

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

ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS

VANESSA ISABEL DO SANTOS RODRIGUES

Dissertação para obtenção do título
de Mestre em Engenharia

Porto Alegre - RS

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

ELABORAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS

VANESSA ISABEL DO SANTOS RODRIGUES

Engenheira Química

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

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2009

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração ciência dos materiais e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela banca examinadora do curso de Pós-Graduação.

Orientadora: Prof^a Dr^a Célia de Fraga Malfatti

Banca examinadora:

- 1- Profa. Dra. Claudia Trindade Oliveira - Feevale
- 2- Profa. Dra. Feliciane A. Brehm - Unisinos
- 3- Prof. Dr. Hugo Marcelo Veit – DEMAT/PPGEM/UFRGS

Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann
Coordenador do PPGEM

"O que pensais, passais a ser."

Gandhi

Dedico esta conquista a meus pais, meus irmãos e ao meu esposo Ronaldo
por todo o apoio incondicional...

AGRADECIMENTOS

A todas as pessoas que colaboraram direta ou indiretamente na elaboração deste trabalho, o meu reconhecimento.

À minha orientadora, Prof^a Célia de Fraga Malfatti pela orientação valorosa durante todo o percurso e pela amizade.

Aos colegas da GKN Fabiano Spindola, Irno Seco pelo apoio no desenvolvimento para aplicação do projeto em escala industrial.

Ao colega do LAMEF Leandro Costa pelas análises de caracterização mecânica.

Aos colegas do GDER Luciano Cerva e Juliano Barboza pela ajuda nas análises magnéticas.

Aos bolsistas de iniciação científica Matias De Angelis Korb, Grace Oliveira e ao mestrando Felipe Wu pela grande ajuda durante a execução desse trabalho.

Ao colega do LACOR Tiago Menezes pelo fundamental apoio a esse trabalho.

SUMARIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	OBJETIVOS.....	4
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
3.1.	Tratamento térmico.....	5
3.1.1.	Processo de têmpera:	6
3.1.1.1.	Têmpera por indução	7
3.1.1.2.	Eficiência da Têmpera por indução	8
3.2.	Concentradores de Fluxo magnético:	9
3.2.1.	Lâminas de concentrador de fluxo:.....	12
3.2.2.	Eletrólitos baseados em compostos de ferro.....	12
3.2.3.	Carbonetos baseados em compostos de ferro.....	13
3.2.4.	Ferritas puras e materiais baseados em ferritas	13
3.2.5.	Materiais magnéticos moles.....	13
3.2.5.1.	Ferrotron 559 [®]	14
3.3.	Magnetismo	15
3.3.1.	Campo eletromagnético gerado por um toróide	16
3.3.2.	Curva de histerese	18
3.3.3.	Magnetização	19
3.3.4.	Perdas magnéticas.....	22
3.3.5.	Permeabilidade magnética X classificação magnética	24
3.3.5.1.	Antiferromagnético	24
3.3.5.2.	Ferrimagnético	25
3.3.5.3.	Diamagnéticos.....	25
3.3.5.4.	Paramagnéticos	26

3.3.5.5.	Ferromagnético	26
3.3.6.	Classificação dos materiais Ferromagnéticos e Ferrimagnéticos...	27
3.3.6.1.	Materiais magnéticos moles	27
3.3.6.2.	Materiais magnéticos duros.....	28
3.3.7.	Propriedades Eletromagnéticas.....	29
3.3.7.1.	Propriedades intrínsecas.....	29
3.3.7.2.	Propriedades Extrínsecas	30
3.3.8.	Parâmetros que influenciam nas propriedades magnéticas e mecânicas	30
3.3.8.1.	Temperatura.....	30
3.3.8.2.	Defeitos estruturais e tamanho de partícula.....	31
3.3.8.3.	Pressão de compactação e características das partículas...	33
3.3.8.4.	Adição de resina.....	37
3.4.	Matrizes poliméricas	39
3.4.1.	Resina Epóxi	40
3.4.2.	Resina Fenólica.....	40
4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	41
4.1.	Caracterização do resíduo	41
4.1.1.	Caracterização ambiental:.....	41
4.1.2.	Caracterização quanto à morfologia e granulometria	41
4.1.3.	Caracterização quanto à composição	41
4.2.	Elaboração do compósito magnético	42
4.3.	Caracterização do compósito magnético	47
4.3.1.	Caracterização física e morfológica.....	47
4.3.2.	Caracterização quanto ao comportamento térmico	48
4.3.3.	Caracterização quanto ao comportamento mecânico	49
4.3.3.1.	Dureza Brinell.....	49

4.3.3.2.	Resistência à compressão	49
4.3.4.	Caracterização quanto ao comportamento magnético	50
4.3.5.	Caracterização quanto à resistividade.....	52
4.3.6.	Análise financeira para elaboração dos compósitos.....	53
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	54
5.1.	Caracterização do resíduo	54
5.1.1.	Caracterização Ambiental	54
5.1.2.	Caracterização quanto à morfologia e granulometria	56
5.1.3.	Caracterização quanto à composição	58
5.2.	Caracterização do compósito magnético:	59
5.2.1.	Caracterização ambiental.....	59
5.2.2.	Caracterização morfológica e física.....	61
5.2.3.	Caracterização quanto ao comportamento térmico	66
5.2.4.	Caracterização quanto ao comportamento mecânico	68
5.2.4.1.	Resistência à compressão e dureza	69
5.2.5.	Caracterização quanto ao comportamento magnético	70
5.2.6.	Análise Financeira:	74
5.	CONCLUSÃO	75
6.	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	76
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática dos componentes do sistema de tempera por indução ⁽⁹⁾	9
Figura 2 : Modelagem computacional da distribuição da corrente elétrica e do campo magnético na bobina: a) Distribuição em um condutor isolado; b) Redistribuição em um condutor próximo a uma peça condutora; c) Concentrador colocador em torno da peça (praticamente toda a corrente da bobina é concentrada na superfície) e d) Redução do potencial da bobina ⁽¹⁾	10
Figura 3: Curva de histerese e de magnetização típica para um material magnético mole usado como concentrador de fluxo ⁽¹⁾	11
Figura 4 – Lâminas de silício empregadas como concentrador de fluxo ⁽¹⁾	12
Figura 5 : Bobina Toroidal ⁽¹⁾	16
Figura 6 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético ⁽²⁰⁾	18
Figura 7 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial. ⁽²⁰⁾	19
Figura 8 : a) Domínios desalinhados b) Domínios alinhados ⁽¹⁾	20
Figura 9 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H ⁽²⁰⁾	21
Figura 10 – Magnitude do campo magnético para materiais: diamagnético, paramagnéticos e ferromagnéticos ⁽¹⁹⁾	26
Figura 11: Ciclo de histerese para material magnético duro e macio ⁽²⁰⁾	29
Figura 12 : Efeito do tamanho da partícula na permeabilidade inicial ⁽³⁹⁾	32
Figura 13: Efeito da pressão na densidade do material ⁽³⁹⁾	36
Figura 14 : Efeito da pressão de compactação na formação de micro-tensão e nas forças coercivas ⁽¹⁾	36
Figura 15 : Efeito do tempo de tratamento térmico na formação de micro tensões e nas forças coercivas – Pressão de compactação de 980 MPa e temperatura 200°C ⁽¹⁾	37
Figura 16 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾	45
Figura 17 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾	45
Figura 18: (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾	45
Figura 19 : Processo de elaboração do compósito	47
Figura 20 - Curva TGA e sua derivada, DTG.	48
Figura 21: Máquina Universal de Ensaios Mecânicos INSTRON. (a) Equipamento e captação de dados, (b) detalhe do dispositivo de ensaio.....	49

Figura 22 : Amostras para ensaio de compressão: a) amostra original b) compósito com 3% resina HRJ10236 [®] c) compósito com 3% resina CR2001 [®]	50
Figura 23 : Amostra e equipamento para ensaio de magnetização	51
Figura 24 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento primário, (c) isolamento e (d) enrolamento secundário ⁽²⁰⁾	52
Figura 25 : Resíduo de (Ferrotron [®]): a)resíduo bruto b) moído passante na peneira de 20# c) moído passante na peneira de 35# d) moído passante na peneira de 60# e) moído passante na peneira de 80# f) moído passante na peneira de 140#	56
Figura 26 : Distribuição granulométrica do resíduo moído passante na peneira de 140# (Figura 25f).....	57
Figura 27: Difratoograma do resíduo de material magnético (Ferrotron [®]).....	58
Figura 28: Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron	61
Figura 29: Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron	62
Figura 30: Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron	63
Figura 31: Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron	64
Figura 32:Análise por EDS na região da fratura do Compósito Ferrotron+ 3% resina HRJ região da fratura	65
Figura 33 - Curva TGA e sua derivada, DTG para a amostras de Ferrotron [®] + HRJ	66
Figura 34 - Curva TGA e sua derivada, DTG para a amostra: Ferrotron [®] + CR2001	67
Figura 35 - Curva TGA e sua derivada, DTG para amostra de Ferrotron [®] ...	68
Figura 36: Diagrama tensão x deformação	69
Figura 37: Curva de histerese do material original e do material com resina em freqüência 60Hz	72
Figura 38: Curva de magnetização amostra original e amostra com resina em freqüência 60Hz	72

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 : Modelos de Ferrotron® X Consumo	3
Tabela 2: Características Físicas do Ferrotron®559 ⁰	14
Tabela 3: Temperatura de Curie	31
Tabela 4 : Relação parâmetros X propriedades	39
Tabela 5 : Especificação técnica da Resina CR2001 [®]	43
Tabela 6: Especificação técnica da resina HRJ-10236 [®]	44
Tabela 7: Análise de lixiviação	54
Tabela 8: Análise de Solubilização.....	55
Tabela 9 : Análise de lixiviação compósito.....	60
Tabela 10 : Análise de solubilização compósito.....	60
Tabela 11 : Resultados de densidade	65
Tabela 12 : Resultados dos ensaios de compressão e dureza	69
Tabela 13 : Resultados de permeabilidade magnética e perdas em freqüência de 60Hz.....	73
Tabela 14: Resultados de permeabilidade magnética e perdas em freqüência de 400Hz.....	73
Tabela 15 : Resultados e resistividade elétrica	73
Tabela 16: Análise de custo	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

F – frequência do campo aplicado, Hz

μ - permeabilidade magnética

T_C - temperatura de Curie

B - Indução magnética, T

H_c - Coercitividade magnética ou força coercitividade, 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- Número de espiras no enrolamento primário

L - Comprimento, mm

ATG - Análise Termogravimétrica

MEV - Microscopia Eletrônica de Varredura

EDS - *Energy Dispersion Spectroscopy*

RESUMO

O processo de têmpera por indução é utilizado quando se deseja obter um material que tenha uma superfície com: alta resistência ao desgaste, elevada resistência mecânica e alta resistência à fadiga. Neste processo ocorre alteração das propriedades da superfície sem a modificação das propriedades do núcleo da peça, já que o último não atinge a temperatura necessária para sofrer modificações. É um processo muito utilizado, pois é rápido e apresenta baixo custo em comparação a outros tratamentos térmicos, permitindo também que seja realizada a têmpera em regiões específicas das peças. Neste tipo de têmpera o material é aquecido por um campo magnético gerado por uma corrente alternada de alta frequência que passa através de um indutor (bobina de cobre resfriada a água). O campo gerado depende da resistência do material e do número de voltas da bobina. Normalmente para melhorar a eficiência do processo (reduzir tempo de operação e consumo de energia) são utilizados junto à bobina orientadores de fluxo magnético que são materiais magnéticos moles. Esses orientadores de fluxo magnético são constituídos basicamente de componentes ferromagnéticos e um ligante dielétrico. Em alguns processos industriais o ajuste dimensional desse tipo de ferramenta, a partir do processo de usinagem, acaba gerando perda de matéria prima e produção de resíduo. Neste trabalho, foi realizada a elaboração de um compósito de matriz polimérica a partir do resíduo oriundo do processo de ajuste dimensional de concentradores de fluxo. Para elaboração desse compósito o resíduo foi moído (ficando passante em peneira 140#) e misturado com dois tipos diferentes de resinas fenólicas (HRJ e CR2001) na concentração de 3%. Os compósitos magnéticos obtidos foram caracterizados quanto à morfologia, propriedades mecânicas, propriedades magnéticas, propriedades elétricas e caracterização ambiental. Os resultados obtidos mostraram que os compósitos apresentaram redução das propriedades magnéticas e mecânicas comparativamente ao material original. No entanto, o material continuou apresentando potencial para uso como concentrador de fluxo, visto que foi observada a redução das perdas magnéticas.

ABSTRACT

The induction heating treatment process is used when it is necessary to obtain high wear resistance, high mechanical strength and high resistance to fatigue on the surface of the materials. This process changes the surface properties without changing the properties of the nucleus. It is a process widely used because it is fast and offers low cost compared to other heat treatments, besides allowing the heating treatment in specific parts of the components. In this type of heating treatment, the material is heated by a magnetic field generated by a high frequency alternating current that passes through an inductor. The field generated depends on the strength of the material and the number of turns of the coil. To improve the efficiency of the process (reduce operating time and power consumption), it is usually used a magnetic flux concentrator which is constituted by soft magnetic materials. This magnetic flux concentrator consists essentially of ferromagnetic components and a dielectric binder. In some industrial processes the dimensional adjustment of this tool, can eventually cause loss of raw material and production of waste. The aim of this work was the elaboration and characterization of a magnetic composite of polymeric matrix from the waste generated by the dimensional adjustment of the concentrators flow. To prepare the magnetic composite, the magnetic waste was ground (passing # 140 sieve) and mixed with two different types of phenolic resin (HRJ and CR2001) at a concentration of 3%wt. The magnetic composites obtained were characterized according to morphology, mechanical properties, magnetic properties, electrical properties and environmental characterization. The results showed that the composites presented a reduction of magnetic and mechanical properties compared to the original material. However, it was observed the reduction of magnetic losses, for the magnetic composite obtained, highlights the potential of this composite for the use as a magnetic flux concentrator.

1. INTRODUÇÃO

A partir do processo de têmpera por indução é possível obter um material que tenha uma superfície com elevada resistência mecânica e resistência ao desgaste, associada a um núcleo dúctil. Isso ocorre porque o processo de alteração das propriedades da superfície acontece sem a modificação das propriedades do núcleo, já que o último não atinge a temperatura necessária para sofrer modificações. Além disso, esse é um processo rápido e de baixo custo, em comparação a outros tratamentos térmicos, o qual permite que a têmpera seja realizada em regiões específicas das peças. Neste tipo de têmpera o material é aquecido por um campo magnético gerado por uma corrente alternada de alta frequência que passa através de um indutor (bobina de cobre resfriada a água). Normalmente, para melhorar a eficiência do processo (reduzir tempo de operação e consumo de energia), são utilizados junto à bobina orientadores de fluxo magnético que são materiais magnéticos moles. Esses orientadores de fluxo magnético são constituídos basicamente de componentes ferromagnéticos e um ligante dielétrico.

Os orientadores de fluxo magnético, geralmente apresentam como propriedades, baixa coercividade e valores elevados de permeabilidade magnética, resistividade elétrica e condutividade térmica ^(1, 2). Os valores elevados de resistividade elétrica e condutividade térmica reduzem respectivamente as perdas por corrente de Foucault e permitem um controle do aumento da temperatura do material, o que ajuda a aumentar a vida útil do componente devido à redução da tendência ao superaquecimento em determinadas regiões ⁽¹⁾. Esses materiais, geralmente são constituídos por elementos como: Fe, Ni e Co puros ou em ligas, os quais são ferromagnéticos em condições de temperatura e pressão normal ⁽³⁾. Nesses elementos a banda 3d (3 e 5 eV) de condução não está totalmente preenchida, mas polarizada, resultando em duas sub-bandas de spins opostas (*spin up e down*) ⁽³⁾, que geram momentos magnéticos atômicos que são responsáveis pelos momentos magnéticos permanentes ⁽²⁾. Todo esse fenômeno de magnetização pode ser explicado em termos de estrutura de domínio. No momento em que é aplicado um campo magnético o mesmo

vai sendo modificado, predominantemente por dois mecanismos: movimentos das paredes de domínios e rotação da magnetização ⁽⁴⁾. Durante esse processo podem ocorrer perdas devido a defeitos no material, tais como, presença de grão em materiais semi-cristalinos, discordâncias e deformações na rede, flutuações na composição, presença de inclusões, precipitados, impurezas, vazios ou tensões localizadas ^(4, 5). Tais defeitos podem gerar o aprisionamento e posterior desaprisionamento das paredes de domínios magnéticos durante o seu movimento ⁽⁴⁾, ou seja, os mesmos criam restrições aos movimentos das paredes do domínio, e dessa forma aumentam a coercividade do material ⁽²⁾. Além desses fatores mencionados, as propriedades magnéticas também podem ser influenciadas pelas características originais do material (das partículas), tais como, tamanho e distribuição de partícula, grau de aglomeração das mesmas. Essas características têm uma profunda influência na densificação e na microestrutura do material ⁽⁶⁾.

Todas essas variáveis citadas estão considerando unicamente alterações causadas devido às propriedades das partículas, mas quando se trabalha com materiais compósitos existe a influência do material constituinte da matriz, nas propriedades magnéticas e mecânicas. É desejável que ocorra uma forte interação entre o material que será incorporado e a matriz, de modo que o determinante das características do material, não seja somente a matriz. Geralmente são utilizadas matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas. Contudo, é preciso considerar que a resistência à fratura por impacto dos materiais poliméricos é menor do que a dos metais e os cerâmicos. Dentre todas as resinas, a epóxi é a que possui melhores propriedades mecânicas, mas se seus compósitos forem influenciados somente por suas características, ainda são considerados frágeis. Esta baixa resistência ao impacto é devido a sua característica vítrea originada por uma rede rígida de ligações cruzadas ⁽⁷⁾. As resinas fenólicas também possuem uma resistência mecânica boa, e além disso, apresentam como vantagem a elevada resistência ao calor. Quanto às propriedades magnéticas sabe-se que a adição de resinas reduz a permeabilidade do material, dependendo da sua concentração no compósito.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo a elaboração e caracterização de compósitos magnéticos obtidos a partir do resíduo de material magnético oriundo do processo de ajuste dimensional (por usinagem) do concentrador de fluxo magnético empregado no processo de têmpera por indução. Os orientadores de fluxo magnético são comercializados com geometria padrão determinada para uma fácil e rápida instalação. Contudo, em alguns equipamentos empregados para os processos de têmpera por indução, os mesmos necessitam de ajustes dimensionais (usinagem) para serem acoplados à bobina.

No ano de 2008 foram consumidas 112 peças de Ferrotron® 559, e gerados aproximadamente 12 kg de resíduo por mês em uma indústria automotiva. O aproveitamento do resíduo reduziria o impacto ambiental, uma vez que seria eliminado o descarte do mesmo e reduzido o consumo de matéria prima (redução de consumo de recurso natural). Atualmente são utilizados 4 modelos de Ferrotron® 559 (Tabela 1), de acordo com a dimensão necessária. Um dos modelos mais utilizado é o Ferrotron ®3"x2".

Tabela 1 : Modelos de Ferrotron® X Consumo

Material	Quantidade consumida /2008
Ferrotron 559 ¾" x ¾"	24
Ferrotron 559 4" x 1"	10
Ferrotron 559 2" x 2"	31
Ferrotron 559 3" x 2"	47

Para a realização do trabalho o resíduo foi caracterizado ambientalmente e quanto à sua morfologia e composição. Depois disso, os compósitos magnéticos de matriz polimérica foram elaborados com a adição de 3% em peso de uma resina fenólica (HRJ-10236) ou de uma resina fenólica modificada com epóxi (CR2001). Os compósitos obtidos foram caracterizados quanto à morfologia e quanto às propriedades magnéticas, mecânicas, elétrica e ambientais.

2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste estudo é a obtenção de compósitos magnéticos com matriz polimérica a partir do aproveitamento do resíduo de concentrador de fluxo e a caracterização desses compósitos para possível aplicação em processos de tempera por indução.

Para atingir o objetivo proposto, os seguintes objetivos específicos foram estabelecidos:

- 1) Caracterização do resíduo oriundo do ajuste dimensional do concentrador de fluxo;
- 2) elaboração do compósito magnético a partir do resíduo oriundo do ajuste dimensional do concentrador de fluxo;
- 3) caracterização morfológica do compósito magnético comparativamente ao material original (Ferrotron®) ;
- 4) caracterização magnética, térmica, ambiental, mecânica e elétrica do compósito magnético comparativamente ao material original (Ferrotron®).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. *Tratamento térmico*

Tratamento térmico é um conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controlada de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar suas propriedades ou conferir característica determinada. As propriedades dos aços dependem, em princípio, da sua estrutura. Os tratamentos térmicos modificam, em maior ou menor escala, a estrutura dos aços resultando, em consequência na alteração mais ou menos pronunciada, de suas propriedades. Cada uma das estruturas obtidas apresenta suas características próprias. Os principais objetivos do tratamento térmicos são:
(8)

- Remover as tensões internas (oriundas de esfriamento desigual, trabalho mecânico ou outra causa) ;
- aumentar ou diminuir a dureza;
- aumentar a resistência mecânica;
- melhorar a ductilidade;
- melhorar a usinabilidade;
- melhorar a resistência ao desgaste;
- melhorar as propriedades de corte;
- melhorar a resistência à corrosão;
- melhorar a resistência ao calor;
- modificar as propriedades elétricas e magnéticas

Para atingir com sucesso qualquer um desses objetivos citados é necessário controlar fatores que interferem na qualidade do processo. Uma vez que o tratamento térmico é um ciclo de tempo e temperatura, deve-se controlar os seguintes parâmetros ⁽⁸⁾: aquecimento, tempo de permanência na temperatura e taxa de resfriamento. Além desses, outro parâmetro de grande importância é a atmosfera de aquecimento, visto

que a sua característica tem grande influência sobre os resultados finais dos tratamentos térmicos. Os tratamentos térmicos usuais são: recozimento, normalização, têmpera, revenido, coalescimento e os tratamentos isotérmicos. Neste trabalho o resíduo empregado para a elaboração do compósito magnético provém do ajuste dimensional de concentradores de fluxo empregados no processo de têmpera por indução.

3.1.1. Processo de têmpera:

Consiste no resfriamento rápido do aço de uma temperatura superior à sua temperatura crítica em um meio como óleo, água, salmoura ou mesmo ar. A velocidade de resfriamento, nessas condições, dependerá do tipo de aço, da forma e das dimensões das peças. Como na têmpera o constituinte final desejado é a martensita, o objetivo dessa operação, sob o ponto de vista de propriedades mecânicas, é o aumento da dureza. Resultam também da têmpera a redução da ductilidade (baixos valores de alongamento e estrição), da tenacidade e o aparecimento de apreciáveis tensões internas. Tais inconvenientes são atenuados ou eliminados pelo processo de revenimento. A têmpera pode ser realizada para endurecimento mais profundo ou somente superficialmente. A têmpera superficial consiste na formação da estrutura martensítica apenas na superfície da peça, dando a essa região as propriedades dessa estrutura. Um processo de tratamento térmico bastante utilizado para obter essa tempera superficial é a têmpera por indução.⁽⁸⁾

3.1.1.1. Têmpera por indução

O tratamento térmico por indução é muito utilizado quando se deseja obter alteração das propriedades superficiais do metal preservando as propriedades do núcleo. Na maioria das aplicações, o tratamento térmico por indução é usado somente em partes selecionadas da peça. O processo é executado em tempo muito curto e com alta eficiência, porque a energia é aplicada somente na parte da peça onde o tratamento térmico é requerido. Isto promove alta produtividade, poucas distorções na geometria da peça. Além disso, o emprego desse processo permite o uso de pequeno espaço físico para instalação de equipamentos e gera benefícios ambientais. No aquecimento por indução convencional, todas as três maneiras de transferência de calor (condução, convecção e radiação) estão presentes, sendo que as transferências de calor por convecção e radiação refletem os valores de perda de calor. Um alto valor de perda de calor reduz a eficiência da bobina de indução. O tratamento térmico por indução eletromagnética é sem dúvida um dos mais efetivos processos de tratamento térmico para diversas aplicações, incluindo: têmpera total, têmpera superficial, revenido, alívio de tensões, recozimento, normalização. Neste processo o calor superficial é produzido por indução eletromagnética, através do uso de bobinas de cobre envolvendo a peça. A passagem de uma corrente alternada pelo indutor ou pela bobina de indução produz um campo magnético altamente concentrado. Cria-se assim um circuito fechado, onde o calor provém da resistência da própria peça à passagem da corrente induzida.⁽⁸⁾

A profundidade desejada para o tratamento é conseguida através do uso de correntes, desde alta frequência (para camadas mais finas) até de baixa frequência (para camadas mais espessas), em conjunto com outros fatores que também podem variar como a forma da bobina, o espaço entre a bobina e a peça, a taxa de alimentação da força, a frequência e o tempo de aquecimento.

Como o tempo de aquecimento na têmpera superficial por indução é muito curto, este processo deve ser utilizado com máxima precisão de tempo, onde, dependendo do tipo do aço, mais de três segundos de aplicação já podem levar a ocorrência fissuras no material. Atualmente, existem vários tipos de bobina para alta frequência. Um dos tipos consiste na solenóide para

aquecimento externo e também diferentes processos aplicados no aquecimento superficial por indução, destacando-se os seguintes ⁽⁸⁾:

- a) Têmpera simultânea, em que a peça a ser temperada é girada dentro da bobina. Uma vez atingido o tempo necessário para o aquecimento, a força é desligada e a peça imediatamente resfriada por um jato de água;
- b) Têmpera contínua, em que a peça, ao mesmo tempo que gira no interior da bobina de indução, move-se ao longo do seu eixo, de modo a se ter uma aplicação progressiva de calor. O dispositivo de resfriamento está montado a certa distância da bobina.

3.1.1.2. Eficiência da Têmpera por indução

O fluxo magnético é produzido por corrente elétrica que passa por uma bobina colocada perto da direção da carga.

O excesso de energia produzida pela energia de aquecimento é transferida para peça, e é uma medida da eficiência de todo processo de indução. A Figura 1 representa a magnitude dessas ineficiências. O objetivo de qualquer *design* de sistema de têmpera por indução é maximizar a proporção de energia produzida versus energia transferida e minimizar os custos de operação dos processos de tempera por indução ⁽⁹⁾. Para atingir esses objetivos geralmente são utilizados os concentradores de fluxo magnético.

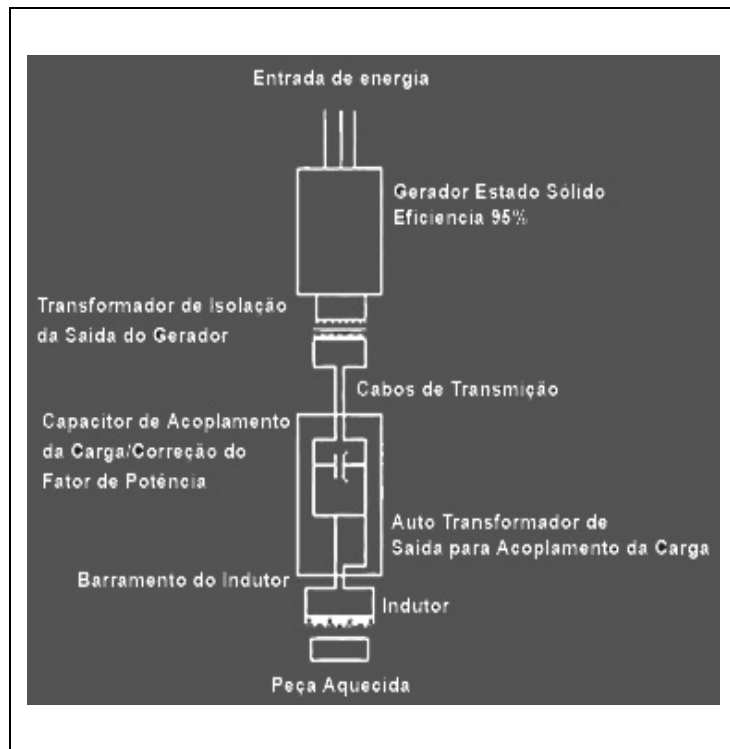


Figura 1: Representação esquemática dos componentes do sistema de tempera por indução ⁽⁹⁾

3.2. Concentradores de Fluxo magnético:

Muitos materiais magnéticos podem ser usados para melhorar as perdas energéticas ou concentrar o fluxo magnético, dependendo do efeito desejado. Esses concentradores trabalham de forma a deixar o fluxo magnético mais intenso em determinadas áreas durante o processo de aquecimento ⁽¹⁰⁾. Sem um concentrador, o fluxo magnético espalha-se em torno da bobina ou do condutor carregado eletricamente, não dando forma e trajeto magnético para canalizar o fluxo magnético. Essa distribuição da corrente em um condutor isolado, sem o concentrador, é representada na Figura 2, (a), quando próximo ao mesmo é colocada uma peça condutora Figura 2 (b), em que a corrente do condutor irá fluir próximo a superfície das faces carregadas. O balanço da corrente será concentrado no lado do condutor. Já quando um concentrador de fluxo é colocado próximo à peça (Figura 2 (c)) praticamente toda corrente da bobina será concentrada na superfície aberta.

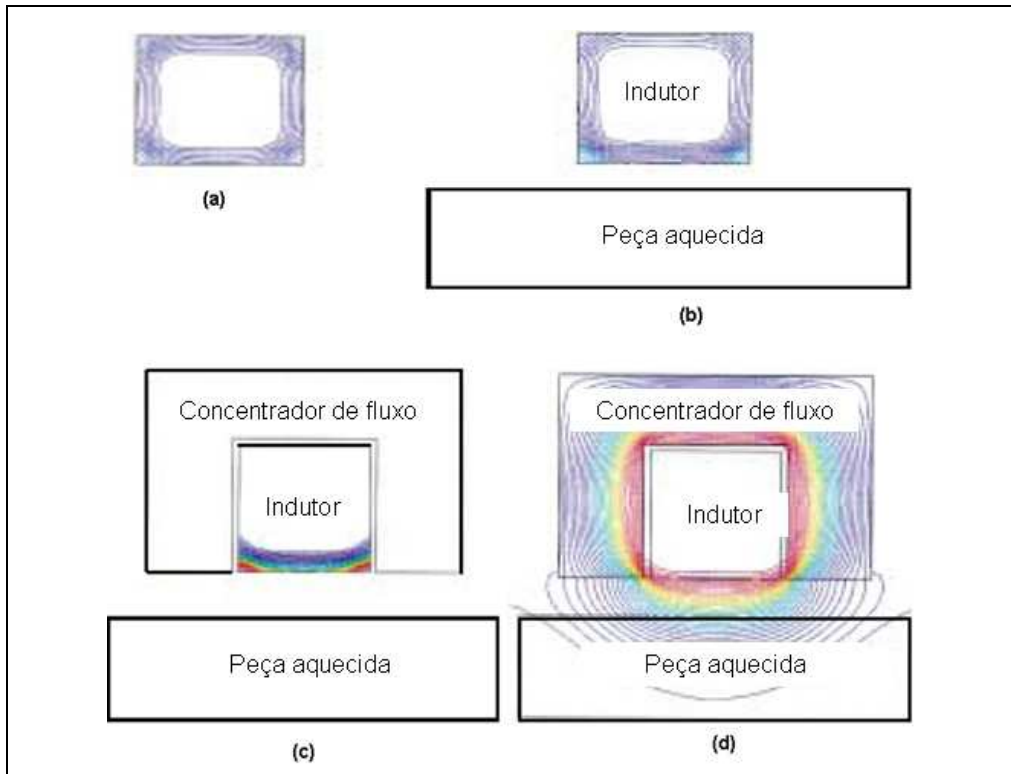


Figura 2 : Modelagem computacional da distribuição da corrente elétrica e do campo magnético na bobina: a) Distribuição em um condutor isolado; b) Redistribuição em um condutor próximo a uma peça condutora; c) Concentrador colocado em torno da peça (praticamente toda a corrente da bobina é concentrada na superfície) e d) Redução do potencial da bobina ⁽¹⁾

Esses concentradores possuem como características: alta permeabilidade magnética e baixas perdas energéticas, sendo utilizado não somente em processos de têmperas por indução, mas também em transformadores de energia e motores, em que sua curva de histerese é caracterizada em ser alta e estreita, possuindo uma pequena área ⁽¹¹⁾ (Figura 3).

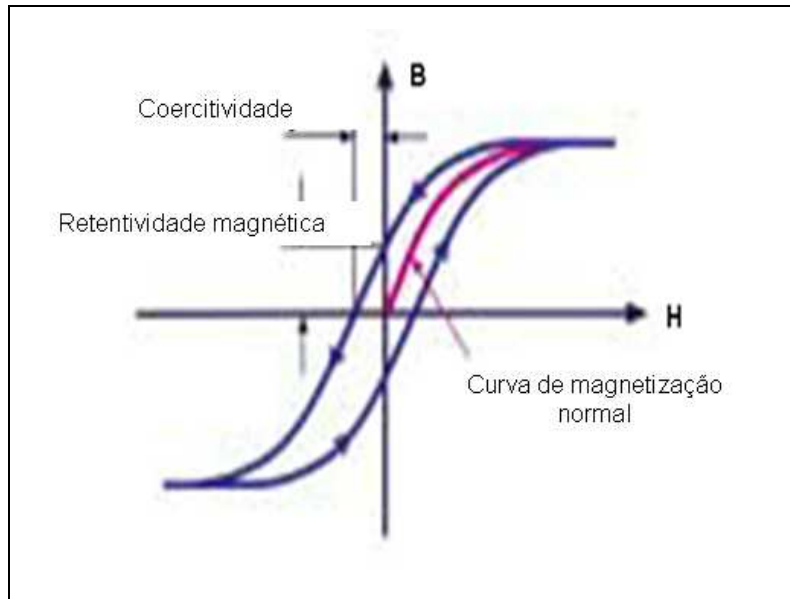


Figura 3: Curva de histerese e de magnetização típica para um material magnético mole usado como concentrador de fluxo ⁽¹⁾

São constituídos de metais tais como Fe, Ni, Co e outros elementos. Em processos de tratamento térmico por indução geralmente são usados materiais magnéticos moles com estrutura uniforme, baixa anisotropia e domínios magnéticos randômicos. Este tipo de arranjo corresponde a uma configuração mínima de energia quando os efeitos dos domínios magnéticos cancelam um ao outro ⁽¹⁰⁾.

As composições mais comuns desses concentradores magnéticos são:

- Lâminas de concentrado de fluxo
- Eletrólitos baseados em compostos de ferro;
- Carbonetos baseados em compostos de ferro;
- Ferritas puras e materiais baseados em ferritas;
- Materiais magnéticos moles;

3.2.1. Lâminas de concentrador de fluxo:

Estes materiais têm sido adaptados para uso em tratamento térmico de motor e indústria de transformação. Neste caso usam-se grãos magnéticos orientados de ligas de níquel-ferro e ou ferro-silício ⁽¹⁰⁾. Para baixas freqüências (até 30Hz) pode-se usar lâminas de aço.

O concentrador de fluxo é constituído por várias laminas (Figura 4) colocadas uma ao lado da outra, por isso torna-se obrigatório o uso de um isolante elétrico entre elas que são geralmente revestimentos orgânicos e minerais. A espessura desse tipo de concentrador é de 0,06 até 0,8 mm. Em comparação a outros materiais de concentradores de fluxo magnético, esse possui uma alta permeabilidade magnética e fluxo de saturação ⁽¹⁰⁾, além disso, tem baixo custo, sendo dessa forma uma vantagem para uso dessas chapinhas. Como desvantagem em relação aos outros tipos de materiais usados tem-se a questão da degradação, pois os mesmos não são resistentes aos fluidos de refrigeração usados.



Figura 4 – Lâminas de silício empregadas como concentrador de fluxo ⁽¹⁾

3.2.2. Eletrólitos baseados em compostos de ferro

Esses concentradores foram desenvolvidos nas décadas de 80 e 90, especificamente para aplicação em têmpera por indução. Os mesmos podem ser usinados em diversos tamanhos e são classificados em dois tipos de liga com permeabilidade relativa acima de ($\mu = 56$) ⁽¹⁰⁾. Algumas ligas são para altas freqüências (50 kHz a 450 kHz) e outras para baixas freqüências (50 Hz

a 50KHz)⁽¹⁰⁾. Eles não se degradam com o uso e são facilmente colocados no sistema de bobinas.

3.2.3. Carbonetos baseados em compostos de ferro

Esses materiais também são usados na têmpera por indução, sendo os mesmos produtos desenvolvidos pela indústria do rádio em 1960. Eles também são facilmente usinados (possuem em sua composição um alto teor de polímero), porém tem tamanhos muito pequenos e baixa permeabilidade ($\mu = 15$). O material possui uma resistência à temperatura similar aos outros dois materiais citados nos itens 3.2.1 e 3.2.2 (eletrólitos e lâminas), porém é facilmente atacado por ácido.

3.2.4. Ferritas puras e materiais baseados em ferritas

As ferritas puras ou materiais à base de ferrita são estruturas cerâmicas densas produzidas de uma mistura de óxido de ferro com óxidos ou carbonatos de um ou mais metais de níquel, zinco ou magnésio. No seu processo de fabricação os mesmos são prensados, queimados no forno em alta temperatura e por fim usinados de acordo com a geometria da bobina. Quando avalia-se a ferrita em campo magnético fraco a mesma possui uma alta permeabilidade magnética ($\mu = 2000$), porém possui baixa densidade de saturação e baixo ponto de Currie ($T_c \approx 220^\circ\text{C}$). Já em relação às propriedades mecânicas, as ferritas têm a desvantagem de apresentarem um comportamento típico de material frágil, sendo dessa forma difíceis de usar, com baixa resistência a choques térmicos.

3.2.5. Materiais magnéticos moles

Alguns concentradores são produzidos por materiais magnéticos moles (exemplo Alphaform), sendo facilmente moldados e usinados. Também são conhecidos como materiais magnetodielétricos (MDMs).

Esses materiais são compósitos de micropartículas de ferro isoladas, polímero e um catalisador de sensibilidade térmica. O polímero é utilizado

como isolante elétrico das partículas ferromagnéticas individual e garante a integridade dos materiais ⁽¹²⁾.

Esse material é conhecido comercialmente como Fluxtrol family[®], produzido pela indústria Fluxtrol Manufacturing Inc. Dentro dessa família existem cinco materiais principais: Ferrotron 559[®], Fluxtrol 25[®], Fluxtrol 50[®], Fluxtrol A[®] e Fluxtrol 150[®] ⁽¹²⁾.

3.2.5.1. Ferrotron 559[®]

Ferrotron 559[®] (Tabela 2) possui altíssima resistividade elétrica e é um material designado para uso em aplicações de alta frequência (50 KHz a 3MHz) que solicitem reduções de perdas magnéticas. Esse material tem permeabilidade inicial em torno de 16 e permeabilidade máxima próxima a 18. O mesmo tem como propriedade uma alta estabilidade em uma gama imensa de intensidade de campo magnético e frequência. A densidade de saturação é 1T.

Além disso, Ferrotron 559[®] é facilmente usinável, tem uma boa resistência à temperatura (250°C por longo período e 300°C por curto tempo)⁽¹³⁾.

Tabela 2: Características Físicas do Ferrotron[®]559 ⁽¹³⁾

Propriedades	Unidade	Valor
Densidade	g/cm ³	5.9
Frequência de operação	kHz	10-3000
Área de maior frequência	kHz	50-1000
Resistividade	kOhm.cm	>15

3.3. *Magnetismo*

O magnetismo pode ser definido como o fenômeno pelo qual certos materiais induzem ou mantêm uma força atrativa ou repulsiva sobre outros materiais. Apesar da complexidade que envolve os princípios e mecanismos básicos, que explicam tal fenômeno, é seguro afirmar que a fonte de magnetismo encontra-se na estrutura atômica ^(14, 15).

O elétron, cuja dinâmica é tratada especialmente pela mecânica quântica, gera o campo magnético mais simples por meio do movimento giratório em torno do seu próprio eixo em dois sentidos. Esta componente dinâmica, denominada de spin, ocorre simultaneamente com a revolução do elétron em torno do núcleo atômico. Os fundamentos da Física Quântica explicam os fenômenos ocorridos na estrutura atômica ⁽¹⁵⁾.

Nos elementos denominados de ferromagnéticos, tais como o ferro, níquel e cobalto, o movimento dos elétrons no orbital não contribui, de forma substancial, para o magnetismo observado. Desta forma, os átomos destas substâncias agem como um conjunto de minúsculos magnetos ⁽¹⁴⁾.

Uma concepção importante no magnetismo é considerar um átomo como sendo um anel de arame infinitesimal, que transporta corrente. Esse movimento gera um campo magnético, que é denominado de dipolo magnético. Por definição, dipolos magnéticos consistem de dois pólos magnéticos antagônicos e conjugados, que geram perturbações magnéticas acentuadas a seu redor, em incessante transmissão entre os referidos dipolos caracterizando o momento magnético ^(14, 16). Esta concepção possibilita a visualização do comportamento magnético dos átomos de uma maneira simplificada.

O momento magnético gerado pelo núcleo do átomo, por ser de uma ordem de grandeza de 10^{-3} do momento magnético do elétron, é desprezado e, portanto, o momento magnético de um átomo corresponde à soma dos momentos magnéticos de cada um dos elétrons, incluindo as contribuições tanto ao nível de orbital quanto de spin, considerando-se o cancelamento dos momentos. Uma boa aproximação para descrever o momento magnético de um sólido pode ser feita em termos de sua estrutura eletrônica ^(15, 17). A interação dos momentos magnéticos induzidos com um campo magnético

externo aplicado resulta nas propriedades magnéticas macroscópicas dos materiais ⁽¹⁷⁾.

3.3.1. Campo eletromagnético gerado por um toróide

Uma bobina toroidal (ou simplesmente, toróide) é um solenóide em forma de anel (Figura 5). Seu núcleo pode ser de ar ou de material ferromagnético. Geralmente as bobinas toroidais são feitas com núcleos de ferrita.



Figura 5 : Bobina Toroidal ⁽²⁴⁾

Os toróides são o tipo de bobinas capazes de proporcionar a maior concentração das linhas de campo magnético no seu núcleo, que é um caminho fechado para as linhas. A Equação 1 mostra a densidade de campo magnético no interior das espiras (no núcleo) de um toróide.

$$B = \frac{\mu N I}{2\pi r}$$

Equação 1

Onde:

B – densidade de campo magnético no interior do núcleo do toróide, [T];

μ - permeabilidade magnética do meio no interior das espiras do toróide (núcleo);

N – número de espiras da bobina toroidal;

I – intensidade de corrente no condutor da bobina, [A];

r – raio médio do toróide, [m].

Também pode ser demonstrado matematicamente que a densidade de campo magnético fora do núcleo de um toróide ideal, tanto na região externa como interna é NULO, pois como o núcleo tem forma circular ele é capaz de produzir um caminho magnético enlaçando todas as linhas de campo ⁽²⁴⁾.

Medições de características de comportamento de materiais magnéticos são, geralmente, feitas usando-se núcleos toroidais (toróide) pois eles são capazes de concentrar praticamente todas as linhas de campo.

3.3.2. Curva de histerese

A curva mostrada na Figura 6 é denominada de curva de histerese ou ciclo de histerese. O ponto em que a curva corta o eixo 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 em um circuito magnético fechado após a remoção do campo magnético externo aplicado. 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 reduzir a indução magnética até zero, ou seja, desmagnetizar. Outro fator importante na identificação dos materiais magnéticos é o produto energético $BH_{\text{máx}}$ que está associado com a densidade de energia armazenada no material (2, 18, 19, 20, 21).

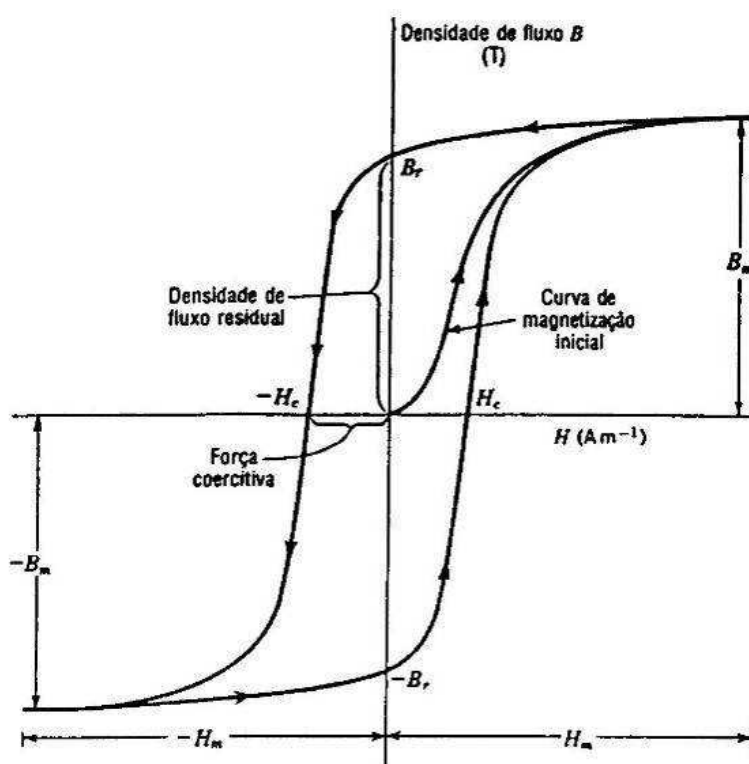


Figura 6 - Ciclo de histerese para um material ferromagnético (20).

3.3.3. Magnetização

Quando H é aumentado, o valor de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Nos valores suficientemente 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 7. A seção íngreme corresponde à condição de fácil magnetização, enquanto a seção plana corresponde à condição de difícil magnetização ^(20, 22).

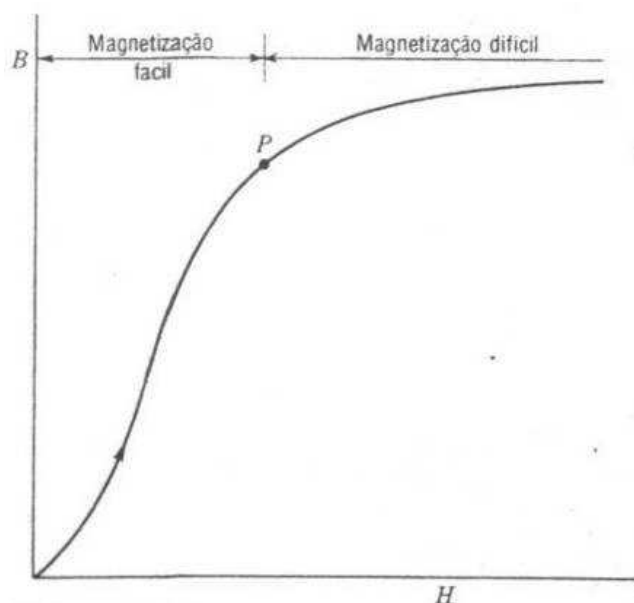


Figura 7 - Regiões de magnetização fácil e difícil da curva de magnetização inicial. ⁽²⁰⁾.

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 8. Os domínios magnéticos são pequenas regiões, na sua maioria com 1mm de largura ou comprimento, na qual se comportam como um pequeno ímã independente, com seus dois pólos dentro de um ímã maior. Estes domínios são separados

dos domínios adjacentes por uma camada de transição chamada de parede de domínio magnético ou parede de Bloch ⁽²³⁾.

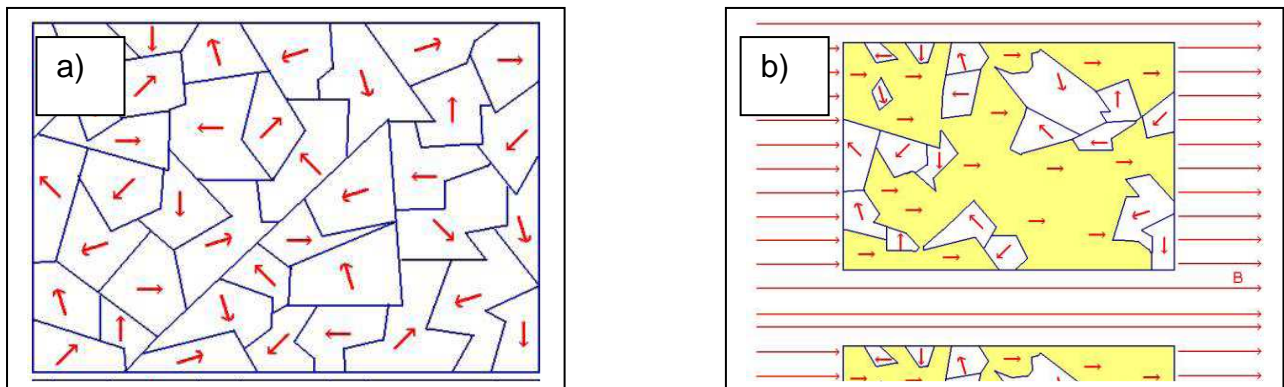


Figura 8 : a) Domínios desalinhados b) Domínios alinhados ⁽²⁴⁾

Em um material desmagnetizado, esses domínios estarão desalinhados, como mostra a Figura 8 a, ou seja, estão numa disposição aleatória. Os efeitos de um domínio cancelam o de outro e o material não apresenta um efeito magnético resultante. Quando esse material é colocado perante um campo externo, ocorre o alinhamento da maioria de seus domínios, como mostra a Figura 8 b. Na realidade ocorre um aumento daqueles domínios que se encontravam inicialmente em direções próximas ao do campo em detrimento daqueles domínios que apresentavam em direções opostas, estes últimos reduzindo de tamanho ⁽²⁴⁾. As regiões de domínios magnéticos se formam naturalmente abaixo da temperatura de Curie, T_C . Abaixo dessa temperatura (T_C) o material apresenta uma magnetização intrínseca, acompanhada do surgimento da energia de anisotropia e da formação elástica provocada pelo fenômeno de magnetoestricção. Isto gera uma grande desordem no sistema aumentando a energia. Enquanto o material estiver com seus domínios alinhados ele age como um ímã. No momento que o campo magnético é afastado os domínios se desalinham, e o material perde o efeito magnético.

O surgimento dos domínios magnéticos é a forma que o sistema tem para alcançar o estado de equilíbrio.

A permeabilidade relativa máxima está relacionada com o ponto da curva de magnetização onde a relação B e H é máxima e é designada por $\mu_{m\acute{a}x}$. O valor da permeabilidade relativa máxima é determinado a partir da

relação entre as curvas de magnetização (Figura 9a) e permeabilidade (Figura 9b) como mostra a Figura 9^(20, 22).

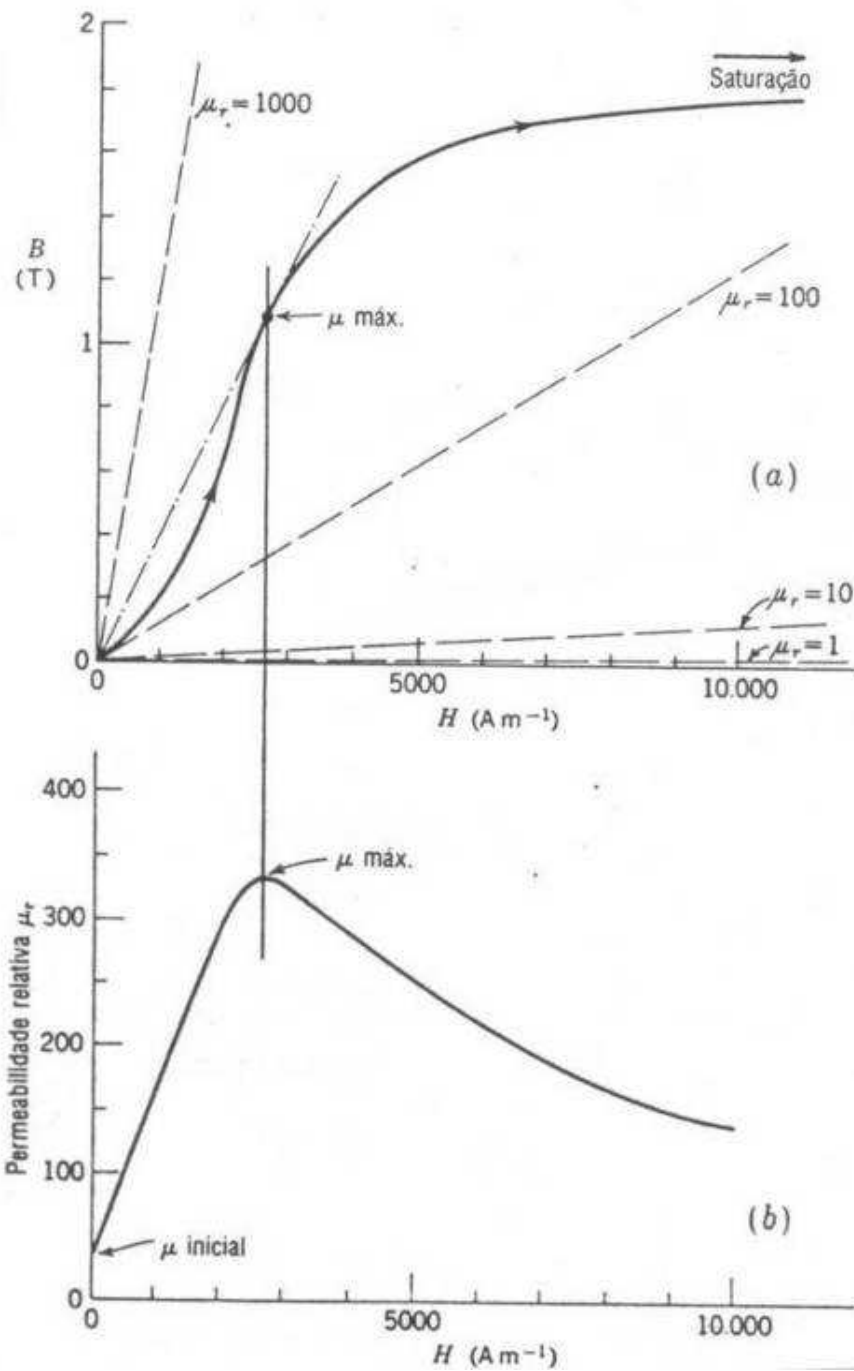


Figura 9 - (a) Curva de magnetização típica, (b) relação correspondente entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado H ⁽²⁰⁾.

3.3.4. Perdas magnéticas

As perdas magnéticas dividem-se em:

Perdas por correntes parasitas: São induzidas no núcleo da peça , devido ao fato de que o mesmo é normalmente, de material ferromagnético. As perdas devido as correntes parasitas de Foucault produzem calor pela ação das correntes (parasitas) que são induzidas nas lâminas de ferro-silício.

Essas correntes parasitas induzidas possuem a liberdade de circular pela superfície do material, sendo limitadas apenas pela resistência elétrica do material magnético. Portanto o quadrado da intensidade das correntes parasitas multiplicado pelo valor da resistência do caminho estabelecido por elas produz calor devido ao efeito Joule ⁽²⁵⁾. O calor produzido é indesejável. O ideal será eliminar ou mesmo atenuar a ação deste calor. As perdas por corrente parasita podem ser calculadas pela Equação 2.

$$P_F = 2,2 f^2 B^2 d^2 10^{-3}$$

Equação 2

Em que:

P_F = perdas parasitas

f = Frequência de ensaio em Hz

B = Indução máxima de ensaio em T

d = densidade em Kg/m³

Para a redução dessas perdas uma das providências necessárias é a diminuição da espessura das chapas. Resultados muito satisfatórios foram obtidos submetendo o material aos processos de laminação, o produto final eram finas lâminas de material magnético de tal forma a não haver comprometimento nas características mecânicas exigidas ao material. Outra providência refere-se ao fato de que a adição de silício ao aço provoca um aumento da resistividade do material e conseqüentemente um aumento da resistência elétrica do material. Uma última providência pode ainda ser adotada, e consiste no isolamento entre as lâminas do pacote magnético.

Essas medidas resultam em um aumento da resistência elétrica e conseqüentemente geram uma redução significativa nas correntes parasitas e uma redução quadrática das perdas por correntes de Foucault.

Perdas por histerese: Trabalho realizado pelo campo magnético gerado na bobina para obter o fluxo das correntes magnéticas . Expressa a dificuldade que o campo terá para orientar os domínios de um material ferromagnético. Essas perdas são causadas principalmente por movimentação e nucleação de paredes de domínio magnético. Sua intensidade depende de parâmetros microestruturais como discordâncias, tamanho de grão, inclusões não metálicas e textura ⁽²⁶⁾. Devido à deformação a qual o material microencapsulado foi submetido (durante a compactação), existe a necessidade de recuperar sua microestrutura, sendo necessário um tratamento térmico de recuperação ou recristalização. Este tratamento tem como objetivo reduzir as perdas histeréticas do material. Quando um material ferromagnético é exposto a um campo magnético alternado, à medida que esse campo vai aumentando, a indução também vai aumentando até atingir a saturação (B_s). A partir desse ponto, se o campo magnético for reduzido a zero, a indução vai diminuir até um valor denominado indução residual (B_r). Se o campo for aplicado no sentido inverso ao primeiro, a indução diminuirá até atingir o zero. O valor do campo em que isso ocorre é denominado campo coercivo (H_c). Se o campo continuar aumentando, a indução magnética atingirá novamente a saturação ($-B_s$). Completando-se um ciclo, tem-se uma curva chamada de curva de histerese. A área dessa curva representa as perdas totais do material em um ciclo. Quando o ensaio é realizado em corrente contínua, pode-se dizer que a área da curva é equivalente às perdas histeréticas.

3.3.5. Permeabilidade magnética X classificação magnética

Quando materiais não magnéticos são colocados na região das linhas de campo de um íma, ocorrerá uma imperceptível alteração nas linhas do campo. Esses materiais em geral são transparentes ao fluxo magnético, ou seja, seu efeito sobre as linhas de fluxo, são semelhantes ao do vácuo ou do ar. No entanto, se um material magnético, como o ferro, por exemplo, for colocado na região das linhas de campo, as mesmas passarão através do ferro ao invés de se distribuírem no ar ou ao seu redor, porque elas se concentram com maior facilidade nos materiais magnéticos.

Portanto, um material na proximidade de um ímã pode alterar a distribuição das linhas de campo magnético. Se diferentes materiais com as mesmas dimensões físicas são usados, a intensidade com que as linhas são concentradas varia. Esta variação se deve a uma grandeza associada aos materiais chamada Permeabilidade Magnética, μ . A Permeabilidade Magnética de um material é uma medida da facilidade com que as linhas de campo podem atravessar um dado material ⁽²⁴⁾. Esta propriedade que caracteriza o comportamento magnético conduz a uma diferenciação dos materiais em cinco grupos. Esta classificação é definida pela extensão da interação entre os dipolos magnéticos dos elétrons dos materiais sólidos com o campo magnético aplicado. Conforme o comportamento magnético, os materiais podem ser classificados em: Diamagnéticos, paramagnéticos, antiferromagnéticos, ferromagnéticos e ferrimagnéticos ⁽²⁾.

3.3.5.1. Antiferromagnético

Neste grupo se enquadram os materiais que ao serem submetidos a um campo magnético, desenvolvem um alinhamento antiparalelo, o alinhamento dos momentos dos spins de átomos ou íons vizinhos em direção exatamente oposta. Esses materiais já apresentam em seu estado natural momentos magnéticos atômicos dispostos em arranjo antiparalelo e de mesmo módulo, resultando em um momento magnético total nulo. Os óxidos de ferro e de manganês apresentam esse comportamento. Acima de uma temperatura crítica, conhecida como temperatura de Néel, estes materiais tornam-se paramagnéticos ⁽¹⁵⁾.

3.3.5.2. Ferrimagnético

Materiais que são ferrimagnéticos possuem seus dipolos alinhados em paralelo e antiparalelo ao campo aplicado. O alinhamento em paralelo é mais intenso que o seu oposto resultando em um momento magnético substancial promovendo uma interação positiva com o campo externo aplicado. Com permeabilidade relativa maior que um, estes materiais são facilmente magnetizados e têm algumas características dos materiais ferromagnéticos. Nesta categoria encontram-se o Fe_3O_4 e as ferritas ⁽²⁷⁾.

3.3.5.3. Diamagnéticos

É uma forma muito fraca de magnetismo que é não permanente e que persiste somente enquanto um campo externo está sendo aplicado. Ele é induzido por uma mudança no movimento do orbital dos elétrons devido à aplicação de um campo magnético. Nesses materiais a magnitude do momento magnético induzido é extremamente pequena e em uma direção que é oposta aquela do campo que foi aplicado. Sendo assim, a permeabilidade magnética relativa nesses casos é menor do que a unidade e a susceptibilidade magnética é negativa, isto é, a magnitude do campo no interior do sólido diamagnético é menor do que no vácuo (Figura 10) ⁽²⁾. Na ausência de campo magnético externo, as orientações desses materiais são aleatórias, de tal forma que uma peça de material não possui qualquer magnetização macroscópica líquida ou global. O cobre e o hélio são exemplos de materiais diamagnéticos.

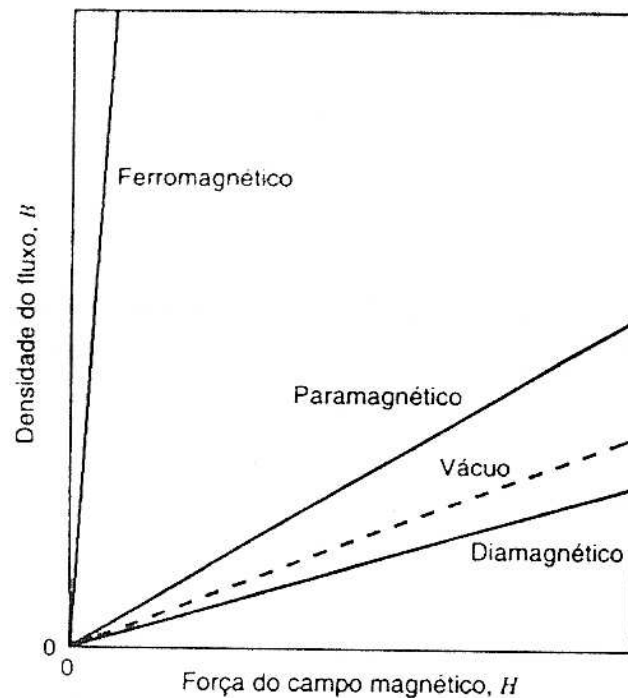


Figura 10 – Magnitude do campo magnético para materiais: diamagnético, paramagnéticos e ferromagnéticos⁽¹⁹⁾

3.3.5.4. Paramagnéticos

São materiais que se alinham na mesma direção do campo externo aplicado e a intensidade de magnetização é proporcional a este. Uma vez que os dipolos estejam alinhados com o campo externo, eles o aumentam dando origem a uma permeabilidade relativa maior do que a unidade, além de uma suscetibilidade magnética que, apesar de relativamente pequena, é positiva. Assim como os materiais diamagnéticos esses materiais também são considerados não magnéticos, pois exibem magnetização apenas quando um campo é aplicado, comportamento desses é semelhante ao do ar (Figura 10). O alumínio e o sódio são paramagnéticos.

3.3.5.5. Ferromagnético

São materiais que possuem momento magnético permanente na ausência de um campo externo e manifestam magnetizações de grande intensidade e permanentes (Figura 10). Em sua composição possuem metais

de transição (como ferrita α , CCC), cobalto, níquel e alguns metais de terras raras, tais como gadolínio (Gd). Os momentos magnéticos permanentes nestes materiais resultam dos momentos magnéticos atômicos, devido aos spins dos elétrons (spins dos elétrons não cancelados como uma consequência da estrutura eletrônica). Existe também uma contribuição do momento magnético orbital, a qual é pequena em comparação ao momento do spin. Acredita-se que a origem dessas forças de acoplamento, mesmo sem campo, é de origem da estrutura eletrônica do metal ⁽²⁾. Materiais desta natureza costumam apresentar permeabilidade relativa consideravelmente maior que a unidade. Isto ocorre com o ferro, cobalto e níquel. Acima de uma temperatura crítica denominada de temperatura de Curie (T_C), estes materiais tornam-se paramagnéticos ⁽¹⁵⁾.

3.3.6. Classificação dos materiais Ferromagnéticos e Ferrimagnéticos

Tanto os materiais ferromagnéticos quanto os ferrimagnéticos podem ser classificados como materiais magnéticos moles ou duros com base na sua curva de histerese.

3.3.6.1. Materiais magnéticos moles

Os materiais magnéticos moles são usados em dispositivos que estão sujeitos a campos magnéticos alternados e onde as perdas de energia devem ser baixas, como em núcleo de transformadores, por exemplo. Uma característica desses materiais é que possuem a área relativa no interior do ciclo de histerese pequena, sendo fina e estreita (Figura 11). Um material magnético mole possui elevada permeabilidade inicial e uma baixa coercividade. Dessa forma esse tipo de material pode atingir a sua magnetização de saturação com a aplicação de um campo relativamente pequeno (isto é, é facilmente magnetizado e desmagnetizado) e ainda possui baixas perdas de energia por histerese. O comportamento da curva de histerese (campo de saturação ou de magnetização) é determinado somente pela composição do material. Em ferritas cúbicas, por exemplo, a substituição

de um íon metálico divalente tal como Ni^{2+} pelo Fe^{2+} , no $\text{FeO-Fe}_2\text{O}_3$ irá mudar a magnetização de saturação. Já a susceptibilidade e a coercividade (H_c) que também influenciam a forma da curva de histerese, são sensíveis as variações de estrutura e não de composição. O valor de coercividade de um material corresponde ao movimento das paredes do domínio à medida que o campo magnético muda de magnitude e ou de direção, ou seja, baixos valores de coercividade significa que os movimentos dessas paredes estão sendo realizados facilmente. Os defeitos estruturais, tais como as partículas de uma fase não magnética ou então vazios no interior de um material magnético, tendem a restringir os movimentos das paredes do domínio, e dessa forma aumentar a coercividade. Dessa forma, um material magnético mole deve estar isento de defeitos estruturais ⁽²⁾.

Outra propriedade importante nos materiais magnéticos moles é a resistividade elétrica. Além das perdas de energia por histerese, podem existir perdas de energia resultantes de correntes elétricas que são induzidas em um material magnético por um campo magnético que varia em magnitude e em direção ao longo do tempo; essas são conhecidas como correntes de turbilhonamento (*Eddy currents*). Geralmente, tende-se a minimizar essas perdas de energia nos materiais magnéticos moles pelo aumento da resistividade elétrica. Essa propriedade é obtida nos materiais ferromagnéticos mediante a formação de ligas por solução sólida; as ligas ferro-silício e ferro-níquel são alguns exemplos. As ferritas cerâmicas são usualmente utilizadas em aplicações que exigem materiais magnéticos moles, pois elas são intrinsecamente isolantes elétricos ⁽²⁾.

3.3.6.2. Materiais magnéticos duros

Os materiais magnéticos duros são usados em ímas permanentes que precisam ter alta resistência à desmagnetização. Em relação ao comportamento de histerese (Figura 11), esse tipo de material possui remanência, coercividade e densidade de fluxo de saturação elevadas, assim como, baixa permeabilidade inicial e grandes perdas de energia por histerese. Nestes materiais as duas características mais importantes são a coercividade e o produto de energia $(BH)_{\text{Max}}$. O valor do produto de energia

representa a energia exigida para desmagnetizar um ímã permanente, ou seja, quanto maior for o valor $(BH)_{Max}$, mais duro será o material em termos das suas características magnéticas. Como para os materiais magnéticos moles, o comportamento de histerese está relacionado á facilidade segundo o qual os contornos dos domínios magnéticos se movem, pelo impedimento dos movimentos dos contornos dos domínios a coercividade e a susceptibilidade são melhoradas, de modo tal que é necessário um grande campo externo para a ocorrência da desmagnetização. Novamente essas características estão inter-relacionadas com a microestrutura do material.

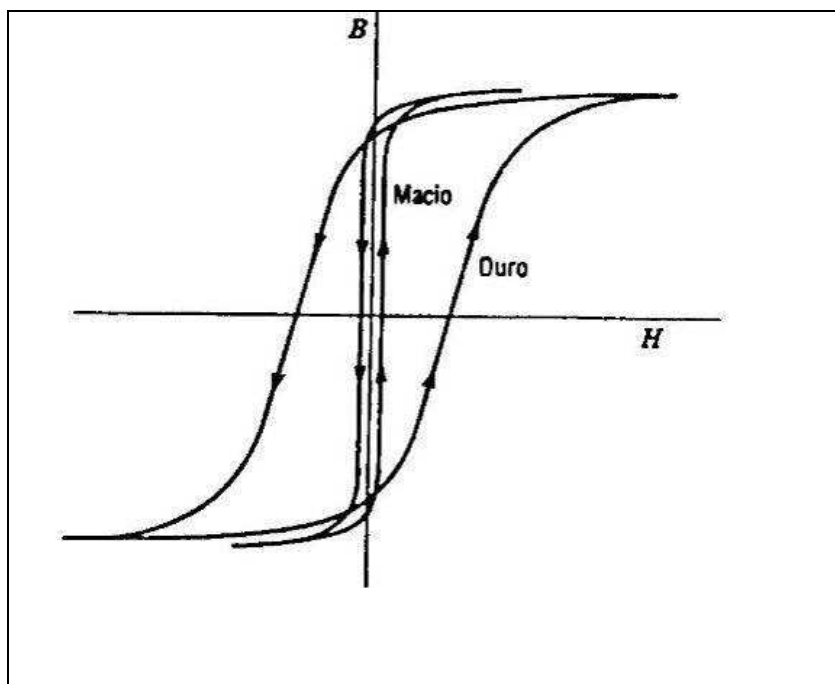


Figura 11: Ciclo de histerese para material magnético duro e macio ⁽²⁰⁾

3.3.7. Propriedades Eletromagnéticas

3.3.7.1. Propriedades intrínsecas

As propriedades elétricas e magnéticas determinadas apenas pela estequiometria são conhecidas como propriedades intrínsecas do material. São elas: magnetização de saturação, anisotropia, magnetocristalina; magnetoestricção, temperatura de Curie e resistividade da rede cristalina.

3.3.7.2. Propriedades Extrínsecas

As propriedades extrínsecas, além de dependerem da estequiometria, são afetadas por aspectos microestruturais como o tamanho de grão, porosidade, densidade e contorno de grão. São elas: permeabilidade, perdas, resistividade, e coercividade.

3.3.8. Parâmetros que influenciam nas propriedades magnéticas e mecânicas

3.3.8.1. Temperatura

O aumento da temperatura de um sólido resulta em um aumento na magnitude das vibrações térmicas dos átomos. Esses momentos magnéticos são livres para girar, dessa forma quando ocorre uma elevação da temperatura, há um maior movimento térmico dos átomos tornando aleatórias as direções de quaisquer momentos que possam estar alinhados ⁽²⁾.

Nos materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos, os movimentos térmicos atômicos atuam contra as forças de acoplamento entre os momentos dipolos adjacentes, causando algum desalinhamento do dipolo, independentemente de um campo externo estar presente.

Esse fenômeno resulta na redução na magnetização de saturação, tanto para os materiais ferromagnéticos quanto para os ferrimagnéticos. A magnetização de saturação é máxima na temperatura de 0K, em cujas condições as vibrações térmicas são mínimas. Com o aumento da temperatura, a magnetização de saturação diminui gradualmente, e então cai bruscamente para zero, num ponto conhecido como temperatura de Curie (T_C). O que ocorre é que nesta temperatura, T_C , as forças mútuas de acoplamento dos spins estão completamente destruídas, de modo que para temperaturas acima da T_C , esses materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos tornam-se paramagnéticos. A magnitude da temperatura de Curie varia de material para material. Na Tabela 3 são apresentados esses valores para alguns elementos.

Tabela 3: Temperatura de Curie

Elemento químico	Temperatura Curie °C
Fe	768
Co	1120
Ni	335
Fe ₃ O ₄	585

3.3.8.2. Defeitos estruturais e tamanho de partícula

Os defeitos estruturais, tais como as partículas de uma fase não magnética, poros ou então vazios no interior de um material magnético, tendem a restringir os movimentos das paredes do domínio e dessa forma aumentar a coercividade do material ⁽²⁾. A coercividade do material é um campo magnético oposto ao campo original. A alteração desse parâmetro significa em mudanças na curva de histerese, tornando a mesma mais larga e aumentando por consequência as perdas por histerese. Os poros geram efeito de desmagnetização, podendo causar a rotação de magnetização longe do sentido fácil ⁽²⁸⁾.

Esse tipo de defeito também gera alterações nas propriedades mecânicas do material. A porosidade residual por exemplo, tem influência negativa tanto sobre as propriedades elásticas como sobre a resistência. A porosidade exerce um efeito negativo sobre a resistência à flexão por dois motivos: os poros reduzem a área da seção reta através da qual uma carga é aplicada e eles também atuam como concentradores de tensões ⁽²⁾. Além disso, o aumento da porosidade gera uma redução da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade ^(29- 33).

Contudo, o aumento da porosidade causa o aumento da resistividade elétrica. Nesse caso, quanto menor a pressão de compactação, menor a densidade (maior porosidade) e maior a resistividade ⁽³⁴⁾. Além disso, outro

fator que influencia na resistividade de um material são as impurezas, 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. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade⁽³⁴⁾.

O tamanho da partícula também tem grande influência nas propriedades magnéticas e estabilidade em altas frequências do material. Estudos indicam que quanto maior o tamanho da partícula, maior será a permeabilidade inicial, no entanto menor será a estabilidade em altas frequências desse material (Figura 12)⁽³⁹⁾. No caso da coercividade, partículas menores têm a tendência de reduzir os defeitos da matriz, como porosidade (que impedem os movimentos da parede do domínio), e resultam na redução dessa propriedade⁽³⁵⁾.

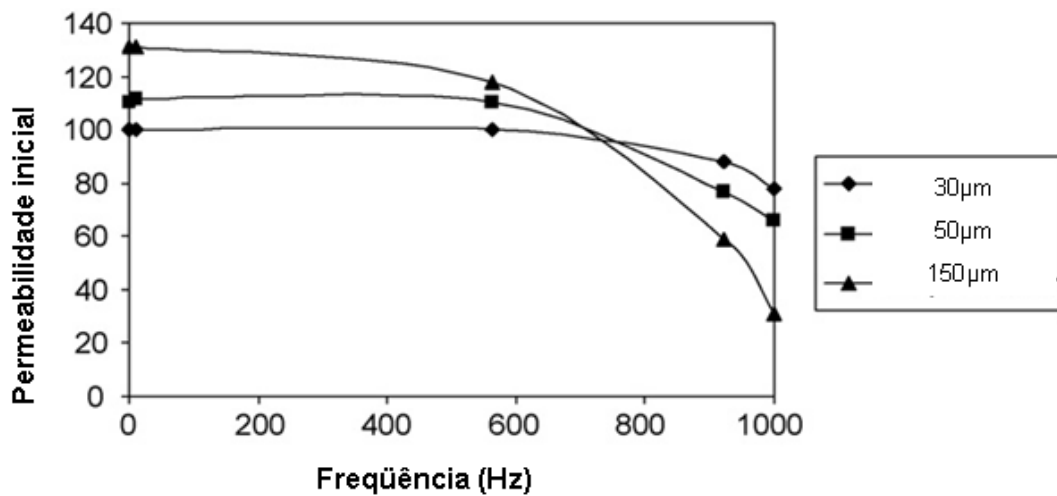


Figura 12 : Efeito do tamanho da partícula na permeabilidade inicial⁽³⁹⁾

3.3.8.3. Pressão de compactação e características das partículas

É extremamente importante existir uma sincronia entre a característica do material, a etapa de preparação da amostra e a prensagem, pois esta combinação irá influenciar na propriedade do material conformado. Por exemplo, para que a prensagem se desenvolva de maneira adequada é imprescindível que a massa a ser conformada possua as seguintes características:

- Elevada fluidez, para que durante a fase de preenchimento das cavidades do molde, cuja dosagem se realiza por medida de volume, a massa escoe rapidamente e preencha o molde de maneira homogênea e reproduzível,
- Elevada densidade de preenchimento, para que a quantidade de ar a ser expulsa durante a fase de compactação seja mínima;

Estes dois primeiros requisitos implicam que a massa deverá ser constituída por grânulos de geometria esférica, ou aproximadamente esférica, de tamanho superior a 60 μm , e textura o mais lisa possível.

As características mecânicas dos grânulos, tais como dureza, resistência mecânica e plasticidade devem ser adequadas. Os grânulos devem ser suficientemente moles e deformáveis, para que durante a fase de compactação, em pressões moderadas, se deformem plasticamente, facilitando o deslizamento das partículas que o compõe. Por outro lado, os grânulos não podem ser tão frágeis, moles e deformáveis a ponto de se romperem, deformarem ou aglomerarem uns aos outros durante as operações de armazenagem e transporte que antecedem a etapa de prensagem. Contribuir para a obtenção de peças suficientemente rígidas que resistam à etapa de extração do molde e as subseqüentes etapas do processamento. As características mecânicas dos grânulos, da mesma forma que nas peças conformadas, dependem, sobretudo, de sua porosidade e do tamanho das partículas primárias que os compõem, e da natureza e resistência das ligações químicas que se estabelecem entre elas ⁽³⁶⁾.

Além disso, para que esta fase da operação de prensagem se desenvolva rapidamente e para que a distribuição da quantidade de massa na cavidade do molde seja uniforme e reprodutível, é imprescindível que a massa flua bem sob o efeito das forças de gravidade, ou seja, possua uma boa fluidez. As características da massa que determinam sua fluidez são a distribuição granulométrica, a forma, a textura superficial dos grânulos e também a aderência apresentada pelos grânulos entre si. A massa a ser empregada na compactação deve possuir uma densidade relativa (ρ_0) ou “compacidade” elevada. A densidade relativa é definida como sendo a razão entre a densidade de preenchimento (ρ_{p0}) e a densidade real das partículas (ρ_s). Uma densidade relativa excessivamente baixa indica uma razão de compactação (volume ocupado pelos grânulos/volume ocupado pela respectiva peça conformada) muito elevada. Isso traduz de um lado, em um elevado conteúdo de ar que deve ser extraído durante a fase de compactação, e de outro, em um excessivo deslizamento do molde durante a mesma etapa da operação de prensagem. Ambos os fatores ocasionam problemas durante a execução da operação de prensagem, e podem originar defeitos no produto acabado. Normalmente, razões de compactação superiores a 2,5 podem ser consideradas excessivas.

As etapas de compactação dos compósitos de materiais magnéticos moles produzidos por processo da metalurgia do pó, geralmente conferem à partícula certa elasticidade aumentando, conseqüentemente, a densidade de deslocamento entre as mesmas. Esses deslocamentos atuam como poros que impedem os movimentos das paredes dos domínios e como resultado atuam na alteração das propriedades magnéticas desses compósitos, em particular permeabilidade magnética, forças coercivas e perdas por histerese ⁽³⁷⁾. Nestes compósitos de materiais magnéticos moles é necessária a presença de uma camada isolante, por isso após a compactação não pode ser realizada uma sinterização a altas temperaturas, somente um tratamento térmico em baixas temperaturas. Essa condição gera como conseqüência um incompleto alívio das tensões do material prensado ⁽³⁸⁾. A partir da Figura 14 observar-se que o processo de compactação induz à produção de tensão entre as espécies, e o aumento da pressão de compactação eleva as forças coerciva e induz a formação de micro tensões internas ⁽³⁸⁾. O alívio dessas

tensões residuais é obtida numa relação tempo-temperatura (Figura 15). Além disso, o aumento do percentual de resina no compósito torna o pó menos compressível, tendo como consequência a necessidade de aplicação de altas forças de compactação, afim de obter altas induções⁽³⁹⁾. Geralmente para a obtenção de altas induções é necessário ter altas densidades relativas. A Figura 13 mostra que a pressão de compactação é diretamente proporcional a densidade do material⁽³⁹⁾.

A densidade relativa da massa depende do volume de poros intergranulares (espaços vazios entre os grânulos), V_{pg0} , e do volume de poros intragranulares (poros existentes no interior dos grânulos), V_{pp0} , ambos por unidade de volume do sólido, V_s . A razão volume de poros intergranulares/volume do sólido $(V_{pg}/V_s)_0$ da massa depende da estrutura dos grânulos (maciços ou com irregularidades na superfície, como crateras e grânulos menores aderidos), da distribuição do tamanho dos grânulos e da fluidez do pó. Uma baixa fluidez da massa resulta em uma baixa densidade relativa da massa vertida na cavidade do molde, ainda que sua distribuição de tamanhos (distribuição granulométrica) seja adequada para um bom empacotamento. Ainda que em princípio uma forma de reduzir estes poros ou espaços intergranulares durante o preenchimento seja utilizar distribuições granulométricas largas, este procedimento não deve ser empregado, já que pode ocasionar problemas de uniformidade devido à segregação dos grânulos por faixas de tamanho. A razão volume de poros intragranulares/volume de sólido $(V_{pp}/V_s)_0$ da massa depende da forma e distribuição de tamanho das partículas que constituem os grânulos e das condições de processamento envolvidas em sua obtenção⁽³⁶⁾.

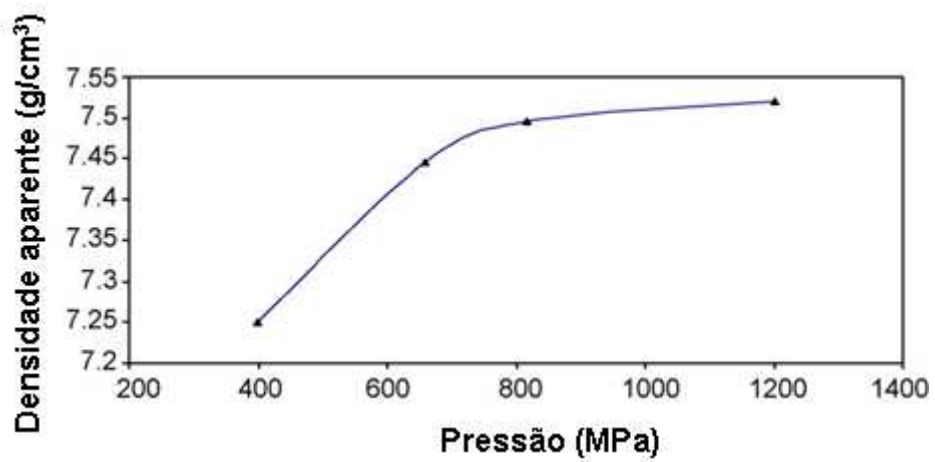


Figura 13: Efeito da pressão na densidade do material ⁽³⁹⁾

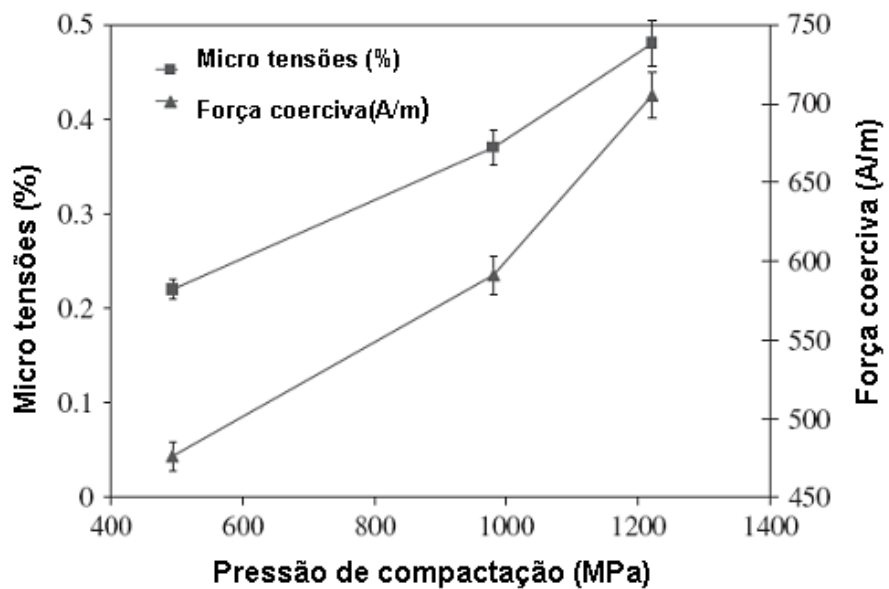


Figura 14 : Efeito da pressão de compactação na formação de micro-tensão e nas forças coercivas ⁽³⁷⁾

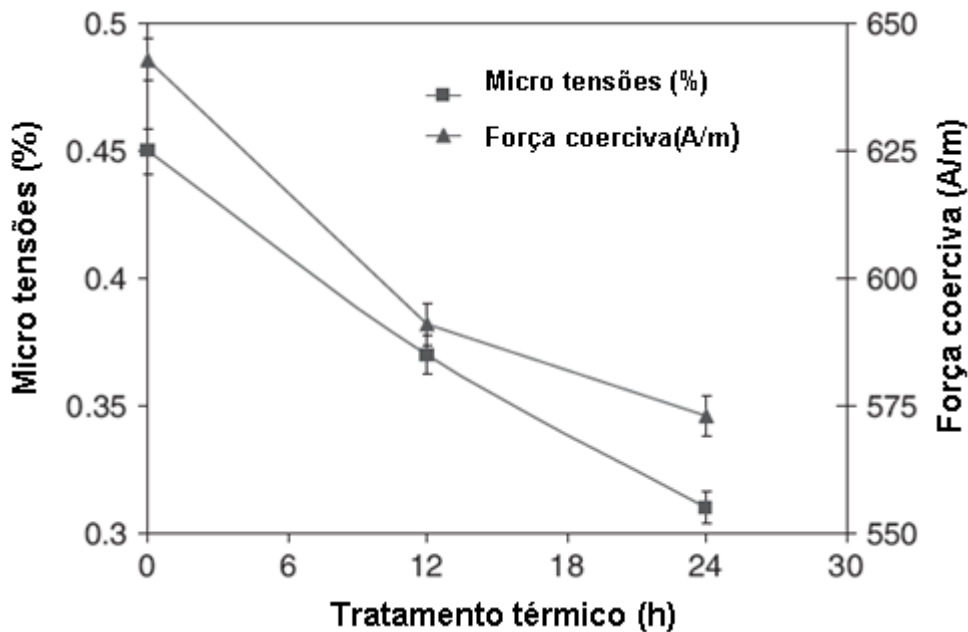


Figura 15 : Efeito do tempo de tratamento térmico na formação de micro tensões e nas forças coercivas – Pressão de compactação de 980 MPa e temperatura 200°C ⁽³⁷⁾

3.3.8.4. Adição de resina

A propriedade de resistência das ligações químicas pode ser alterada mediante o emprego de aditivos. Desta forma, os aditivos a serem utilizados, bem como a proporção com que são adicionados à massa deverão ser definidos tendo em vista o efeito que possam exercer sobre o comportamento mecânico tanto dos grânulos como da peça conformada. A definição da mistura de aditivos a ser utilizada é uma operação complicada, uma vez que uma determinada mistura pode ser bastante adequada a uma determinada fase da operação de prensagem, e ao mesmo tempo apresentar sérios inconvenientes para a execução de outras etapas, ou mesmo para as características mecânicas da peça conformada a verde. Os ligantes orgânicos têm a função de conferir ao grânulo e à peça conformada uma suficiente resistência mecânica, e devem ser empregados em proporções inferiores a 5% em peso. Além disso, o uso de resinas orgânicas como ligante tem a vantagem de reduzir as perdas por corrente de Foucault, pois

essa resina age como isolante entre as partículas de pó e também entre as ligas livres de deformação ⁽⁴⁰⁾.

Os plastificantes aumentam a deformabilidade do ligante e reduzem sua capacidade de adsorção da umidade ambiente. A umidade normalmente atua como plastificante secundário, fator pelo qual deve ser controlada sua quantidade adsorvida no intervalo entre as etapas de granulação e prensagem.

O lubrificante tem como funções reduzir a fricção entre os grânulos da massa e a parede do molde durante a etapa de compactação, e também reduzir o atrito entre a peça conformada e a parede do molde durante a etapa de extração da peça. Os lubrificantes podem ser adicionados durante a formação dos grânulos ou posteriormente, como forma de recobrimento. Alguns ligantes, como aqueles formados por mistura de ceras e polietilenoglicol apresentam também propriedades lubrificantes.

No caso dos aditivos orgânicos, como o PVA, a proporção a ser utilizada é limitada pelo fator custo, que incide tanto no preço do aditivo, como também no custo indireto de eliminação associado à sua combustão, durante a etapa de queima.

A escolha do tipo de ligante é também importante, tendo em vista a possibilidade da formação de resíduos que podem ser aprisionados no interior dos poros provocando o desenvolvimento de estados de tensão mecânica na ferrita, suficientes para degradar a sua permeabilidade magnética ⁽³⁸⁾.

As fronteiras de grãos são regiões de grande desordem atômica e de segregação de impurezas. A mobilidade das paredes dos domínios magnéticos sofre nessa região uma redução devido à ação de fixação dessas fronteiras de grãos.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos parâmetros que influenciam as propriedades do material.

Tabela 4 : Relação parâmetros X propriedades

Propriedades	Parâmetros que influenciam nas propriedades do material					
		↑ Porosidade	↑ Teor de resina	↑ Impurezas	↑ Tamanho de partícula	↑ Pressão de compactação
Magnética Elétrica	Permeabilidade	↓	↓	↓	↑	↑
	Coercitividade	↑	↑	↑	↑	↑
	Indução de saturação	↓	↓	↓	↑	↑
	Resistidade	↑	↑	↑	↓	↓
	Perdas magnéticas	↓	↓	↓	↑	↑
Mecânica	Dureza	↓	↓	↓	↑	↓
	Compressão	↓	↓	↓	↑	↓

OBS: ↑ - Aumento da propriedade ↓ - Redução da propriedade

3.4. Matrizes poliméricas

Matrizes poliméricas têm sido muito utilizadas para confeccionar compósitos com ferritas. Os critérios para a escolha destes polímeros são baseados na flexibilidade, moldabilidade e garantia de uma boa constante dielétrica. Para estes compósitos quanto maior a carga de ferrita maior a tangente de perda $\tan \delta = (m''/m')$, o que implica em menor reflexão ⁽⁴¹⁾. Apesar de haver uma busca por obter sempre um carregamento elevado, este é muitas vezes limitado pela capacidade do elastômero de incorporar a carga e também pelo efeito de percolação. A ocorrência deste efeito indica uma mudança no estado de dispersão da carga no polímero, onde a presença excessiva de aglomerados dá lugar à formação de uma rede, que facilita a interação elétrica no compósito, aumentando a condutividade elétrica.

3.4.1. Resina Epóxi

A primeira produção de resina epóxi, ocorreu simultaneamente na Europa por Pierre Castan (1930) e nos EUA por Greenlee (1940). Essas resinas foram comercializadas como aglomerantes (*casting compounds*) e revestimentos ⁽⁴²⁾.

Resinas epóxi são da classe de materiais termofixos usado extensivamente em estruturas e compósitos especiais, pois os mesmos possuem propriedades que são inatingíveis com as outras resinas termofixas ⁽⁴²⁾.

Essas resinas têm baixa viscosidade e sólidos de alto ponto de fusão, sendo aplicados em uma variedade de processos. Além disso, oferecem alta resistência, baixa fluência, excelente adesão a diversos substratos, efetivo isolamento elétrico, resistência a solventes e químicos, baixo custo e baixa toxicidade. São resinas facilmente curadas pela perda de voláteis sendo quimicamente compatíveis a uma série de substratos e conferindo facilmente molhabilidade ao mesmo, dessa forma sendo bastante aplicado na elaboração de compósitos.

3.4.2. Resina Fenólica

Resinas fenólicas são resinas termofixas produzidas pela reação de condensação entre um fenol e um formol aldeído ou substituindo um fenol por um aldeído, usualmente formol aldeído na presença de um catalisador ^(43, 44). Em presença de determinados reagentes as, resinas fenólicas podem formar ligações cruzadas resultando em um material rígido ⁽⁴⁴⁾.

Existem duas classes de resina fenol- formol aldeído: uma é produzida em meio ácido, formando resina novolaca e o outro meio básico formando resina resole. A resina fenólica novolaca consiste em uma cadeia com 8 – 10 unidades fenólicas, ligadas por radicais metileno. Já resina resole tem tipicamente baixo peso molecular, consistindo de 1-2 unidades fenólicas. ⁽⁴⁵⁾.

Compósitos de resinas fenólicas apresentam superior resistência ao fogo, excelente desempenho à alta temperatura, baixa toxicidade e longa durabilidade e resistência a solventes de hidrocarbonetos e clorados. Além

disso, essas resinas têm um baixo custo e são geralmente utilizadas em compósitos reforçados com fibras.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Caracterização do resíduo

4.1.1. Caracterização ambiental:

Um item extremamente importante antes de realizar o reaproveitamento de um resíduo é a determinação de sua classificação enquanto resíduo e depois de transformado em um outro produto (no caso do presente trabalho, em compósito magnético). A classificação ambiental foi realizada segundo a norma NBR 10004/2006. Os ensaios de lixiviação foram realizados segundo a norma brasileira NBR10005/2006 e os ensaios de solubilização foram realizados de acordo com a NBR 10006/2006.

4.1.2. Caracterização quanto à morfologia e granulometria

A morfologia do resíduo moído (passante em peneira 140#) foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura, em um microscópio da marca JEOL-JSM 5800, com o objetivo de avaliar a textura e forma das partículas. As imagens foram obtidas por elétrons secundários. A distribuição granulométrica foi determinada pela passagem por peneiras.

4.1.3. Caracterização quanto à composição

A caracterização química do resíduo foi realizada em um difratômetro da marca PHILIPS, modelo X'PERT, com radiação da linha $K\alpha$ do cobre ($CuK\alpha \rightarrow \lambda=1,5418 \text{ \AA}$). A análise foi realizada na faixa 2θ entre 14 e 75°, com passo de 0,02 e 1s por passo.

4.2. Elaboração do compósito magnético

O resíduo bruto foi submetido à moagem em um moinho de facas marca Retsch, modelo SM2000. Neste equipamento, a peneira de controle utilizada foi de 0,1mm (a menor peneira de controle disponível). Posteriormente, o material moído foi passado em uma série de peneiras para a determinação da distribuição granulométrica do material. O resíduo moído utilizado para preparação da amostra foi o passante em peneira 140 #.

Existem muitos tipos de resinas indicadas para estas aplicações, contudo inúmeras propriedades devem ser observadas, como por exemplo: temperatura de cura; temperatura de utilização; dureza; ductilidade; resistividade elétrica; resistência à vibração, dentre outras.

No presente trabalho empregou-se dois tipos de resina: a resina CR2001 e a resina HRJ-10236, as quais são descritas a seguir.

Resina CR2001[®] : A resina CR-2001[®] é uma resina fenólica tipo novolaca em pó modificada com epóxi. Essa resina geralmente é usada como ligante na fabricação de rebolos especiais, discos de corte e de desbaste e segmentos abrasivos em geral. Essa resina pode ser utilizada associada a outras resinas em pó em proporções definidas, com o objetivo de conferir ao produto final elevada dureza, excelente resistência a temperaturas críticas de trabalho e alto grau de adesão à fibra de vidro em abrasivos de liga reforçados. A especificação técnica dessa resina está descrita na Tabela 5, de acordo com informações do fornecedor.

Tabela 5 : Especificação técnica da Resina CR2001[®]

Especificação	Medida
Fluxo à 125°C	20 - 40 mm
Cura à 154°C	40 - 60 s
Teor de Hexametileno tetra-amina	8,5 - 9,5 %
Granulometria (M#200)	mín. 97%
Ponto de fusão capilar	75-90 °C

Resina HRJ10236[®] : Essa é uma resina fenólica modificada em pó, tipo Novolaca, que contém hexametileno-tetramina. 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. A Tabela 6 apresenta as especificações da resina, de acordo com informações do fornecedor.

Tabela 6: Especificação técnica da resina HRJ-10236®.

Especificação	Medida
Fluxo à 125°C	20 - 45 mm
Cura à 154°C	50 - 90 s
Teor de Hexametileno tetra-amina	7,5 - 8,5 %
Granulometria (M#200)	mín. 97%

Descrição das etapas realizadas para a elaboração dos compósitos

a) Preparação da mistura:

- Pesagem da resina HRJ10236[®] e da CR2001[®] (3% em peso);
Como já foi mencionado ⁽⁴⁰⁾ os ligantes orgânicos têm a função de conferir ao grânulo e á peça conformada uma resistência mecânica suficiente, e devem ser empregados em proporções inferiores a 5% em peso. De acordo com resultados obtidos por outros autores ⁽⁴⁶⁾ a adição de 3% em peso dessas resinas promove a redução de permeabilidade magnética, mas aumenta a resistividade elétrica do compósito, pois a resina age como isolante entre as partículas tendo como conseqüência a redução das perdas magnéticas por corrente de Foucault, fator importante para esse tipo de material em estudo.
- Pesagem do resíduo de Ferrotron[®] moído passante em peneira 140#, equivalente a 97% em peso;
- Colocação da resina e do resíduo pesado em um misturador;
- Mistura por um período de 30 minutos.

b) Compactação da amostras:

- Lubrificação do ferramental da prensa e da matriz com estearato de sódio.

- Distribuição do material do misturador nas matrizes (*Figura 16*, *Figura 17* e *Figura 18*).

A amostra em forma de cilindro (*Figura 16*) foi empregada para avaliação da morfologia e das propriedades mecânicas. A amostra na forma toroidal (*Figura 17*) foi usada para medição das propriedades magnéticas. A amostra na forma de barra (*Figura 18*) foi utilizada para medição da resistividade elétrica



Figura 16 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾



Figura 17 - (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾



Figura 18: (a) matriz para compactação e (b) geometria da amostra ⁽²⁰⁾

- Todas as amostras (*Figura 16, Figura 17 e Figura 18*) foram compactadas na prensa hidráulica manual PS30T marca EKA com capacidade de 40 Ton. Utilizou-se uma pressão de 600 MPa por cerca de 1 min. Onde $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$. Considerando que 1 ton é aproximadamente 10.000 N, resulta: $600 \text{ MPa} = 6 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = 6 \times 10^4 \text{ ton/m}^2 = 6 \text{ ton/cm}^2$. Considerando a área da matriz, obtém-se 23,58 ton para $3,93 \text{ cm}^2$.

c) Cura

- Retirada do material da matriz
- Introdução desse material em um forno, para cura da resina seguindo as instruções de acordo com boletim técnico da resina.

O processo de cura foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. De acordo com o fabricante das resinas, para uma boa cura das resinas deve-se realizar uma pré-cura até 50°C com patamar de 2 minutos, e posterior aquecimento a 200°C com patamar de 2 minutos.

É importante salientar que, as ligas contendo resinas não passam por processo de sinterização, mas somente de cura da resina, o que nesta aplicação, serve para adesão das partículas de pó e isolamento elétrico entre as partículas, reduzindo as correntes parasitas.

A Figura 19 apresenta a seqüência das etapas para a elaboração dos compósitos magnéticos.

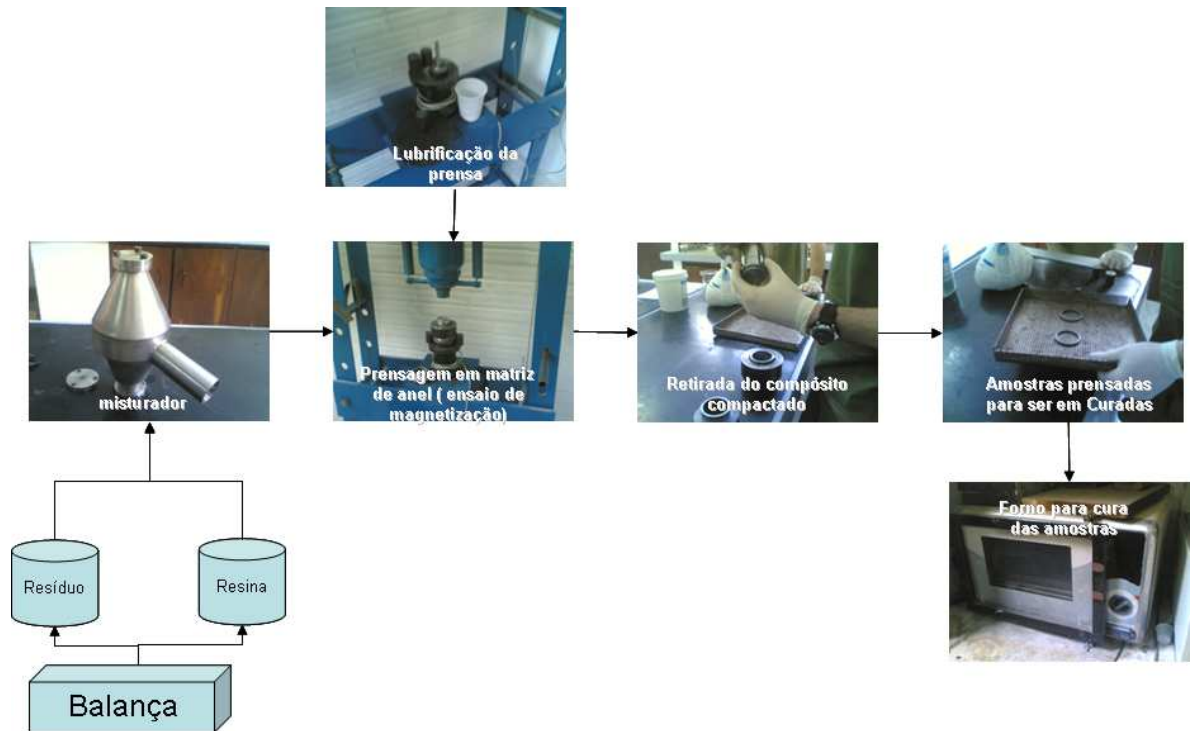


Figura 19 : Processo de elaboração do compósito

4.3. Caracterização do compósito magnético

4.3.1. Caracterização física e morfológica

A morfologia e a composição dos compósitos magnéticos obtidos e da amostra original, foi avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura (microscópio da marca JEOL-JSM 5800) contendo EDS acoplado. As imagens foram obtidas por elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

Para caracterização física dos compósitos magnéticos e da amostra original foi determinado a densidade aparente, empregando-se o princípio de Arquimédes.

4.3.2. Caracterização quanto ao comportamento térmico

Para as análises termogravimétricas deste trabalho, utilizou-se o equipamento da Mettler Toledo TGA/SDTA 851e. O ensaio seguiu a norma ASTM E 1131 (*Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry*).

As análises foram realizadas na faixa de temperatura entre 25 e 900°C, com taxa de aquecimento de 20 °C.min⁻¹ em atmosfera de N₂.

A 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 20. Essa técnica pode ser aplicada para estudo de envelhecimento acelerado, cinética de decomposição e estabilidade de oxidação⁽⁴⁷⁾.

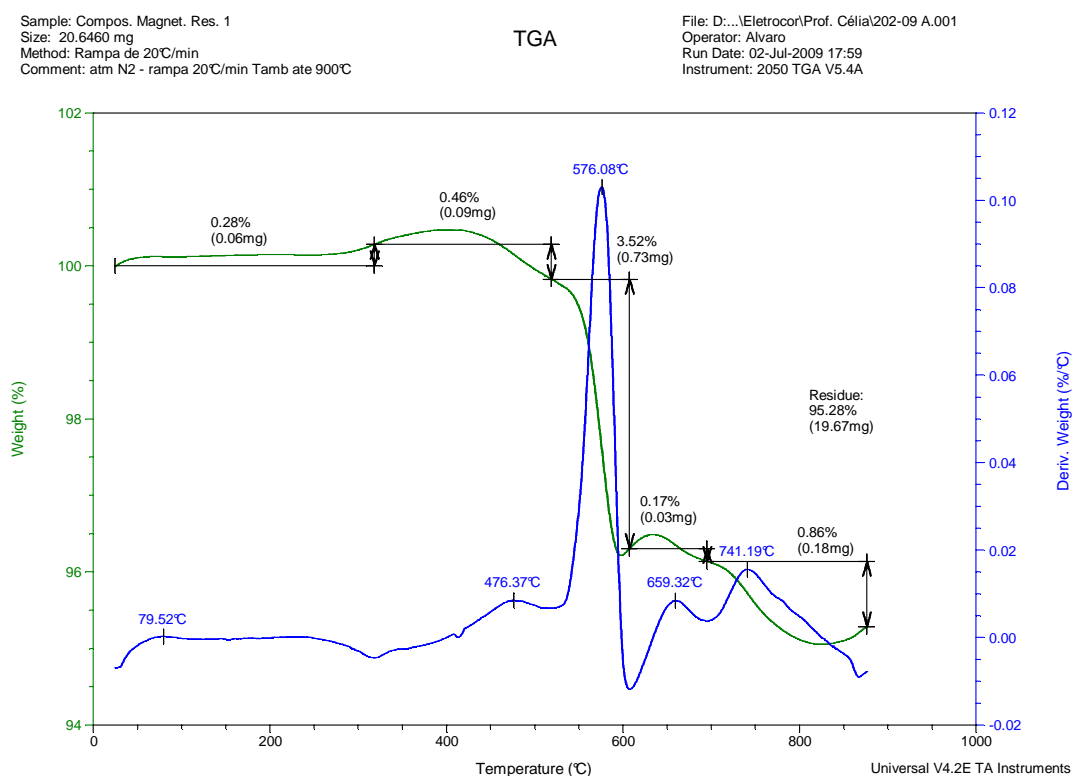


Figura 20 - Curva TGA e sua derivada, DTG.

4.3.3. Caracterização quanto ao comportamento mecânico

Para a caracterização mecânica das amostras elaboradas foram realizados os ensaios de dureza e resistência à compressão:

4.3.3.1. Dureza Brinell

Os ensaios de dureza foram realizados em um Durômetro marca Wolpert, modelo Diatestor, com esfera de 2,5 mm e carga de 15,625 kgf.

4.3.3.2. Resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados em um Equipamento Universal de Ensaio Mecânico (Figura 21), marca INSTRON, no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS). A velocidade utilizada foi 1,5 mm/min e o ensaio realizado de acordo com a norma ASTM E9 (*Standard Test Methods of Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature*). Na Figura 22 são apresentados os corpos de prova utilizados no ensaio de compressão.



Figura 21: Máquina Universal de Ensaio Mecânico INSTRON. (a) Equipamento e captura de dados, (b) detalhe do dispositivo de ensaio.

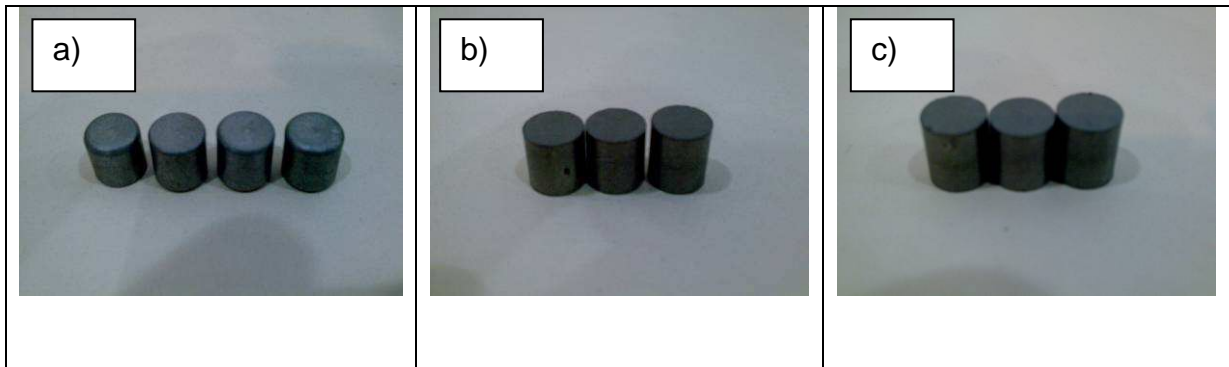


Figura 22 : Amostras para ensaio de compressão: a) amostra original b) compósito com 3% resina HRJ10236[®] c) compósito com 3% resina CR2001[®] .

4.3.4. Caracterização quanto ao comportamento magnético

Os compósitos magnéticos foram caracterizados em relação ao material original e no material original, quanto ao comportamento magnético a partir de curvas de histerese, resistividade e determinação da permeabilidade magnética e das perdas magnéticas.

Curvas de Histerese

Para a obtenção da curva de histerese foram elaboradas amostras na forma de anel toroidal e as medidas foram realizadas em um equipamento com sensor Hall (Figura 23). Esse dispositivo permite traçar uma curva de histerese elementar, onde a indução magnética (medida a partir do sensor Hall) é função do campo magnético aplicado (medido a partir da queda de tensão na resistência). Esse método tem o nome de anel de Roland modificado. Pela curva de histerese é possível analisar perdas por histerese, coercitividade e permeabilidade. As frequências de operação utilizadas para o teste foram bem inferiores aquelas a que o material é submetido quando em trabalho (frequência máxima de trabalho é de 30KHz). Porém, para o ensaio essa determinação ficou limitada pela tecnologia do equipamento que atinge no máximo 400Hz.

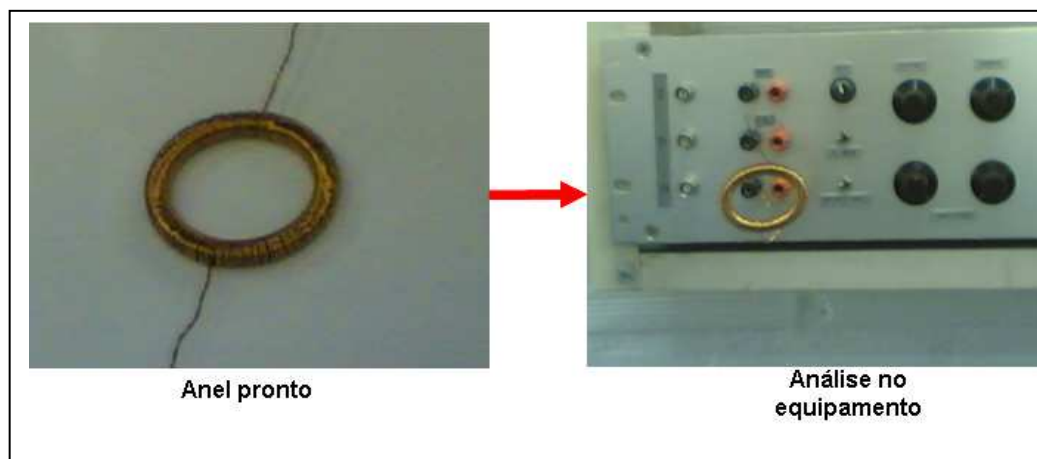


Figura 23 : Amostra e equipamento para ensaio de magnetização

O procedimento de preparação da amostra é realizado de acordo com as seguintes etapas:

- a. Isolamento – Enrolamento do anel com filme plástico. Esse enrolamento é feito por segurança, pois caso ocorra o descascamento do esmalte que reveste o fio de cobre, o mesmo não vai ficar em contato direto com o substrato.
- b. Enrolamento primário – Enrolamento em todo o anel com fio de cobre esmaltado (menor espessura).
- c. Isolamento- Enrolamento de todo anel (com enrolamento primário) novamente com um filme plástico
- d. Enrolamento secundário – Enrolamento em todo o anel com fio de cobre esmaltado (maior espessura);
- e. Após realizar o primeiro e o segundo enrolamento deve-se fotografar a amostra, para que posteriormente, com o auxílio de um aplicativo (Microsoft Paint), o número de espiras possa ser determinado.
- f. Por último realiza-se o descascamento das duas pontas dos fios para poder ligar ao equipamento (fios do enrolamento primário e secundário)



Figura 24 - Etapas de preparação das amostras: (a) isolamento, (b) enrolamento primário, (c) isolamento e (d) enrolamento secundário ⁽²⁰⁾

4.3.5. Caracterização quanto à resistividade

Resistividade: A análise de resistividade foi determinada a partir da resistência do material, utilizando a Equação 3. Para determinação dessa resistência utilizou-se um Megômetro da marca yokogawa, modelo 2404 insulator Tester, com escala máxima de 5000 Mega ohms/ 2000 V. Esse tipo de instrumento geralmente é utilizado para executar testes de isolamento e mede valores elevados de resistência elétrica, onde o ohmímetro não consegue medir. Um megômetro produz altas tensões para poder vencer a grande resistência do componente. A área da amostra utilizada foi de: 16,16cm².

$$\rho = \frac{R * A}{L}$$

Equação 3

Em que:

ρ = resistividade eléctrica em Ωm

R= Resistência eléctrica em Ω

A= Área da seção da amostra, medido em m²

L= Comprimento da amostra, medido em m

4.3.6. Análise financeira para elaboração dos compósitos

A análise financeira foi realizada comparando-se o custo de elaboração do concentrador de fluxo a partir do resíduo oriundo do ajuste dimensional desses componentes com o custo para a aquisição do Ferrotron® 559 original. A partir dessa diferença em percentual foi determinada a redução de custo proporcionada pelo reaproveitamento desse resíduo. Para essa análise foram considerados os seguintes parâmetros:

- custo para moagem do resíduo;
- custo para compra da resina;
- custo mão de obra para elaborar o material e
- custo para compra de Ferrotron® 559 original.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

5.1. Caracterização do resíduo

5.1.1. Caracterização Ambiental

Na

Tabela 7 e na Tabela 8 estão apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de Ferrotron®.

Tabela 7: Análise de lixiviação

Parâmetro	Resultado	Limite máximo (mg.L ⁻¹)	Cumprimento
Arsênio (µg.l ⁻¹)	<1,5	1,0	OK
Bário (mg.l ⁻¹)	<0,5	70	OK
Cádmio (mg.l ⁻¹)	<0,005	0,5	OK
Chumbo (mg.l ⁻¹)	<0,005	1,0	OK
Cromo Total (mg.l ⁻¹)	0,183	5,0	OK
Mercúrio (µg.l ⁻¹)	<0,05	0,1	OK
Prata (mg.l ⁻¹)	<0,0015	5,0	OK
Fluoreto (mg.l ⁻¹)	9,79	150	OK
Selênio (µg.l ⁻¹)	<2,0	1,0	OK

A partir da análise de lixiviação, o resíduo de Ferrotron® foi classificado como sendo resíduo de classe II - não perigoso. A partir do ensaio de solubilização o mesmo foi classificado como pertencente à classe IIA - Não inerte. Dessa forma, o resíduo ficou então classificado como: resíduo não inerte - classe IIA.

Tabela 8: Análise de Solubilização

Parâmetro	Resultado	Limite máximo (mg.L⁻¹)	Cumprimento
Alumínio (mg.l ⁻¹)	<0,2	0,2	OK
Arsênio (µg.l ⁻¹)	<1,5	0,01	OK
Bário (mg.l ⁻¹)	<0,5	0,7	OK
Cádmio (mg.l ⁻¹)	<0,005	0,005	OK
Sódio (mg.l ⁻¹)	2,305	200	OK
Cobre (mg.l ⁻¹)	0,552	2,0	OK
Zinco (mg.l ⁻¹)	0,309	5,0	OK
Chumbo (mg.l ⁻¹)	<0,005	0,01	OK
Cromo Total (mg.l ⁻¹)	<0,003	0,05	OK
Ferro (mg.l ⁻¹)	0,882	0,3	NOK
Manganês (mg.l ⁻¹)	0,017	0,1	OK
Mercúrio (µg.l ⁻¹)	<0,05	0,001	OK
Fenol (mg.l ⁻¹)	0,012	0,01	OK
Nitrato (mg.l ⁻¹)	<0,04	10,0	OK
Cianeto (mg.l ⁻¹)	<0,0003	0,07	OK
Sulfato (mg.l ⁻¹)	4,438	250,0	OK
Surfactantes (mg.l ⁻¹)	<0,01	0,5	OK
Cloreto (mg.l ⁻¹)	8,34	250,0	OK
Fluoreto (mg.l ⁻¹)	2,24	1,5	NOK
Prata (mg.l ⁻¹)	<0,0015	0,05	OK
Selênio (µg.l ⁻¹)	<2,0	0,01	OK

5.1.2. Caracterização quanto à morfologia e granulometria

A partir da Figura 25 é possível observar a morfologia das partículas de resíduo do material magnético (Ferrotron®).

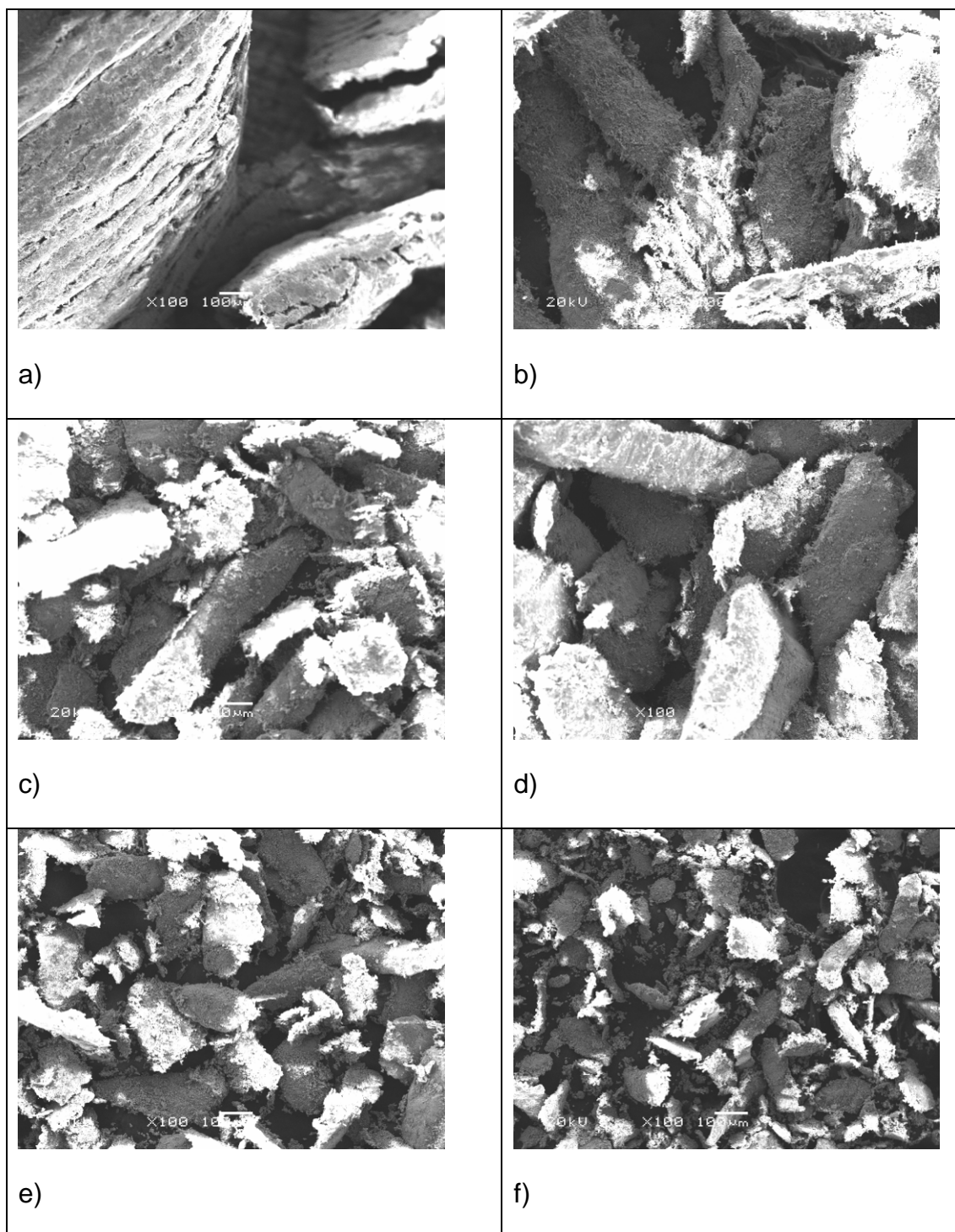


Figura 25 : Resíduo de (Ferrotron®): a)resíduo bruto b) moído passante na peneira de 20# c) moído passante na peneira de 35# d) moído passante na peneira de 60# e) moído passante na peneira de 80# f) moído passante na peneira de 140#

Como foi mencionado anteriormente, entre os vários requisitos necessários para a fabricação de materiais magnéticos está o fato de que a massa deverá ser constituída por grânulos de geometria esférica, ou aproximadamente esférica, de tamanho superior a 60 μm , e textura menos rugosa possível. Como pode-se observar na Figura 25, o material moído passante na peneira 140# (Figura 25f), corresponde aquele com melhor homogeneidade na distribuição das partículas, e esse comportamento é um fator importante para elaboração do compósito ⁽⁶⁾. Por isso, no presente trabalho, esse foi o resíduo (Figura 25f) empregado para a obtenção do compósito magnético. Pela Figura 26 pode-se observar que a maior concentração da massa passante acumulada apresenta uma distribuição com tamanho entre 250 e 500 μm , apresentando dessa forma uma amostra com uma boa distribuição granulométrica.

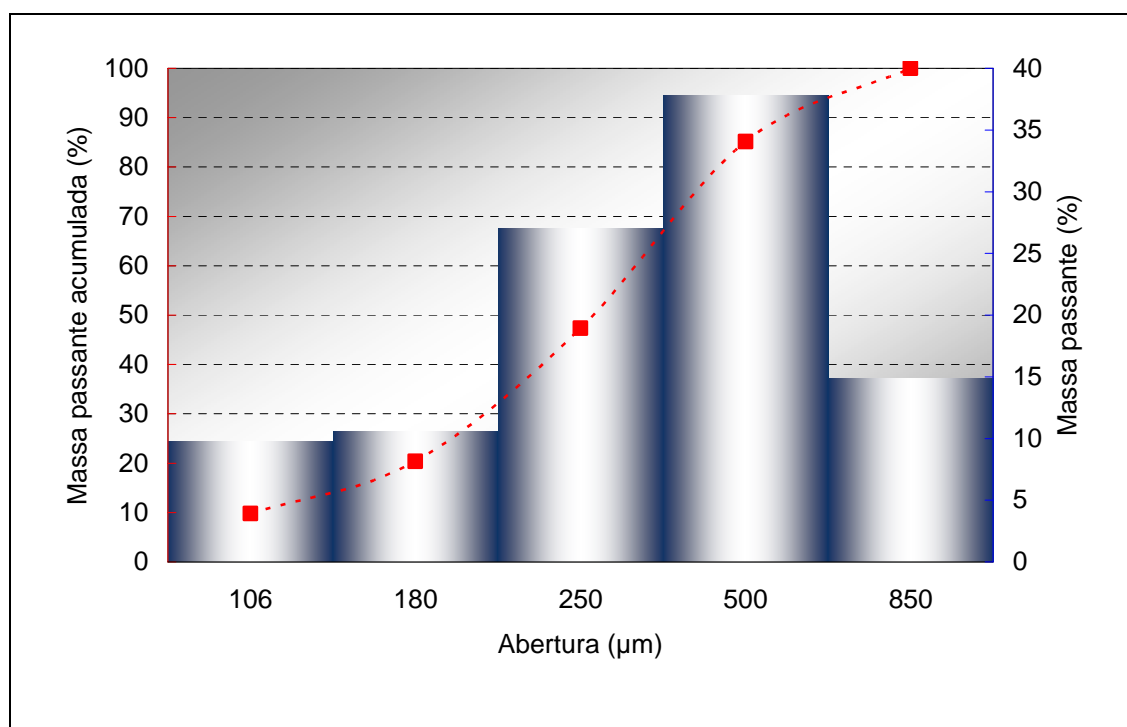


Figura 26 : Distribuição granulométrica do resíduo moído passante na peneira de 140# (Figura 25f).

5.1.3. Caracterização quanto à composição

A partir da Figura 27 observa-se que o material magnético original é composto basicamente por ferro e níquel, formando um composto conhecido pelo nome kamacita. Este composto de estrutura cúbica de corpo centrado é constituído basicamente de ferro metálico com aproximadamente 7,5% de níquel e tem como características excelentes propriedades elétricas e magnéticas ⁽⁴⁸⁾.

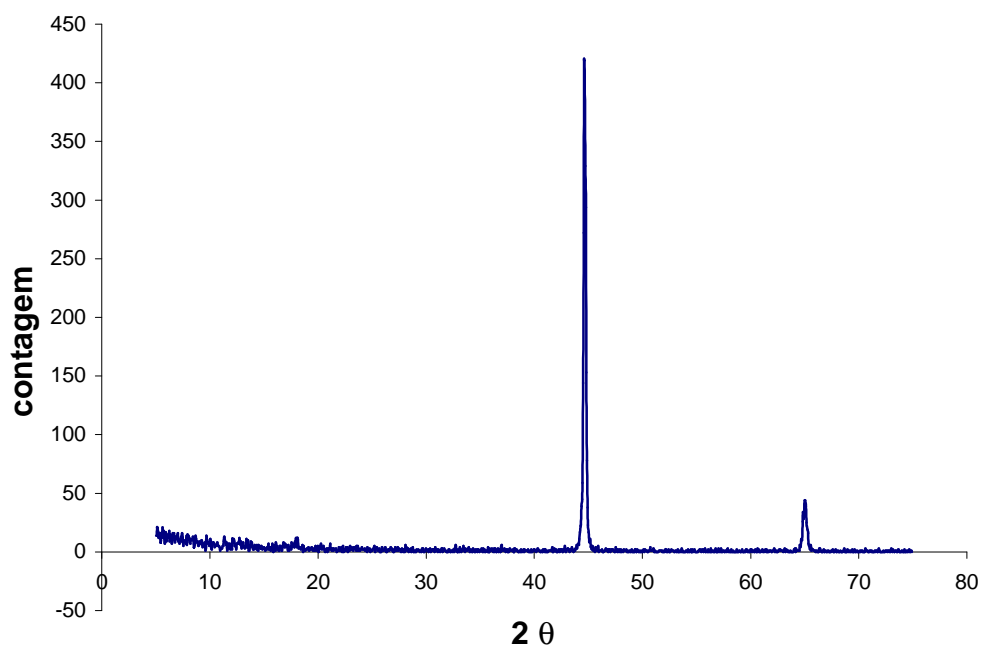


Figura 27: Difratograma do resíduo de material magnético (Ferrotron®)

5.2. Caracterização do compósito magnético:

5.2.1. Caracterização ambiental

Na Tabela 9 e na Tabela 10 estão apresentadas as análises de lixiviação e solubilização dos compósitos de ferrotron 140# + resina.

A partir da análise de lixiviação, os compósitos de Ferrotron®+ resina foram classificados como sendo resíduo de classe II - não perigoso. E a partir do ensaio de solubilização os mesmos foram classificados como pertencente à classe IIA - Não inerte. Dessa forma, os compósitos foram então classificados como: resíduo não inerte - classe IIA, demonstrado que apesar da adição da resina, não houve alteração da classificação ambiental do resíduo. Além disso, é possível observar que adição da resina aprimorou a capacidade do compósito em encapsular alguns elementos químicos, reduzindo a presença do mesmo no lixiviado e no solubilizado. Elementos como: fluoreto, sódio, cobre, zinco, ferro, fenol, cloretos e sulfatos sua presença no lixiviado e no solubilizado foram reduzidas para ambos os compósitos comparado ao material original. Essa propriedade é muito importante pois impede que elementos desse material quando disposto como resíduo lixivem ou solubilizem para o meio externo.

Tabela 9 : Análise de lixiviação compósito

Parâmetro	Ferrottron +3% resina CR2001	Ferrottron +3% resina HRJ	Limite máximo (mg.L⁻¹)
Arsênio (µg.l ⁻¹)	<1,5	<1,5	1,0
Bário (mg.l ⁻¹)	<0,5	<0,5	70
Cádmio (mg.l ⁻¹)	<0,005	<0,005	0,5
Chumbo (mg.l ⁻¹)	<0,005	<0,005	1,0
Cromo Total (mg.l ⁻¹)	<0,003	0,183	5,0
Mercúrio (µg.l ⁻¹)	<0,05	<0,05	0,1
Prata (mg.l ⁻¹)	<0,0015	<0,0015	5,0
Fluoreto (mg.l ⁻¹)	0	0,54	150
Selênio (µg.l ⁻¹)	<2,0	<2,0	1,0

Tabela 10 : Análise de solubilização compósito

Parâmetro	Ferrottron +3% resina CR2001	Ferrottron +3% resina HRJ	Limite máximo (mg.l⁻¹)
Alumínio (mg.l ⁻¹)	0,2	0,316	0,2
Arsênio (µg.l ⁻¹)	<1,5	<1,5	0,01
Bário (mg.l ⁻¹)	<0,5	<0,5	0,7
Cádmio (mg.l ⁻¹)	<0,005	<0,005	0,005
Sódio (mg.l ⁻¹)	0,116	0,457	200
Cobre (mg.l ⁻¹)	<0,0015	<0,0015	2,0
Zinco (mg.l ⁻¹)	<0,0015	<0,0015	5,0
Chumbo (mg.l ⁻¹)	<0,005	<0,005	0,01
Cromo Total (mg.l ⁻¹)	<0,003	<0,003	0,05
Ferro (mg.l ⁻¹)	<0,03	0,438	0,3
Manganês (mg.l ⁻¹)	0,215	<0,0015	0,1
Mercúrio (µg.l ⁻¹)	<0,005	<0,005	0,001
Fenol (mg.l ⁻¹)	<0,001	<0,001	0,01
Nitrato (mg.l ⁻¹)	<0,004	<0,004	10,0
Cianeto (mg.l ⁻¹)	<0,0003	<0,0003	0,07
Sulfato (mg.l ⁻¹)	<1,0	<1,0	250,0
Surfactantes (mg.l ⁻¹)	0,133	0,34	0,5
Cloreto (mg.l ⁻¹)	3,59	2,15	250,0
Fluoreto (mg.l ⁻¹)	0	0	1,5
Prata (mg.l ⁻¹)	<0,0015	<0,0015	0,05
Selênio (µg.l ⁻¹)	<2,0	<2,0	0,01

5.2.2. Caracterização morfológica e física

Pela análise do aspecto da superfície das amostras (Figura 28) é possível observar uma morfologia muito semelhante para os três sistemas estudados.

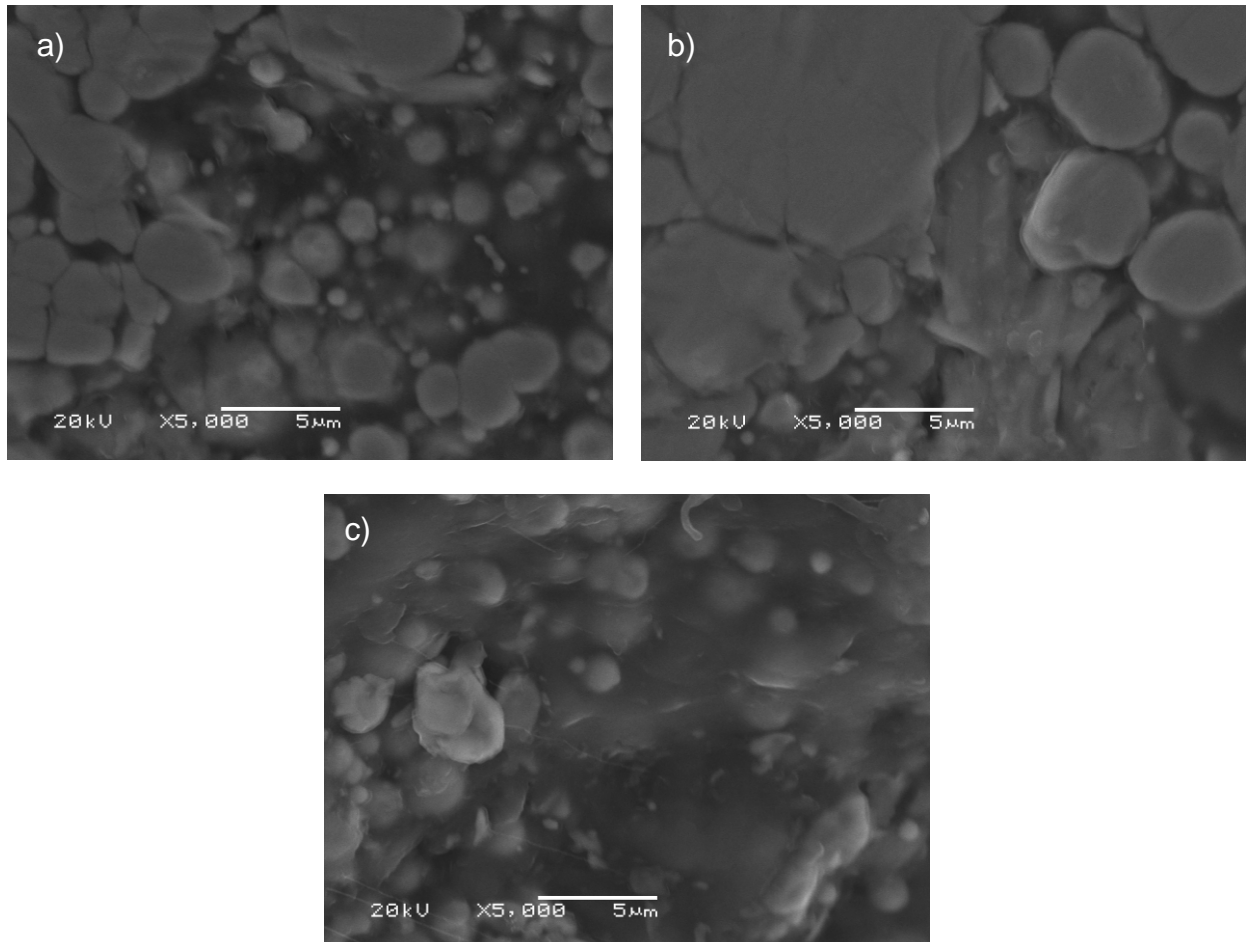


Figura 28: Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron

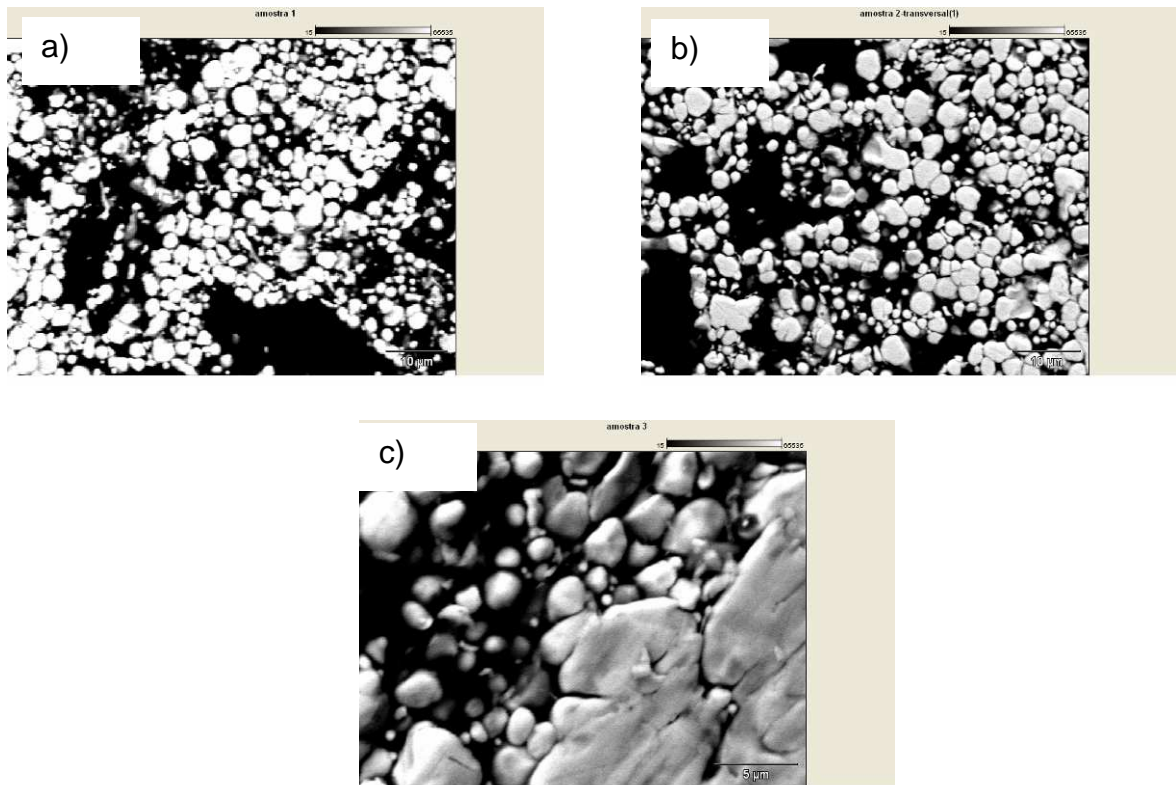


Figura 29: Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotrotron

As imagens obtidas com elétrons retroespalhados (Figura 29) evidenciam as regiões constituídas por resina (regiões escuras) e pela kamacita que é composto por Fe e Ni (regiões claras). Os resultados mostraram que mesmo a amostra original de Ferrotron® já apresentava em sua constituição a presença de uma resina que deve atuar como ligante entre as partículas. Os compósitos magnéticos elaborados (Figura 29a e Figura 29b) apresentaram grãos menores e conseqüentemente uma maior área de contorno de grão.

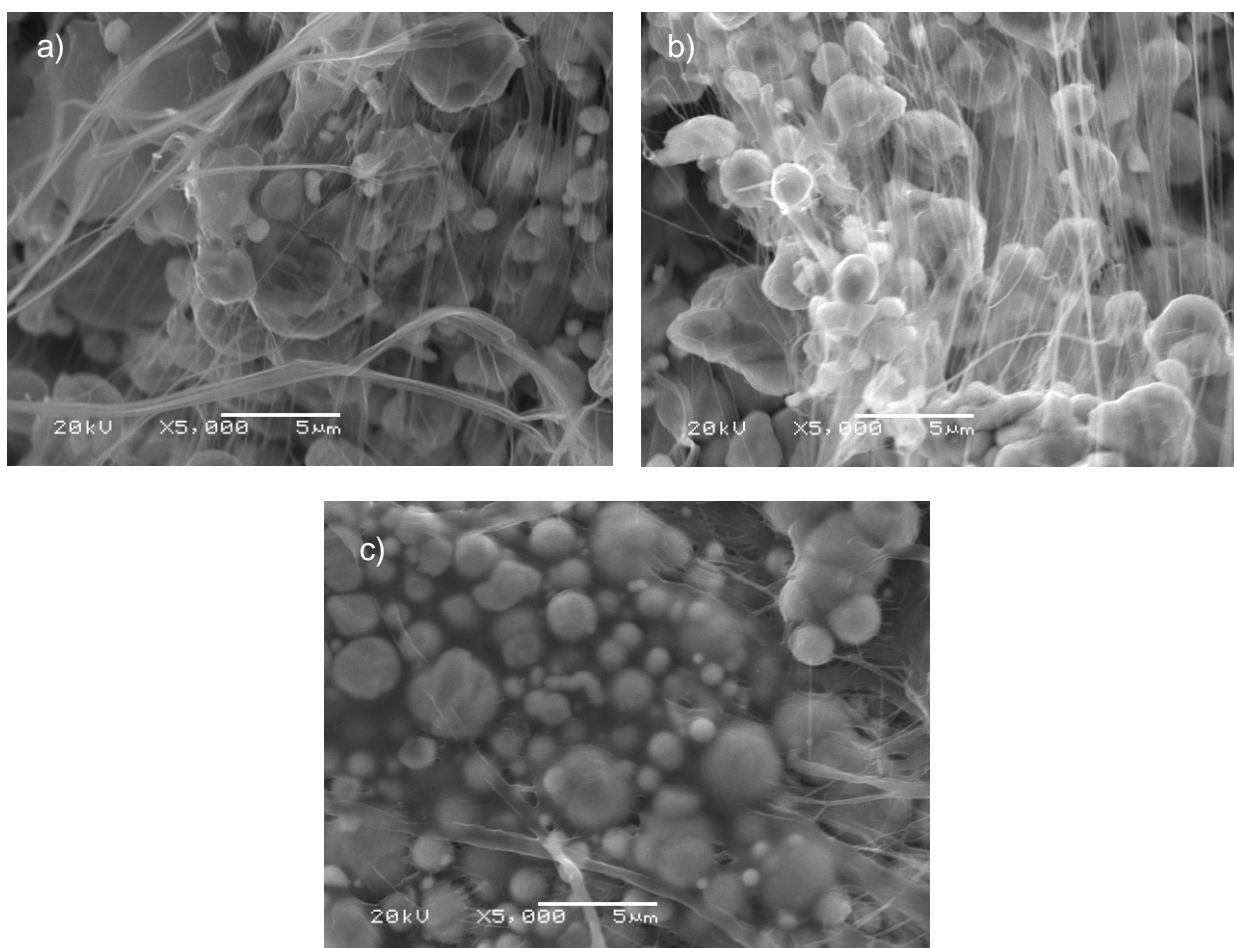


Figura 30: Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron

A avaliação da morfologia das amostras na região de fratura (após o ensaio de compressão) (Figura 30 e Figura 31) evidencia a presença de resina na composição do material original. Para os compósitos elaborados (Ferrotron+ 3% resina CR2001 e Ferrotron+ 3% resina HRJ) a quantidade de resina parece ainda maior, o que pode ser observado pelo estiramento da resina (Figura 30a e b e Figura 31a e b) bem como, o grau de porosidade (Figura 30a e b). Como já foi mencionada, a porosidade tem influência negativa tanto sobre as propriedades magnéticas como sobre a resistência mecânica dos materiais. A porosidade exerce um efeito negativo sobre a resistência à flexão por dois motivos: os poros reduzem a área da seção reta através da qual uma carga é aplicada e eles também atuam como

concentradores de tensões ⁽²⁾. Além disso, o aumento da porosidade gera uma redução da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade e da resistividade ⁽²⁹⁾.

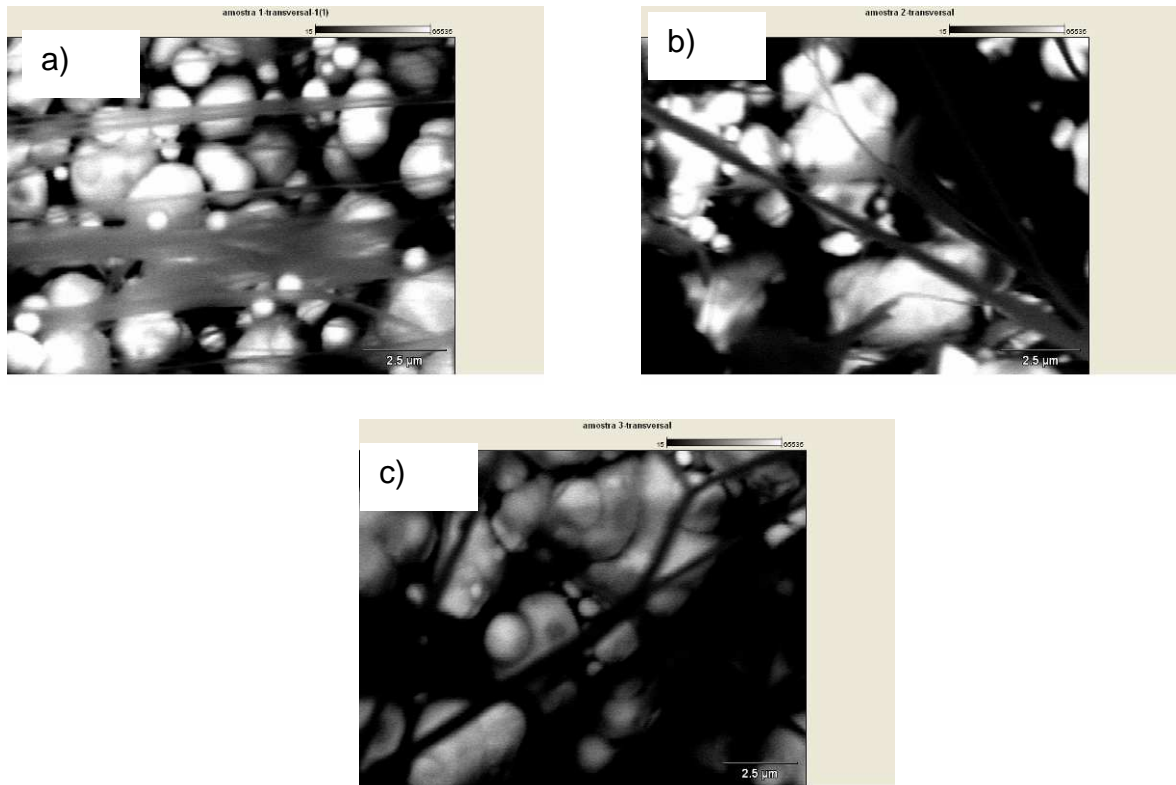


Figura 31: Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados: a) Compósito (Ferrotron+ 3% resina CR2001) b) Compósito (Ferrotron+ 3% resina HRJ) c) Amostra original de ferrotron

Conforme análise por EDS, a presença de ferro, como elemento predominante é confirmada em todas as amostras (Figura 32), ainda que por difração de Raio-X (Figura 27) seja possível observar que o material magnético original é composto basicamente por ferro e níquel. Essa técnica de caracterização analisa pontos da amostra, e essa pode ser a causa de não ter encontrado níquel, ou seja, as regiões analisadas não continham esse elemento, uma vez que não é o predominante, tem em torno de 7,5%.

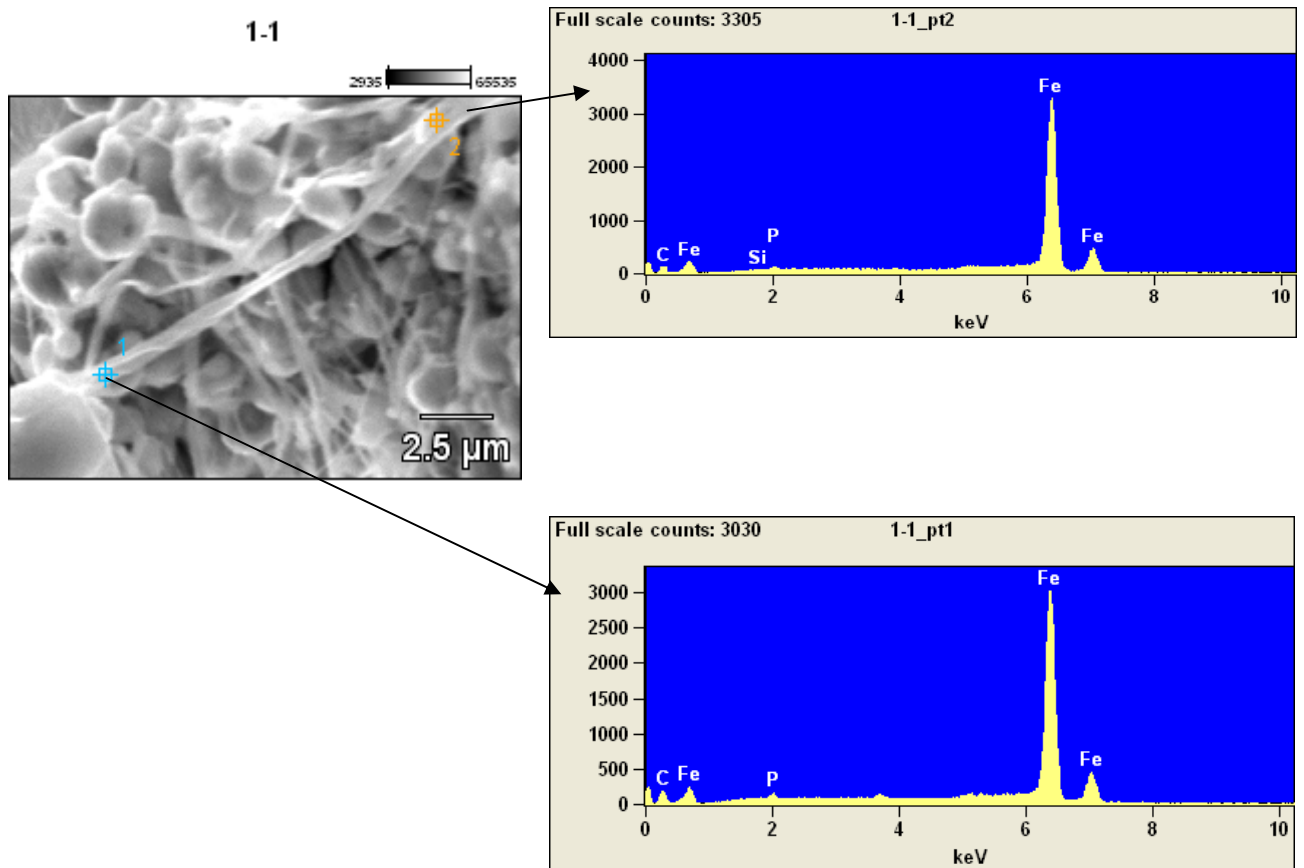


Figura 32:Análise por EDS na região da fratura do Compósito Ferrotron+ 3% resina HRJ região da fratura

A Tabela 11 apresenta os resultados obtidos quanto à densidade do material. Foi possível observar que os compósitos magnéticos apresentaram uma densidade inferior ao material original Ferrotron®, indicando a presença de porosidade no compósito. Essa diferença pode ser uma consequência da pressão de compactação utilizada, Figura 13. A faixa escolhida para o presente trabalho corresponde àquela com menor geração de tensão, Figura 14, no entanto, não é a melhor condição para maiores valores de densidade.

Tabela 11 : Resultados de densidade

Amostra	Densidade g/cm ³
Ferrotron +3% resina CR2001	1,21
Ferrotron +3% resina HRJ	0,92
Ferrotron	2,08

5.2.3. Caracterização quanto ao comportamento térmico

Os resultados obtidos por análise térmica (Figura 33, Figura 34 e Figura 35) mostram o efeito da adição das resinas HRJ e CR2001 nos compósitos magnéticos elaborados. Enquanto o material original Ferrotron® apresentou apenas um evento térmico a 593 °C, os compósitos com as resinas HRJ e CR2001 apresentaram um evento principal próximo a essa temperatura, 576 °C e 583 °C, respectivamente, além de mais 4 eventos. Isso está associado possivelmente ao comportamento térmico das resinas adicionadas e indica que os compósitos elaborados podem sofrer alterações, ainda que de pequena importância, antes de 500 °C. Porém a temperatura de trabalho prevista para esse material está abaixo de 300 °C, estando bem abaixo do pico da primeira degradação para ambos os materiais. Além disso, pela avaliação da perda de massa observou-se que o material original e os compósitos apresentaram comportamento similar, ou seja, percentual de resíduo na ordem de 95%. Esse percentual equivale ao material que restou após análise térmica, apenas 5% degradou.

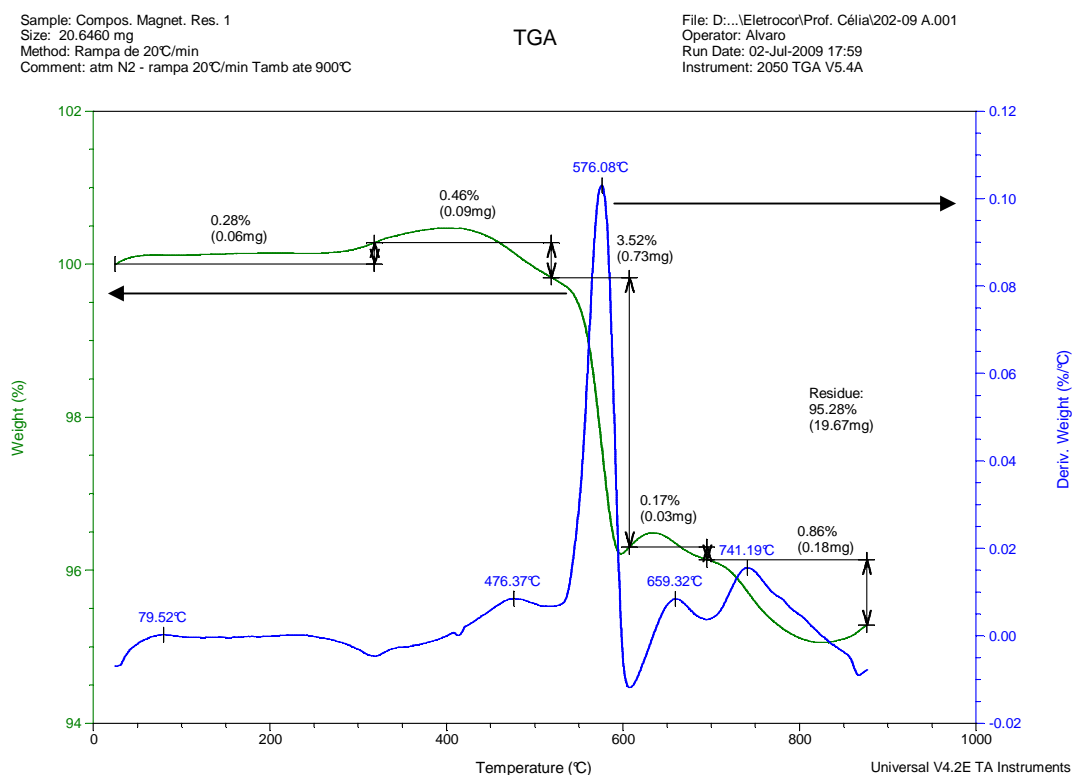


Figura 33 - Curva TGA e sua derivada, DTG para a amostras de Ferrotron® + HRJ

Sample: Compos. Magnet. Res. 2
Size: 20.9060 mg
Method: Rampa de 20°C/min
Comment: atm N2 - rampa 20°C/min Tamb ate 900°C

TGA

File: D:\...Eletrocon\Prof. Célia\202-09 B.001
Operator: Alvaro
Run Date: 02-Jul-2009 19:23
Instrument: 2050 TGA V5.4A

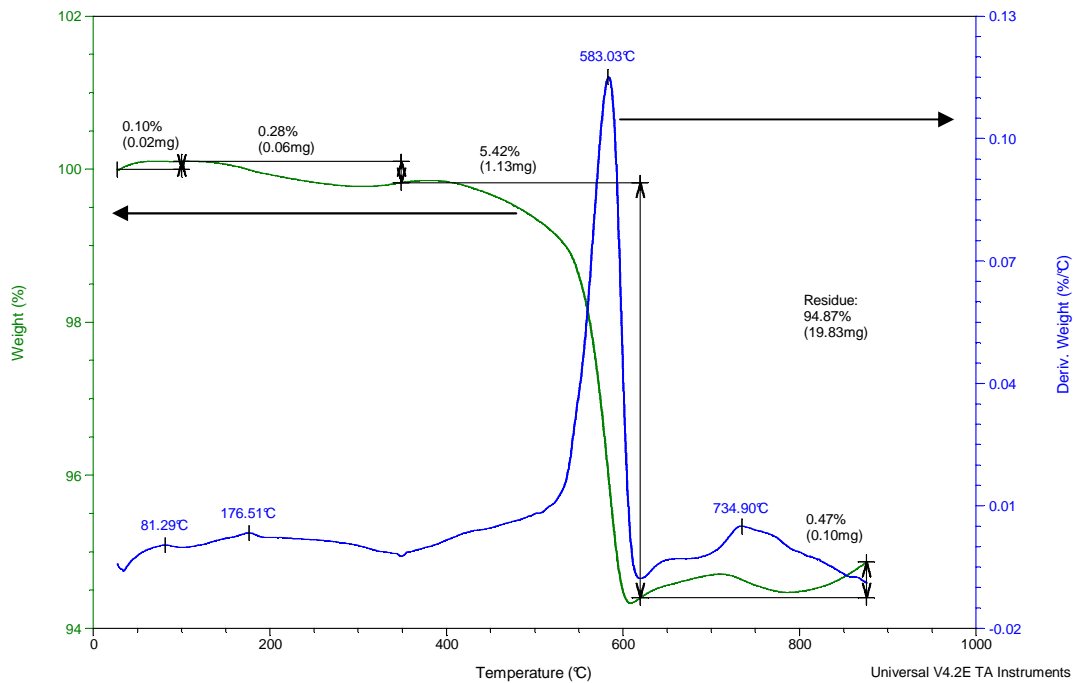


Figura 34 - Curva TGA e sua derivada, DTG para a amostra: Ferrotron® + CR2001

Sample: Compos. Magnet. Res. 3
Size: 20.6810 mg
Method: Rampa de 20°C/min
Comment: atm N2 - rampa 20°C/min Tamb ate 900°C

TGA

File: D:\...Eletrocon\Prof. Célia\202-09 C.001
Operator: Alvaro
Run Date: 02-Jul-2009 20:49
Instrument: 2050 TGA V5.4A

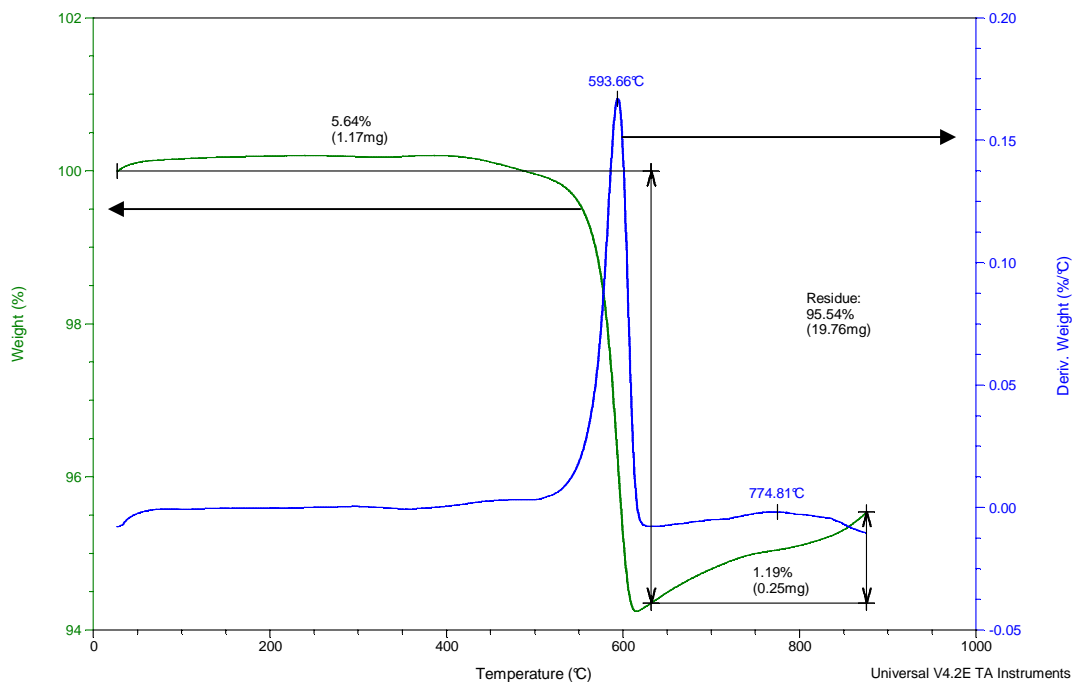


Figura 35 - Curva TGA e sua derivada, DTG para amostra de Ferrotron®

5.2.4. Caracterização quanto ao comportamento mecânico

Os resultados obtidos no ensaio de compressão e de dureza estão apresentados na Figura 36 e na Tabela 12. A partir desses resultados foi possível observar que de um modo geral os compósitos elaborados apresentaram valores de resistência à compressão e de dureza semelhantes entre si e inferiores ao valor observado para o material original. Dessa forma, observou-se que o tipo de resina utilizada não influenciou nas propriedades mecânicas. Esperava-se que a resina CR2001, por apresentar epóxi em sua composição, agregasse ao compósito um melhor comportamento mecânico comparativamente à resina HRJ, contudo para a concentração de 3% de resina esse efeito não foi observado.

5.2.4.1. Resistência à compressão e dureza

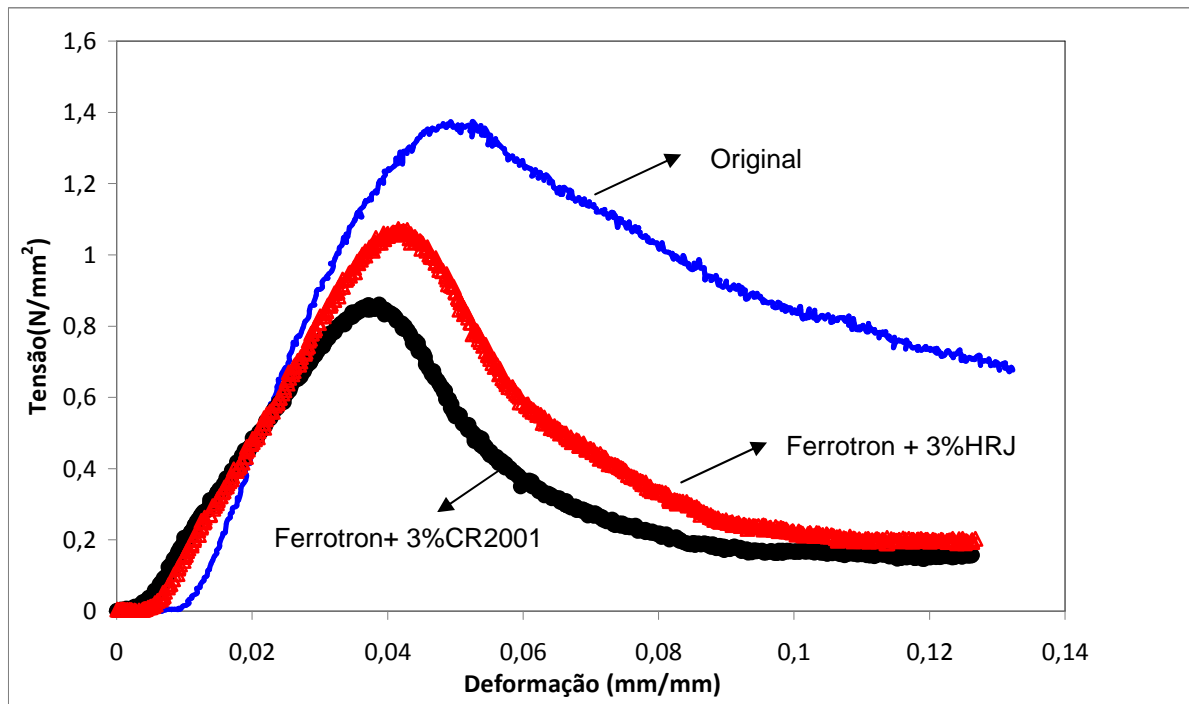


Figura 36: Diagrama tensão x deformação

Tabela 12 : Resultados dos ensaios de compressão e dureza

Amostra	Tensão Máxima (N/mm ²)	Módulo de Elasticidade (MPa)	Dureza (HB)
Ferrotron +3% resina CR2001	0,9	21	7
Ferrotron +3% resina HRJ	1,1	23	7
Ferrotron	1,4	28	10

Inúmeros fatores podem afetar essas propriedades mecânicas, dentre esses fatores podem ser citados: a quantidade de resina adicionada, parâmetros de processamento (tais como pressão de compactação) e tamanho das partículas. Além das alterações em função da microestrutura do material, a redução de resistência mecânica pode ser consequência de micro tensões originadas no processo de compactação ⁽³⁷⁾. Apesar da compactação ter sido realizada dentro da faixa que produz menores tensões (Figura 14).

As imagens obtidas no MEV (Figura 30) mostraram que os compósitos apresentam maior porosidade comparativamente ao material original, propriedade também confirmada pela análise de densidade. Além disso, a presença de uma maior quantidade de resina também é evidenciada na morfologia pelas imagens de topo (Figura 29) e na fratura (Figura 31). Entretanto, pela análise de comportamento térmico observou-se que a perda de massa para o material original e para os compósitos apresentaram comportamento similar, ou seja, percentual de resíduo na ordem de 95%. Dessa forma, a presença de tensões (devido ausência de tratamento térmico), a microestrutura e a presença de porosidades podem ter sido os principais fatores que contribuíram para diminuição da resistência mecânica dos compósitos.

5.2.5. Caracterização quanto ao comportamento magnético

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de caracterização magnética (Figura 37, Figura 38, Tabela 13 e Tabela 14) foi possível observar que para as duas frequências avaliadas os compósitos elaborados com as resinas HRJ e CR2001 apresentaram : redução da permeabilidade em torno de 35% comparativamente ao material original. Um dos fatores que pode ter levado a redução da permeabilidade, é o tamanho da partícula, como apresentado na Figura 29, sendo a dos compósitos menores que a do material original (Ferrotron®). Material com partículas menores tem permeabilidade inicial menor que materiais com partículas maiores.⁽³⁹⁾ Não foi evidenciado um aumento importante da coercividade, ou seja, a porosidade e os defeitos não foram o suficiente para restringir os movimentos das paredes do domínio.

No entanto, os valores das perdas magnéticas foram reduzidas para ambos os compósitos. Essa redução pode ser consequência da adição da resina que agiu como isolante elétrico, em torno das partículas de Ferrotron®, pois a adição de resina reduz perdas por correntes parasitas ^(25, 26). Da mesma forma a adição de resina ou mesmo a presença de poros também deve ter sido responsável pela redução da permeabilidade magnética, pois nesse caso o fluxo magnético tem que passar por partes não magnéticas que são constituídas pela resina e pelos poros ⁽⁴⁹⁾.

É importante ressaltar que apesar da permeabilidade do material ter reduzido, em virtude dos defeitos estruturais, do tamanho de partícula e da pressão de compactação, essa variação não afetou os resultados das perdas, pois a mesma foi recuperada devido à adição da resina, que está agindo como isolante. Como foi possível observar pela análise de MEV (Figura 29 e Figura 31), a amostra original também apresenta resina, que neste material atua como ligante e isolante elétrico, portanto o incremento do volume de resina colaborou para a diminuição das perdas por histerese.

A adição de 3% de resina (independentemente do tipo de resina) gerou um aumento da resistividade elétrica, como pode ser observado na Tabela 15, a resistência dos compósitos aumentou ao ponto de extrapolar a escala do equipamento utilizado para medição. Dessa forma, não foi possível ser determinado o valor exato da resistividade elétrica dos compósitos.

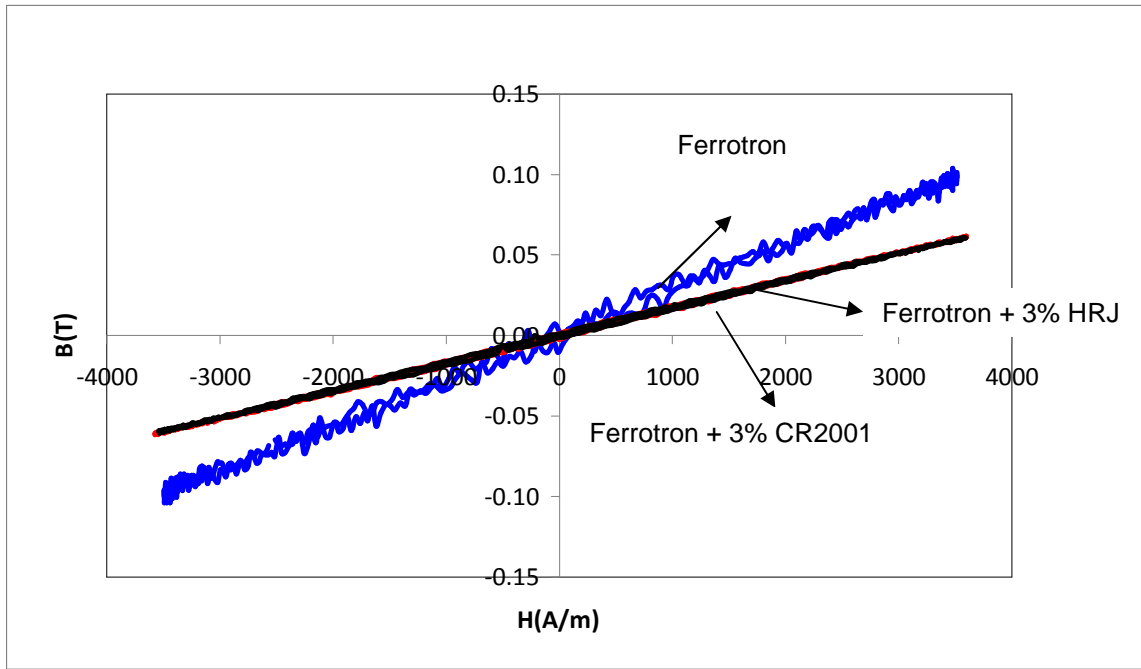


Figura 37: Curva de histerese do material original e do material com resina em frequência 60Hz

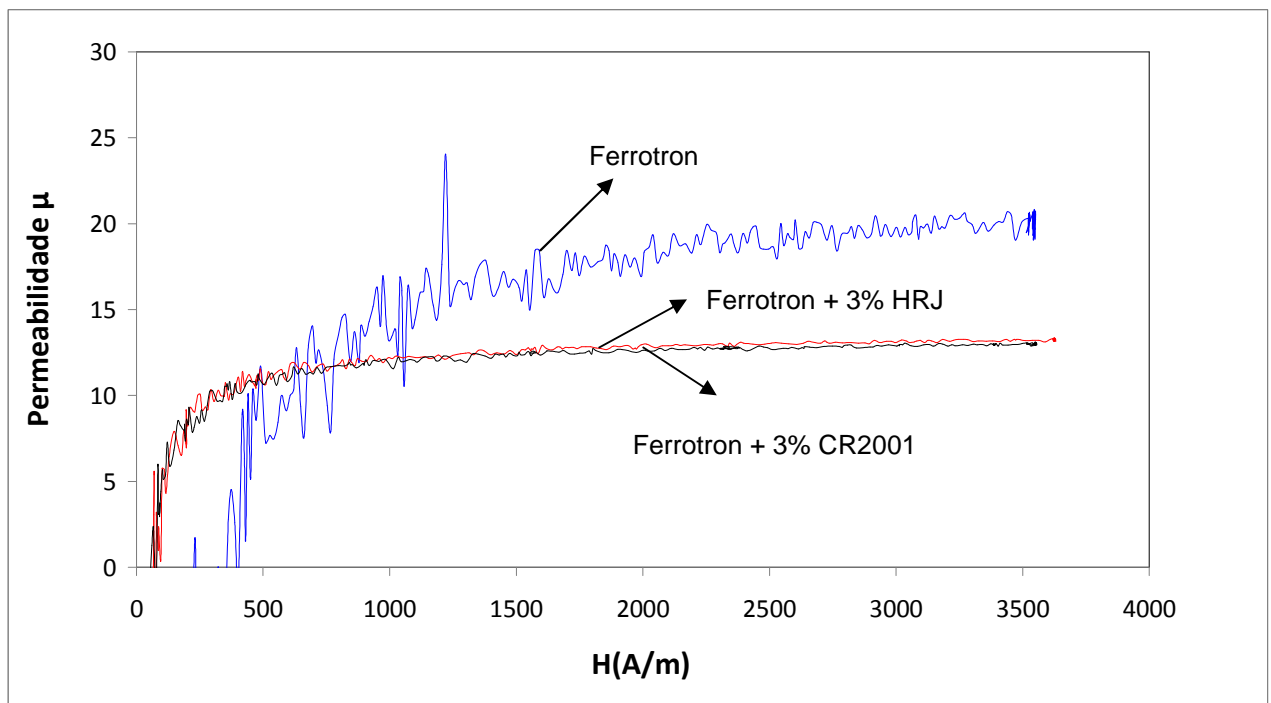


Figura 38: Curva de magnetização amostra original e amostra com resina em frequência 60Hz

Tabela 13 : Resultados de permeabilidade magnética e perdas em frequência de 60Hz

Amostra	Permeabilidade relativa	Frequência	Perdas (J/m³)
Ferrotron + 3% resina CR2001	12	60 Hz	12,79
Ferrotron + 3% resina HRJ	13		13,40
Ferrotron	20		29,03

Tabela 14: Resultados de permeabilidade magnética e perdas em frequência de 400Hz

Amostra	Permeabilidade relativa	Frequência	Perdas (J/m³)
Ferrotron + 3% resina CR2001	12	400 Hz	15,10
Ferrotron + 3% resina HRJ	12		15,35
Ferrotron	20		32

Tabela 15 : Resultados e resistividade elétrica

Amostra	Resistividade elétrica – KOhm.cm
Ferrotron + 3% resina CR2001	>8106,44
Ferrotron + 3% resina HRJ	>8106,44
Ferrotron	8106,44

5.2.6. Análise Financeira:

A análise financeira foi realizada de acordo com a Tabela 16. Como é possível observar, a elaboração dos concentradores de fluxo a partir do resíduo permitiu a redução do custo em até 92%.

Tabela 16: Análise de custo

	Custo para elaboração do compósito					
	Moer - Peso em (g)		Resina- Peso em (g) (referente a 3%)		Mao de obra- Valor Hora	
	2000	R\$ 500,00	1000	R\$ 300,00	1	R\$ 5,00
	75	R\$ 18,75	2,1	R\$ 0,63	8,00	R\$ 40,00
Custo peça ferrotron 2" x2" original	R\$ 688,17					
Custo peça	R\$ 58,13					
% Redução						92

5. CONCLUSÃO

Verificou-se que é possível a elaboração do compósito magnético a partir do resíduo de concentrador de fluxo.

O comportamento térmico dos compósitos é muito semelhante ao comportamento do material original.

Os compósitos obtidos tiveram seus desempenhos quanto às propriedades mecânicas e magnéticas muito semelhantes, indicando que o tipo de resina, no percentual empregado, não tem influência nessas propriedades estudadas. Contudo, os compósitos apresentaram o desempenho quanto às propriedades mecânicas inferior ao material original. Houve uma redução da resistência mecânica à compressão na ordem de 14 %.

Com relação à resistividade elétrica houve uma significativa elevação dessa propriedade em relação ao material original, porém, devido à limitação do equipamento empregado não foi possível determinar o valor exato. Como consequência dessa propriedade, os compósitos elaborados apresentaram uma melhor performance em relação as perdas magnéticas. Os compósitos apresentaram perdas magnéticas na ordem de 15 J/m³ enquanto o material original apresentou perdas magnéticas na ordem de 32 J/m³.

Em relação à análise de caracterização ambiental não houve alteração, o material manteve-se como resíduo não inerte-classe II A e os compósitos elaborados aprimoraram a sua capacidade de encapsular os elementos químicos presentes em sua composição quando submetidos a processos de lixiviação e solubilização.

Os resultados obtidos nesse trabalho mostraram que os compósitos desenvolvidos empregando resíduos de concentradores de fluxo possuem potencial de uso como concentrador de fluxo em um processo de têmpera por indução, apesar de que algumas propriedades tenham sido reduzidas. O processo apresenta-se como uma excelente alternativa para a redução de impacto ambiental e de custo. Uma análise financeira demonstra que existe a possibilidade de redução do valor por peça de até 92%.

6. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar os parâmetros de elaboração do compósito magnético visando à redução da porosidade e otimização das propriedades mecânicas.
- Desenvolver uma técnica para determinação dos valores elevados de resistividade dos compósitos.
- Avaliar o desempenho do compósito em escala industrial um processo de têmpera por indução.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- 1 Rudnev, V. I. An objective assessment of magnetic flux concentrators. Heat Treating Progress December, 19- 23, 2004.
- 2 Jiles, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London, Chapman and Hall, 1991. 440p.
- 3 Borges, g.j. Estudo do comportamento magnético de filmes finos eletrodepositados que apresentam magnetização perpendicular – UFRGS – 2007.
- 4 Bohn, F. – Magnetostricção e ruído de Barkhausen em aços elétricos de grão não orientado - Universidade Federal de Santa Maria – 2005.
- 5 Bertotti, G. Connection between microstructure and magnetic properties of soft magnetic materials. Science direct. Journal of Magnetism and Magnetic Materials 3020(2008)2436-2442. Disponível em <http://www.sciencedirect.com> – acessado em 20/08/2008.
- 6 Silva, V.J.; Barros, B.S.; Costa, A.C.F.M.; Kiminami, R.H.G.A.; Cornejo, D.R. . Ferritas Ni_{0,5}Zn_{0,5} Fe_{0,1}Cr_{1,9}O₄ : Síntese, Morfologia e propriedades magnéticas .In: 17 CBECIMAT- Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006.
- 7 Pereira, C. P.; Rodrigues, M. V. A.; Barcia, F. L.; Soares, B. G. Avaliação das propriedades de compósitos de resina epoxídica reforçadas com fibra de vidro: efeito de diferentes diluentes In: 17 CBECIMAT- Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR, 2006.
- 8 Spectru Instrumental científico LTDA- Tratamento térmico dos aços: Recozimento, Normalização, Têmpera e Revenido, Disponível em: <http://www.spectru.com.br/Metalurgia/diversos/tratamento.pdf>, acessado em: 10/05/2009
- 9 Magnetic Flux Technology for induction process applications- Fluxtrol Manufacturing.Inc., Disponível em: : <http://www.fluxtrol.com/>, acessado em: 20/03/2009
- 10 Rudnev.V. ; Loveless.D.; Cook.R. and Black.M - Handbook of Induction Heating – Editora Marcel Dekker, EUA,2003 – 777p.
- 11 Rudnev.V. ;“An objective assessment of magnetic flux concentrators”, Heat Treating progress, 19-23, 2004.
- 12 Nemkov.V.; Goldstein.R. “Magnetic Flux Controllers for Induction Heating Applications “ Powertrain International Magazine, 8, 8 –12, 2005.

-
- 13 Fluxtrol centre for induction Technology – “Material Characteristics”- 2006, 2 p, Disponível em: <http://www.fluxtrol.com/>, acessado em: 20/03/2009.
- 14 Bassalo. J. M. F. - Crônica da física do estado sólido: magnetismo. Revista Brasileira do Ensino de Física, 16, 1-30, 1994.
- 15 Othmer, K.; “Magnetic Materials”, Encyclopedia of Chemical Technology, John Wiley & Sons, Inc., Interscience, 12, 737-771, 1983.
- 16 Musal H. M. And Bush, G. G., “Validation of Mixture Equations for DielectricComposites”, Journal Applied Physics, 63, 3768-3770, 1998.
- 17 Paulo, E.G.; síntese e caracterização de ferrita de níquel e zinco Nanocristalina por combustão, para aplicação em compósito elastomérico absorvedor de microondas Cahn, DISSERTAÇÃO (Mestrado), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil,2006, 93 p.
- 18 Cullity, B.D. Introduction to Magnetic Materials. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
- 19 Callister, W. – Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais – 2° edição, Editora LTC, Rio de Janeiro, 2002. 589p
- 20 Barbosa, J. S., Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas, DISSERTAÇÃO (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do sul, Brasil, 2009, 83p.
- 21 Cremonesi, A. A metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental.” Materiais Magnéticos Moles” 1a. edição, Editora Metallum Eventos Técnicos, São Paulo, 79-84, 2009.
- 22 Kraus, J.D.; Carver, K.R. Eletromagnetismo. Rio de Janeiro, Guanabara, 1978. 780p
- 23 Chickazumi, S,. “Properties of Magnetic Domain Wall”, Physics of Magnetism, cap 9, pp. 186-204, New York, London, Sydney, John Wiley & Sons, 1964.
- 24 Mussoi, F – Fundamentos de Eletromagnetismo – CEFET/Santa Catarina, Versão 3.3 – 2007.
- 25 Filardo, J. V., “Perdas Magnéticas“, UFP, Disponível em: <http://www.eletrica.ufpr.br/piazza/materiais/JulianoFilardo.pdf> acessado em: 10/04/2009.
- 26 Castro, N. A.; Rodrigues, D.; Landgraf, F. J. G.; Yonamine, T., Henrique M.L. Pó de ferro microencapsulado: efeito do tratamento térmico de

recozimento na redução das perdas magnéticas In:13 CBECIMAT - Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Natal, 2002.

27 Malcolm McCaig Permanent Magnets in Theory and Practice, John Wiley & Sons, Inc., Toronto, 1977.

28 Khedr, M.H. Effect of firing temperature and compacting pressure on the magnetic and electrical properties of nickel ferrite- Journal Physicochemical Problems of Mineral Processing, Vol 38, 311-320, 2004.

29 Dias, M.,M.; Dias.A.M.; Schaeffer.L.; César.J.L. Aplicação de materiais sinterizados em núcleos magnéticos. Revista de engenharia, energia e desenvolvimento sustentável, 69-83, 2005.

30 Lall, C. Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding. Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139p.

31 Popov, Z.P.; Ratchev, T.L.; Yankov, Y. 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, 189-193, 1991.

32 Moyer, K.H. The Effect of Porosity on the Properties of Iron Compacts. Riverton, N.J. Hoeganes Corporation, 1980.

33 James, B.A., Willians, G. Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron. Powder Metallurgy, v. 22, 75-85, 1979.

34 Barboza,J.S.; Schaeffer,.L.; Esswein. J. A. L. Jr.; Cerva. L. L.; Dias. M. M. "Estudo comparativo de ligas magnéticas através de simulação por elementos finitos" in:18 CBECIMAT - Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais,Porto dos Galinhas - PE, 2008.

35 Yi,J.B.; Li, X.P; Ding,J. ; Seet, H.L. Study of the grain size, particle size and roughness of substrate in relation to the magnetic properties of electroplated permalloy - Journal of Alloys and Compounds 428, 230-236, 2007.

36 Albero, J.L.A. A Operação de Prensagem: Considerações Técnicas e sua Aplicação Industrial: Parte 1: O Peenchimento das cavidades do molde – Cerâmica Industrial Vol 5 , Setembro 2000.

37 Hemmati, I.; Madaah Hosseini, H.R.; Kianvash, A. The correlations between processing parameters and magnetic properties of an iron–resin soft magnetic composite- Journal of Magnetism and Magnetic Materials 305, 147–151, 2006.

38 Linhares, D. M. S.; Landgraf, F. J. G.; Janasi, S. R.; Gama; A. M.; Teixeira, J.C. Medida de perdas magnéticas em ferritas de manganês zinco

In:16 CBECIMAT -Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2004.

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. Science Engineering B, 134, 41-43, 2006.

40 Wulf. M.; Anestiev.L.;Dupré.L.;Froyen.L.;Melkebeek.J. “Magnetic properties and loss separation in iron powder soft magnetic composite materials”- journal of applied physics, 91, 7845-7847, 2002.

41 Verma, A., Saxena, A.K.; Dube, D.C. Microwave permittivity and permeability of ferrite–polymer thick films. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 263, 228–234, 2003.

42 Maureen A. Boyle, Cary J. Martin, and John D. Neuner, Hexcel Corporation - Epoxy Resins – ASM Metals Handbook volume 21-composites editora Metals Handbook, 1988.

43 Shahid P. Qureshi, Georgia-Pacific Resins, Inc- Phenolic Resins- ASM Metals Handbook volume 21-composites, editora Metals Handbook, 1988.

44 Leite,J.L.; Pires;A.T.M.;Souza;S.M.A.G.U.;Souza;A.A.U.;Characterisation of a phenolic resin and sugar cane pulp composite, Brazilian Journal of Chemical Engineering, 21, 254-260, 2004.

45 Bateman , S.A.; Caulfield,.M.J.; Munton,J.R.; Solomon, D.H.; Control of reactivity of novolac resins : the use of 3,4 –dihydro- 2H- pyran as a labile protecting group . Elsevier science LTDA, polymer, 42 , 6339-6345, 2001

46 Barboza,J.S.; Schaeffer,.L.; Esswein. J. A. L. Jr.; Cerva. L. L.; Dias. M. M.;”Influência da variação do teor de resina nas propriedades magnéticas de compósitos magnéticos macios aplicados a núcleos de máquinas elétricas” in:18 CBECIMAT - Congresso Brasileiro de engenharia e Ciência dos Materiais, Porto dos galinhas - PE, 2008.

47 Neag, C.M.; Coatings Characterization by Thermal Analysis, ASTM Manual 17, American Society for Testing and Materials, West Conshocken, , 1995, 850p.

48 Ramsdem, A.R.; Camero, E. N. Kamacite e Taenite superstrutures and a metastable tetragonal phase in Iron meteoritos – The American Mineralogist, 51, 48- 52, 1966.

49 Cremonezi, A.; Lopes H. A metalurgia do Pó: Alternativa econômica com menor impacto ambiental. “SMC - Compósitos Magnéticos Moles” 1a. edição, Editora Metallum Eventos Técnicos, São Paulo, 85-95, 2009.