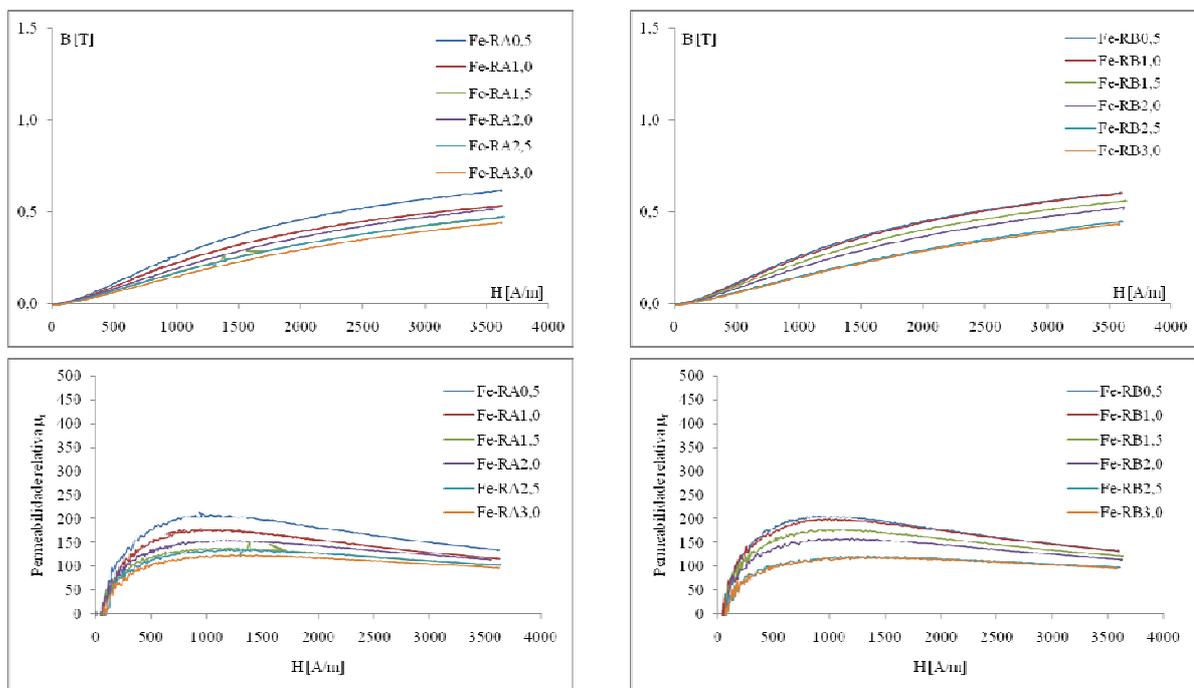


Figura 59 - Curvas de magnetização e permeabilidade magnética relativa das ligas Fe-RA e Fe-RB.

As ligas apresentam mesmas características, com baixa inclinação da curva de magnetização e o mesmo para a permeabilidade magnética. Uma característica relevante é a inclinação inicial íngreme da curva de permeabilidade com sua queda com o aumento do campo aplicado.

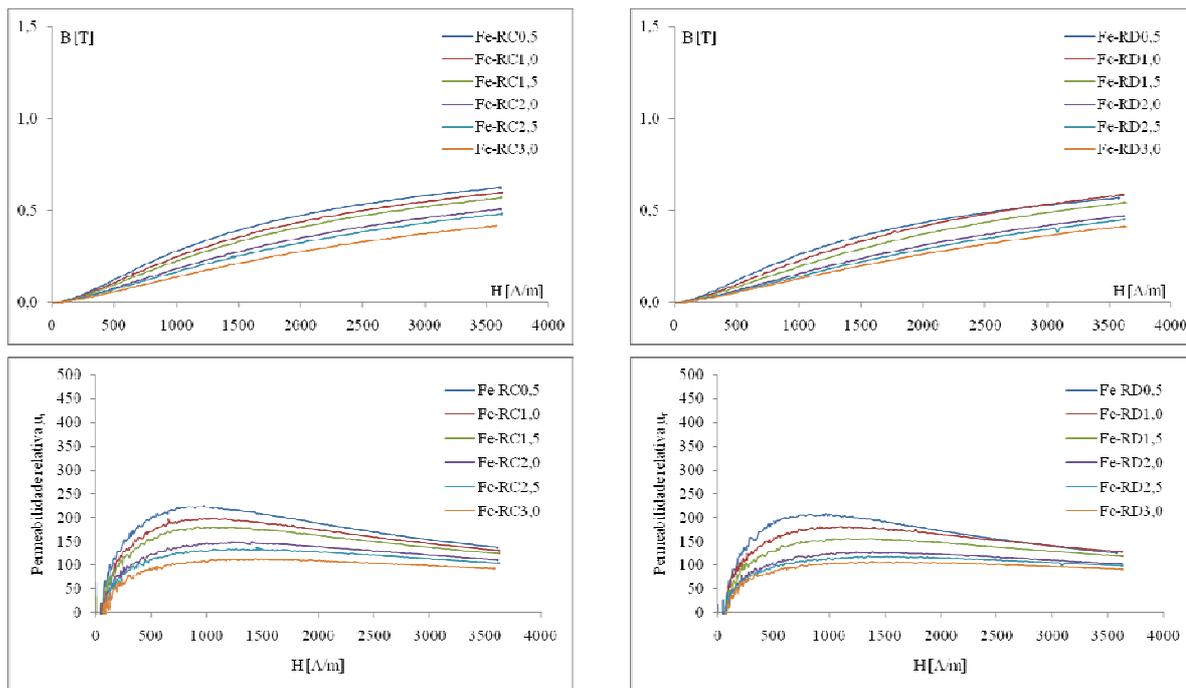


Figura 60 - Curvas de magnetização e permeabilidade magnética relativa das ligas Fe-RC e Fe-RD.

A obtenção dos valores de permeabilidade foi feita com base nos princípios de eletromagnetismo, descrito no item 2.3.2 deste trabalho, onde é feita a relação entre as curvas de magnetização e permeabilidade [14]. A Figura 61 exemplifica esta metodologia utilizada para cada liga estudada, seguindo o raciocínio da Figura 4, do item 2.3.2. Portanto, a permeabilidade relativa máxima está no ponto da curva de magnetização onde a relação  $B$  e  $H$  é máxima, ou seja, ponto A (intercepção da curva sólida com a linha tracejada) da curva da Figura 61a e ponto B da Figura 61b.

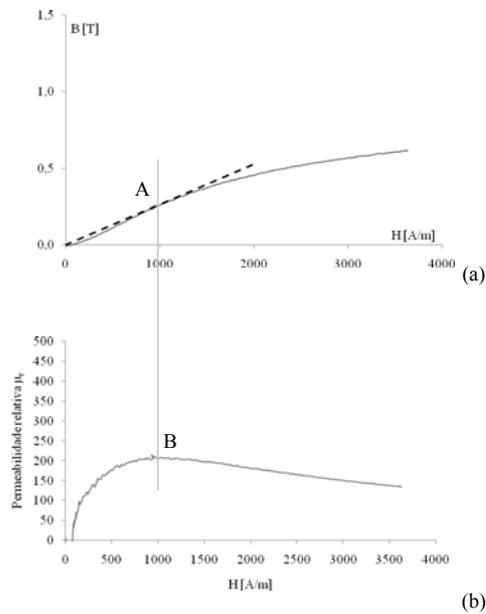


Figura 61 - Relação de curva de magnetização, (a), com curva de permeabilidade (b), para obtenção da permeabilidade relativa das ligas estudadas.

Através do tratamento destes dados, chegou-se aos valores de permeabilidade relativa da Tabela 24 para cada liga estudada.

Tabela 24 - Permeabilidade relativa das ligas resinadas em função do teor de resina.

Liga	Permeabilidade relativa, $\mu_r$ , em relação ao teor de resina					
	0,5%	1,0%	1,5%	2,0%	2,5%	3,0%
Fe-RA	207	180	152	156	137	122
Fe-RB	205	200	179	160	121	117
Fe-RC	222	198	181	150	138	113
Fe-RD	207	182	156	130	118	105

Com adição de resina na mistura, há a redução da permeabilidade. No entanto, estes compósitos magnéticos macios apresentam valores de permeabilidade significativamente inferiores às referências, como Fe com permeabilidade de 2900 a 4700 e Fe-50Ni com permeabilidade de 25000.

#### 4.5 PROPRIEDADES ELÉTRICAS

A determinação da resistividade das ligas resinadas foi realizada a partir da simples medição da resistência elétrica das amostras na forma de barras, a partir de um multiteste de alta

sensibilidade, sendo estas feitas a temperatura ambiente. As Tabela 25, 26, 27 e 28 mostram os valores medidos de resistência elétrica e os parâmetros para o cálculo da resistividade a partir da equação 5, do item 3.6.2. Para obtenção destes valores foram feitas medições de três amostras para cada liga obtendo uma média para demonstração dos resultados.

Tabela 25 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RA.

Amostra	Resistência [Ω]	Área da seção [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento [mm]	Resistividade [μΩ.m]
Fe-RA0,5	3,3	12,0	25,0	1608
Fe-RA1,0	2,6	12,0	25,0	1248
Fe-RA1,5	3,6	12,0	25,0	1728
Fe-RA2,0	8,0	12,0	25,0	3864
Fe-RA2,5	6,4	12,0	25,0	3072
Fe-RA3,0	16,7	12,0	25,0	8040

Tabela 26 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RB.

Amostra	Resistência [Ω]	Área da seção [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento [mm]	Resistividade [μΩ.m]
Fe-RB0,5	4,2	20,1	21,0	4048
Fe-RB1,0	2,2	12,0	25,0	1056
Fe-RB1,5	6,0	12,0	25,0	2880
Fe-RB2,0	5,8	12,0	25,0	2784
Fe-RB2,5	9,2	12,0	25,0	4416
Fe-RB3,0	13,7	12,0	25,0	6576

Tabela 27 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RC.

Amostra	Resistência [Ω]	Área da seção [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento [mm]	Resistividade [μΩ.m]
Fe-RC0,5	5,4	19,1	20,5	5020
Fe-RC1,0	1,2	20,5	21,1	1245
Fe-RC1,5	1,4	20,6	21,6	1357
Fe-RC2,0	4,9	20,1	27,7	3607
Fe-RC2,5	3,8	19,9	21,4	3626
Fe-RC3,0	23,9	20,5	25,7	19130

Tabela 28 - Valores de resistência elétrica, parâmetros dimensionais e resistividade elétrica da liga Fe-RD.

Amostra	Resistência [Ω]	Área da seção [mm <sup>2</sup> ]	Comprimento [mm]	Resistividade [μΩ.m]
Fe-RD0,5	5,7	20,7	20,2	5864
Fe-RD1,0	2,1	20,9	25,2	1772
Fe-RD1,5	2,2	20,4	18,0	2550
Fe-RD2,0	5,0	21,7	19,3	5638
Fe-RD2,5	9,1	20,6	25,5	7390
Fe-RD3,0	24,3	21,0	16,0	31894

O gráfico da Figura 62 mostra o comportamento da resistividade elétrica das ligas em função do teor de resina para cada liga. Estes dados são comparados com a referência, ferro puro sinterizado, que apresenta valores de resistividade elétrica entre 0,11 e 0,2μΩ.m, assim como

outras ligas sinterizadas como Fe-6,5Si com resistividade de  $0,81 \mu\Omega.m$ , onde neste caso o silício é o agente utilizado para proporcionar aumento desta propriedade.

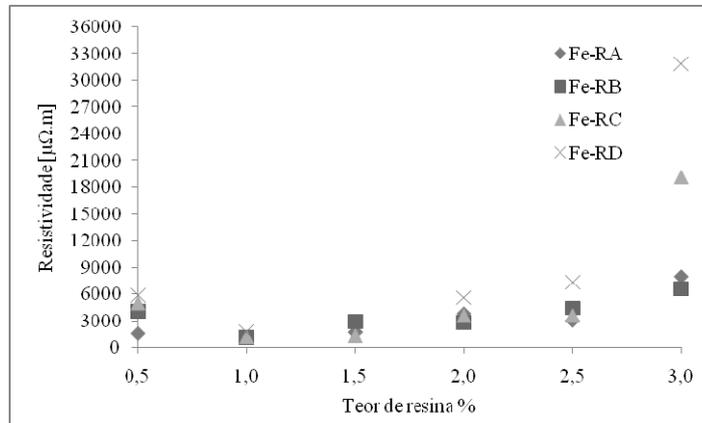


Figura 62 - Gráfico comparativo da resistividade elétrica em função do teor de resina.

Através destes resultados observou-se o comportamento da resistividade elétrica em função do teor de resina, aumentando com adição de resina.

Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Por esta razão, as maiores resistividades são obtidas em ligas compostas de dois ou mais materiais. Também o material resinado tem função de revestimento orgânico nas partículas de pó de ferro, que produz também elevada resistividade elétrica [55].

Tanto o estator como o rotor são construídos usualmente com chapas laminadas e isoladas, uma vez que, este isolamento entre chapas restringe a circulação de correntes induzidas. As perdas por correntes induzidas ou parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Mas a redução das correntes induzidas pode ser obtida pelo aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que, resistividade elétrica e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais, sendo neste caso possível de obter máquinas elétricas de alto rendimento. Esta constatação pode ser relacionada ao aumento da resistividade elétrica com o aumento do teor de resina. Portanto esta relação é feita através do gráfico da Figura 63, onde relaciona o aumento da resistividade com a redução de perdas magnéticas para cada liga estudada.

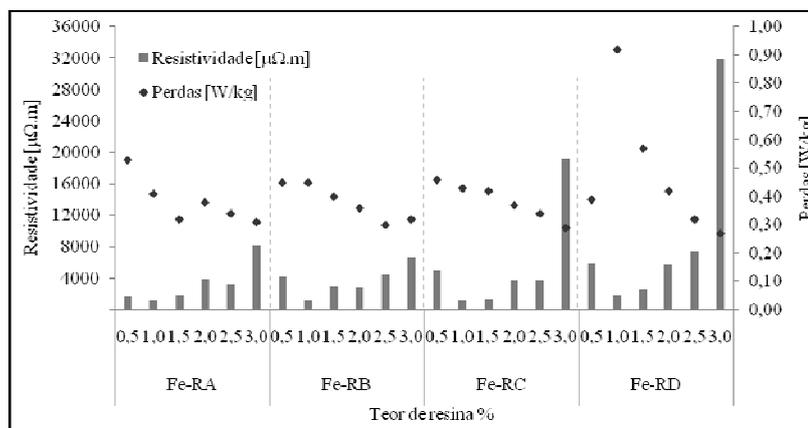


Figura 63 - Relação entre a redução de perdas e o aumento da resistividade em função da adição de resina.

Com base nos resultados das propriedades elétricas e magnéticas, são selecionadas as ligas com melhores propriedades de interesse para cada tipo de resina utilizada (Tabela 29). Considerando que estas ligas apresentam comportamento semelhante quanto às baixas perdas magnéticas e o mesmo para elevada resistividade elétrica, além de que estes materiais apresentam baixa permeabilidade magnética relativa, foi usado o critério de indução máxima,  $B_{m\acute{a}x}$ .

Tabela 29 - Propriedades elétricas e magnéticas das ligas selecionadas com melhores propriedades.

Liga	Resistividade [ $\mu\Omega.m$ ]	Indução máxima $B_{m\acute{a}x}$ [T]	Indução remanente $B_r$ [T] [kG]		Força coercitiva $H_c$ [A/m] [Oe]		Perdas [W/kg]	Máxima permeabilidade
Fe-RA0,5	1608	0,64	0,10	1,0	272	3,4	0,53	207
Fe-RB0,5	4048	0,61	0,10	1,1	261	3,1	0,45	205
Fe-RC0,5	5020	0,63	0,11	1,1	280	3,5	0,46	222
Fe-RD1,0	1772	0,60	0,17	1,7	660	8,3	0,92	182

Entretanto, considerando a fragilidade das ligas com menor teor de resina (0,5%) e a pouca variação entre os resultados de máxima magnetização, é possível que selecionassem ligas com maior teor de resina, visto que a elevada resistividade elétrica do material supre de alguma forma os requisitos para sua aplicação.

Este material resinado tem função de revestimento orgânico nas partículas de pó de ferro, que produz também elevada resistividade elétrica. Este tipo de material é geralmente

magneticamente isotrópico devido a sua natureza porosa, sendo benéfico para dispositivos eletromagnéticos. Os circuitos magnéticos podem ser intencionados com rota de fluxo tridimensional e diferentes topologias podem ser exploradas para desenvolver máquinas de alto rendimento pelo fato de o fluxo magnético não ser forçado no plano, assim como em chapas laminadas, que são usualmente utilizadas na confecção de máquinas elétricas e transformadores [55].

É importante salientar que parâmetros de preparação das amostras influenciam nos resultados em questão, como granulometria da matéria-prima, pressão de compactação e ciclo de cura.

Dentre as diversas considerações apresentadas, a tecnologia demonstrou capacidade em ser uma provável alternativa aos sistemas atuais de produção de motores elétricos, considerando que haja aperfeiçoamento deste processo. Portanto, foi selecionado um compósito magnético macio e aplicado como estator de um servomotor comercial. Esta etapa é descrita no anexo deste trabalho, onde a metodologia partiu da compactação e bobinagem do estator e feito um teste do servomotor como gerador. Os resultados foram satisfatórios com resultados até três vezes melhores que o servomotor comercial.

## 5. CONCLUSÕES

Com os resultados do estudo realizado, conclui-se que o material desenvolvido apresenta resultados promissores para sua aplicação como núcleo de motores elétricos. Este processo proposto é viável de aplicação na fabricação de estatores e rotores, necessitando o estudo de viabilidade de substituição do processo convencional para cada tipo de produto.

Quanto ao processo de metalurgia do pó, deve-se relacionar o custo da aquisição de ferramental com o volume de produção e a dificuldade de obtenção de ligas pré-ligadas dificulta a produção destes compósitos com diferentes metais além do ferro.

Mecanicamente os compósitos têm seu comportamento regido pela resina, onde, além de atuar como isolante entre as partículas de ferro é o agente que dá estabilidade mecânica ao material. Logo a peça após a cura apresenta estrutura frágil devido a não difusão atômica, que ocorre na sinterização.

Em relação às propriedades magnéticas, as ligas desenvolvidas apresentaram baixa indução de saturação, máximo de 0,64 T, e permeabilidade magnética relativa máxima de 222, valores significativamente abaixo de núcleos magnéticos laminados e sinterizados. Estes valores diminuem com o aumento do teor de resina.

As perdas magnéticas destas ligas são significativamente inferiores, com medidas até dez vezes menores que materiais laminados. Estas perdas são consideradas ao traçar as curvas de histerese na frequência de 60 Hz.

A adição de resina aumenta consideravelmente a resistividade elétrica dos compósitos magnéticos macios, com valores acima de 1000  $\mu\Omega.m$ , significativamente superiores às referências. Esta elevada resistividade elétrica atua na redução de perdas com o aumento do teor de resina.

Os materiais desenvolvidos, apesar de algumas propriedades não serem benéficas, podem ser aplicados em casos específicos, demonstrando a capacidade da M/P, sendo uma alternativa aos processos atuais de fabricação de núcleos magnéticos de motores elétricos.

## 6. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

Ao final deste trabalho, há possibilidade de continuidade desta linha pesquisa e novos desenvolvimentos podem ser iniciados, aprofundando ainda mais este estudo de caso. Nestes termos, sugerem-se novos temas de estudo:

- Um estudo mais detalhado do processo de mistura e compactação de materiais com mistura de materiais metálicos com resinados, visando melhorar a homogeneidade da mistura e as propriedades mecânicas dos mesmos;

- Avaliar o comportamento das propriedades de interesse, como resistividade e permeabilidade magnética, em função de parâmetros de compactação de amostras como o aumento da pressão de compactação;

- Utilização de ligas metálicas atomizadas para mistura com as resinas com objetivo de melhorar principalmente as propriedades magnéticas. Esta sugestão é considerada pela dificuldade em adquirir matéria-prima deste tipo, ou até mesmo por sua produção;

- Estudo detalhado sobre motores elétricos elaborando um banco de dados com aplicações possíveis deste tipo de material como núcleo de motores elétricos.

## ANEXO - APLICAÇÃO DOS COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS ESTUDADOS

Após a caracterização destes compósitos magnéticos macios desenvolvidos no LdTM, foi dado o passo inicial para aplicação destes materiais. Esta segunda etapa, no estudo da aplicação da metalurgia do pó no desenvolvimento de estatores e rotores para motores elétricos, foi um trabalho de mestrado onde foram feitos testes em motor elétrico, baseado na caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó.

Foi selecionado um servomotor da WEG (Figura 64) para substituição do estator por um dos compósitos desenvolvidos.



Figura 64 - Servomotor da WEG.

A metodologia partiu da compactação dos seguimentos do estator e montagem do mesmo. Na Figura 65 é mostrado o estator em seguimentos, o estator bobinado e o mesmo montado na carcaça do servomotor.

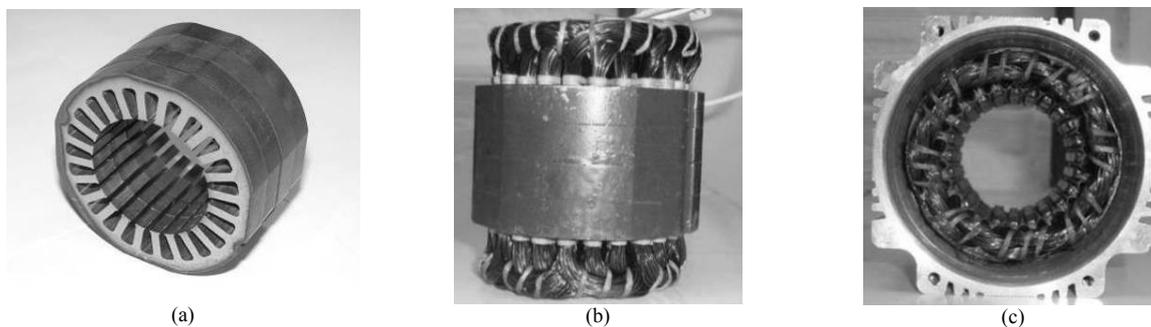


Figura 65 - Montagem do estator com a liga Fe-RA0,5. (a) Seguimentos do estator, (b) estator bobinado e (c) montagem na carcaça.

Para uma análise do material desenvolvido foi feito um teste comparativo do servomotor com o estator resinado com o servomotor da WEG. Ambos foram testados como geradores, sendo acoplados a um motor de indução trifásico acionado por um inversor, onde as frequências de acionamento variaram de 0 a 60 Hz. Os resultados foram comparados obtendo valores de tensão induzida, do servomotor com estator resinado, até três vezes superiores ao servomotor da WEG.

Estes resultados podem estar relacionados com a diminuição do entreferro devido à expansão do estator após cura, sendo que neste caso haveria necessidade de acabamento interno. Também às baixas perdas magnéticas devido a elevada resistividade elétrica do compósito magnético macio.

Entretanto, as características mecânicas do material geraram algumas dificuldades na montagem do servomotor como:

- A bobinagem do motor foi feita com maior cuidado e delicadeza levando maior tempo de montagem;
- Não é possível expandir a carcaça com aquecimento para inserção do estator, pois a carcaça ao retornar ao seu tamanho original pode fraturar o estator devido à característica frágil dos compósitos magnéticos macios, ou seja, sem deformação plástica.

## REFERÊNCIAS

- [1] RICHARDSON, D.V. **Rotating Electric Machinery and Transformer Technology**. Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982. 636p.
- [2] LANDGRAF, F.J.G., SCOZ, L.C. **A separação de perdas elétricas como critério de avaliação de processamento de aços elétricos**. Metalurgia & Materiais, maio 1995. p.436-438.
- [3] DIETRICH, D.W. **Magnetically Soft Materials**. ASM Handbook, V.2, 1992, p.761-781.
- [4] CULLITY, B.D. **Introduction to Magnetic Materials**. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
- [5] LALL, C. **Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding**. Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139p.
- [6] Z.P. POPOV, T.L. RATCHEV, Y. YANKOV. **The influence of Boron Additives on the Magnetic and Electrical Properties of PM Fe-Si-Cr-P Soft Magnetic Material**, Advances in Powder Metallurgy, v.5, 1991. p.189-193.
- [7] MOYER, K.H. **The Effect of Porosity on the Properties of Iron Compacts**. Riverton, N.J. Hoeganes Corporation, 1980.
- [8] JAMES, B.A., WILLIAMS, G. **Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron**. Powder Metallurgy, v.22, n.2, 1979. p.75-85.
- [9] H. Skarie, Thesis Outline, **Design of Powder Core Inductors**, Printed in Sweden by Universitetstryckeriet, Lund University, Lund, 2001.
- [10] F.G. Haneijo, H.G. Phan, **Powder metallurgy materials for AC magnetic applications**, Presentes at PM TEC, Washington, DC, 96 World Congress, June 16-21, 1996.
- [11] H. Shokrollahi, K. Janghorban. **Review Soft magnetic materials (SMC)**. Journal of Materials Processing Technology. 189. 2007. p.1-12.

- [12] CULLITY, B.D. **Introduction to Magnetic Materials**. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
- [13] JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London, Chapman and Hall, 1991.440p.
- [14] KRAUS, J.D. & CARVER, K.R. **Eletromagnetismo**. R.Janeiro, Guanabara, 1978. 780p.
- [15] CHIAVERINI, V. **Metalurgia do Pó**. 3<sup>a</sup> ed. Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, São Paulo (Brasil). 1992. 352p.
- [16] ASM Handbook. Volume 7. **Powder Metal Technologies and Applications**. ASM International. 2000.
- [17] TRÜMMLER, F., OBERACKER, R. **An Introduction to Powder Metallurgy**. 1993. The Institute of Materials. 331p.
- [18] Qualisinter Produtos Sinterizados Ltda. **O Processo de Metalurgia do Pó**. <<http://www.qualisinter.com.br/Processo.htm>>. Acesso em 03/02/2009.
- [19] M. Godec, **Development of Fe-Si-B powders for soft magnetic applications**, Mater. Technol. 35 (2001) 325–330.
- [20] I.P. Gilbert, V. Moorthy, S.J. Bull, J.T. Evans, A.G. Jack, **Development of soft magnetic composites for low-loss applications**, J. Magn. Magn. Mater. 242/245 (2002) 232–234.
- [21] L.A. Dobrazanski, M. Drak, **Structure and properties of composite materials with polymer matrix reinforced Nd-Fe-B hard magnetic nanostructures particles**, J. Mater. Process. Technol. 157/158 (2004) 650–657.
- [22] L.A. Dobrzanski, M. Drak, **Properties of composite materials with polymer matrix reinforced with Nd-Fe-B hard magnetic particles**, J. Mater. Process. Technol. 175 (2006) 149–156.
- [23] I. Chicinas, O. Geoffroy, **Soft magnetic composite based on mechanically alloyed nanocrystalline Ni<sub>3</sub>Fe phase**, J. Magn. Magn. Mater. 290/291 (2005) 1531–1534.

- [24] L.A. Dobrzanski, R. Nowosielski, **Structure and properties of nanocrystalline soft magnetic composite materials with silicon polymer matrix**, J. Magn. Magn. Mater. 290/291 (2005) 1510–1512.
- [25] S. Hariharan, J. Gass, **Superparamagnetism and magneto-caloric effect (MCE) in functional magnetic nanostructures**, Adv. Mater. Soc. 10 (2005) 398–402.
- [26] J.H. Paterson, R. Devine, **Complex permeability of soft magnetic ferrite/polyester resin composites at frequencies above 1 MHz**, J. Magn. Magn. Mater. 196–197 (1999) 394–396.
- [27] E. Bayramli, O. Olgelioglu, H.B. Ertan, **Powder metal development for electrical motor applications**, J. Mater. Process. Technol. 161 (2005) 83–88.
- [28] A. Hamler, V. Gorican, B. Sustarsic, A. Sirc, **The use of soft magnetic composite materials in synchronous electric motor**, J. Magn. Magn. Mater. 304 (2006) e816–e819.
- [29] L. Pennander, A. Jack, **Soft magnetic iron powder material AC properties and their application in electrical machines**, Magn. Mater., EuroPM(2003).
- [30] A.G. Jack, B.C. Mecrow, C.P. Maddison, **Combined radial and axial permanent magnet motors using soft magnetic composites**, in: IEE 9th International Conference on Electrical Machines and Drives, Conference Publication No. 468, Canterbury, UK, 1999.
- [31] F. Magnussen, D. Svehkarenko, P. Thelin, C. Sadarangani, **Analysis of a PM machine with concentrated fractional pitch windings**, in: Proceedings of Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (NORPIE), Trondheim, Norway, June 14–16, 2004.
- [32] F. Shin, **Design and development of a high-speed axial-flux permanent magnet machine**, Ph.D. Thesis, Technical Universities Eindhoven, The Netherlands, ISBN 90-386-1380-1, 2001.
- [33] D. Svehkarenko, **Thermal modelling and measurements of permanent magnet machines**, M.Sc. Thesis, X-ETS/EME-0411, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.

- [34] Y.G. Guo, J.G. Zhu, Z.W. Lin, J.J. Zhong, **3D Vector magnetic properties of soft magnetic composite material**, J. Magn. Magn. Mater. 302 (2006) 511–516.
- [35] E. Enescu, P. Lungu, S. Marinescu, P. Dragoi, **The effect of processing conditions on magnetic and electric properties of composite materials used in nonconventional magnetic circuits**, J. Optoelectron. Adv. Mater. 8 (2006) 745–748.
- [36] K. Asaka, C. Ishihara, **Technical trends in soft magnetic parts and materials**, Hitachi Powdered Metals Technical Report, No. 4, 3–9, 2005.
- [37] D.E. Gay, **Soft magnetic composite materials for AC electrical applications**, Metal Powder Rep. 52 (1997) 42–45.
- [38] H. Skarrie, Thesis Outline, **Design of Powder Core Inductors**, Printed in Sweden by Universitetstryckeriet, Lund University, Lund, 2001.
- [39] H. Shokrollahi, K. Janghorban, **The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites**, Mater. Sci. Eng. B 134 (2006) 41–43.
- [40] F.G. Hanejko, H.G. Phan, **Powder metallurgy materials for AC magnetic applications**, Presented at PM TEC, Washington, DC, 96World Congress, June 16–21, 1996.
- [41] PRIME, R.B.; “Thermosets” - **Thermal Characterization of Polymeric Materials**, 2<sup>a</sup> ed., Edith Turi – Academic Press, San Diego, Vol.2, p.1380-1736, 1997.
- [42] BRYANT, E.; **Crosslink Density and The Glass Transition in Thermosetting Polymers**, University of Dayton Papers, 2002.
- [43] BLANK, W.J.; **Polymer Fundamentals for Coatings**, King Industries Journal, Norwalk, 2002.
- [44] WILLIAMS, R.J.J.; **“Curing of Thermosets” – Developments in Plastics Technology**, Whelan & Craft – Elsevier Applied Science Publishers Ltd., London, Vol.2 p.339-376, 1985.

- [45] NEAG, C.M.; **Coatings Characterization by Thermal Analysis**, ASTM Manual 17, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, p.841-863, 1995.
- [46] BROCK, T.; GROTEKLAES, M.; MISCHKE, P.; **European Coatings Handbook**, Ulrich Zorll – Vincentz Verlag, Hannover, 2000.
- [47] CARVALHO, A.; **Como Medir a Cura. Cura e Pós-Cura de Resinas Poliéster e Viniléster**, São Paulo, p.207-218, 2002.
- [48] LENEL, F.V. **Magnetic Applications**. Metals Handbook, v.7, 1984. p.638-641.
- [49] BAS, J. A., PUIG, J., MOLINS, C.B. **Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art**. Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey. Metal. Powder Industries Federation, v.18, 1988. p.745-756.
- [50] JANSSON, P. **Soft Magnetic Materials for A.C. Applications**. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992.
- [51] J.S. Barboza, L. Schaeffer, L.L. Cerva, J.A.E. Lewis, M.M. Dias. **Comparative study of the mechanical properties of sintered magnetic alloys applied to electrical machines' core**, Powder Technology 192 (2009) 12-15.
- [52] SOUZA, Sérgio Augusto. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos: Fundamentos teóricos e práticos**. 5ed. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1982.
- [53] Hengyi Ma, Genshuan Wei, Yiqun Liu, Xiaohong Zhang, Jianming Gao, Fan Huang, Banghui Tan, Zhihai Song, Jinliang Qiao. **Effect of elastomeric nanoparticles on properties of phenolic resin**. Polymer. 46 (2005) 10568-10573.
- [54] ASM Handbook. Volume 8. **Mechanical Testing and Evaluation**. ASM International. 2000.
- [55] Y.G. Guo, J.G. Zhu, P.A. Watterson, W. Wu. **Comparative study of 3D flux electrical machines with soft magnetic composite core**, IEEE Trans. Ind. Appl. 39 (2003) 1696-1703.