

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

Departamento de Metalurgia

ELABORAÇÃO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS

Matias De Angelis Korb

Trabalho de Diplomação

Orientadora: Professora Dra. Célia de Fraga Malfatti
Co-Orientadora: Vanessa Izabel dos Santos Rodrigues

Porto Alegre
2009

Dedico este trabalho de diplomação aos meus pais, Ruben e Margareth, à minha irmã, Mônica, e aos meus amigos pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTO

Aos meus pais pelo apoio e incentivo em todos estes anos.

À professora Célia de Fraga Malfatti pelo suporte e orientação.

À co-orientadora Vanessa Izabel dos Santos Rodrigues pela ajuda e amizade durante toda a realização deste trabalho.

Aos meus colegas de faculdade José Eduardo Fonseca e Daniel Rossi pela amizade durante estes anos de curso.

À minha namorada Caroline Antunes Corrêa pelo apoio e motivação.

Ao meu amigo André Lange pelo companheirismo.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	VI
LISTA DE TABELAS.....	VII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	VIII
RESUMO.....	X
ABSTRACT	XI
1.0 INTRODUÇÃO	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 TRATAMENTO TÉRMICO.....	3
2.1.1 <i>Têmpera</i>	4
2.1.1.1 <i>Têmpera por Indução</i>	4
2.2 CONCENTRADORES DE FLUXO	6
2.2.1 <i>Laminação de concentrador de fluxo</i>	9
2.2.2 <i>Materiais a base de ferro eletrolítico</i>	9
2.2.3 <i>Materiais a base de ferro carbono</i>	9
2.2.4 <i>Ferritas puras ou materiais baseados em ferritas</i>	10
2.2.5 <i>Compósitos magnéticos moles</i>	10
2.2.5.1 <i>Ferrotron 559[®]</i>	11
2.3 PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	12
2.4 FATORES QUE INFLUENCIAM NO COMPORTAMENTO MAGNÉTICO	16
2.4.1 <i>Temperatura</i>	16
2.4.2 <i>Defeitos estruturais</i>	16
2.4.3 <i>Pressão de compactação e características das partículas</i>	17
2.4.4 <i>Adição de material isolante</i>	17
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	20
3.1 CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	20
3.1.1 <i>Caracterização quanto à morfologia e à granulometria</i>	20
3.1.2 <i>Caracterização quanto à composição</i>	20
3.2 ELABORAÇÃO DO COMPÓSITO MAGNÉTICO	20

3.3	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO MAGNÉTICO	22
3.3.1	<i>Caracterização morfológica</i>	22
3.3.2	<i>Caracterização quanto ao comportamento mecânico</i>	22
3.3.2.1	Caracterização quanto à dureza.....	22
3.3.2.2	Caracterização quanto à resistência à compressão	23
3.3.3	<i>Caracterização quanto ao comportamento magnético</i>	23
3.3.4	<i>Caracterização quanto à resistividade</i>	24
3.3.5	<i>Análise de custo</i>	26
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO RESÍDUO.....	27
4.1.1	<i>Caracterização quanto à morfologia e à granulometria</i>	27
4.1.2	<i>Caracterização quanto à composição</i>	27
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO COMPÓSITO MAGNÉTICO	28
4.2.1	<i>Caracterização quanto à morfologia</i>	28
4.2.2	<i>Caracterização quanto ao comportamento mecânico</i>	32
4.2.3	<i>Caracterização quanto ao comportamento magnético</i>	33
4.2.4	<i>Caracterização quanto à resistividade</i>	35
4.2.5	<i>Análise de custo</i>	36
5.0	CONCLUSÕES	37
6.0	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	38
7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho esquemático representando a técnica de têmpera por indução. (a) mostra-se o aquecimento da peça; à direita, (b) o resfriamento subsequente (CHIAVERINI 1996).	6
Figura 2.2	(a) mostra-se a distribuição do campo eletromagnético sem concentrador de fluxo magnético;(b)mostra-se a distribuição do campo eletromagnético com concentrador de fluxo magnético (adaptado pelo autor a partir de RUDNEV 1995).	7
Figura 2.3	Comparação entre os materiais tradicionais e compósitos magnéticos moles (SMC) (adaptado pelo autor a partir de ANDERSSON 2009).	11
Figura 2.4	Curvas esquemáticas de magnetização para um material magnético mole e um duro (RALLS 1976).	14
Figura 3.1	Matriz para compactação da amostra tipo cilindro.	21
Figura 3.2	Matriz para compactação da amostra tipo toroidal.	21
Figura 3.3	Matriz para compactação da amostra tipo barra.	22
Figura 3.4	Amostras para ensaio de compressão: a) amostra original b) compósito com 3% resina HRJ10236® c) compósito com 3% resina CR2001®	23
Figura 3.5	Amostra e dispositivo para análise de comportamento magnético.....	24
Figura 3.6	Montagem do ensaio de resistividade	25
Figura 3.7	Amostras para ensaio de resistividade: a) compósito com 3% resina CR2001® b) compósito com 3% resina HRJ10236® c) amostra original.	26
Figura 4.1	Resíduo empregado para a elaboração do compósito magnético.	27
Figura 4.2	Difratograma do resíduo do material original (ferrotron®).....	28
Figura 4.3	Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários (região da superfície) : a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original).....	29
Figura 4.4	Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados (região da superfície): a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original).....	30
Figura 4.5	Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários (região da fratura): a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original).....	31
Figura 4.6	Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados (região da fratura): a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original).....	32
Figura 4.7	Curvas de histerese na frequência 60 Hz.....	34
Figura 4.8	Curva de permeabilidade na frequência 60 Hz.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Propriedades Físicas do Ferrotron 559 [®] -----	12
Tabela 2.2	Características Técnicas HRJ10236 [®] -----	18
Tabela 2.3	Características Técnicas CR-2001 [®] -----	19
Tabela 3.1	Dimensões das amostras de resistividade-----	26
Tabela 4.1	Densidades das amostras-----	32
Tabela 4.2	Resultados dos ensaios de compressão e dureza-----	33
Tabela 4.3	Resultados de permeabilidade magnética e perdas na frequência de 60 Hz-----	34
Tabela 4.4	Resultados de permeabilidade magnética e perdas na frequência de 400 Hz-----	35
Tabela 4.5	Resultados de resistividade-----	35

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

°C	graus Celsius
kW/cm ²	quilowatt por centímetro quadrado
Hz	Hertz
μ	permeabilidade magnética
T	temperatura
T _C	temperatura Curie
K	Kelvin
g/cm ³	gramas por centímetro cúbico
ohm.cm	ohm centímetro
Gohm.cm	gigaohm centímetro
A/m	ampere por metro
Am ²	ampere metro quadrado
s	segundos
min	minutos
N	Newton
kgf	quilograma força
N/m ²	Newton por metro quadrado
MPa	megapascal
mm	milímetros

m	metro
m ²	metro quadrado
mm/min	milímetros por minuto
J/m ³	Joule por metro cúbico
T	Tesla
Wb	Weber
HB	Dureza Brinell

RESUMO

A utilização de concentradores de fluxo magnético no processo de tratamento térmico de têmpera por indução permite o aumento da eficiência do processo e a redução do custo operacional. No entanto, esses orientadores de fluxo magnético são comercializados normalmente com geometria padrão para uma fácil e rápida instalação e normalmente necessitam de ajustes dimensionais para serem acoplados à bobina de equipamentos específicos. Esse ajuste é normalmente realizado por usinagem do material o que conseqüentemente ocasiona a produção de um resíduo e associado a isso, a geração de custo para tratamento do resíduo e perda de matéria-prima.

A redução de custos, o aumento da produtividade e o tratamento dos resíduos têm sido os principais focos das empresas. Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da possibilidade de reutilização do resíduo de material magnético, oriundo da usinagem do concentrador de fluxo, na fabricação dessa mesma ferramenta a partir do processo de metalurgia do pó. Para isso, foram elaborados compósitos magnéticos a partir do resíduo de material magnético e material isolante (dois tipos de resinas). Foram realizadas as etapas de caracterização do resíduo, elaboração do compósito e avaliação comparativa entre o material original e o compósito magnético quanto às propriedades morfológicas, mecânicas, elétricas e magnéticas.

Os resultados obtidos mostraram que os compósitos desenvolvidos empregando resíduos de concentradores de fluxo magnético possuem potencial de uso como orientador de fluxo magnético em um processo de têmpera por indução. Apesar de que as propriedades mecânicas tenham sido reduzidas, as propriedades magnéticas foram melhoradas indicando dessa forma que o processo de reaproveitamento do resíduo na elaboração do compósito apresenta-se como uma excelente alternativa para a redução de impacto ambiental e de custo do processo. Uma análise de custos demonstrou que existe a possibilidade de redução do valor por peça em até 89%.

ABSTRACT

The use of magnetic flux concentrators in the heat treatment process of induction hardening to increase process efficiency and reducing operating cost. However, these guiding magnetic flux are usually sold with standard geometry for easy and quick to install and usually require adjustments dimensional to be coupled to the coil of special equipment. This adjustment is usually accomplished by machining the material that eventually causes the production of waste and associated with that generation cost for the treatment of waste and loss of raw material.

Reducing costs, increasing productivity and waste treatment have been the main focus of the business. In this context, this work aims to study the possibility of reuse of residual magnetic material, derived from the machining of the hub flow for the manufacture of the same tool from the process of powder metallurgy. For this, magnetic composites were prepared from the residue of magnetic material and insulating material (two types of resins). Steps were performed to characterize the waste, the composite drawing and benchmarking between the original material and the composite magnetic and morphological properties, mechanical, electrical and magnetic.

The results showed that the composites developed using waste magnetic flux concentrators have potential use as a guiding magnetic flux in a process of induction hardening. Although the mechanical properties have been reduced, the magnetic properties have been improved thereby indicating that the process of reusing the waste in the preparation of the composite appears as a great alternative to reduce environmental impact and cost of litigation. A cost analysis showed that there is a possibility of reduction of the number by up to 89%.

1.0 INTRODUÇÃO

O processo de têmpera por indução é um tratamento térmico que tem como objetivo o endurecimento superficial do aço e o seu princípio é baseado no aquecimento indutivo gerado por um campo magnético alternado, o qual induz na peça uma corrente elétrica que percorre a superfície e pela sua resistência provoca o aquecimento. Este processo é adequado quando se deseja promover o aumento da resistência ao desgaste e à fadiga de um componente associando a isso menor risco de trinca e empenamento. As principais vantagens apresentadas em relação à têmpera total são precisão dimensional, menor risco de trincas, endurecimento apenas em áreas críticas da peça e facilidade de aplicação para peças de maiores dimensões.

As empresas procuram sempre tornar seus processos mais eficientes aumentando a produtividade e reduzindo o custo operacional. Na têmpera por indução a energia elétrica é o principal insumo do processo por ser um tratamento térmico dependente da potência do gerador. Uma das técnicas utilizadas para o aumento da eficiência deste processo é a utilização de concentradores de fluxo magnético, ou também conhecidos como orientadores de fluxo magnético.

Os orientadores de fluxo magnético são constituídos basicamente de componentes ferromagnéticos (Fe, Ni e Co puros ou em ligas) e um ligante dielétrico. Esses orientadores de fluxo magnético são comercializados normalmente 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 para serem acoplados à bobina. Esse ajuste é normalmente realizado por usinagem do material o que conseqüentemente ocasiona a produção de um resíduo (cavaco do material magnético). Como conseqüência, tem-se a geração de custo para tratamento do resíduo, perda de matéria-prima e aumento do consumo de recursos naturais.

Pela análise de lixiviação e pelo ensaio de solubilização, o resíduo do orientador de fluxo magnético é classificado como sendo resíduo não inerte - classe IIA. Ou seja, esse resíduo não pode ser descartado indiscriminadamente e introduzi-lo novamente no processo produtivo seria bastante vantajoso.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo o estudo da possibilidade de reutilização do resíduo de material magnético, oriundo da usinagem do concentrador de fluxo na fabricação dessa mesma ferramenta utilizada no processo de têmpera por indução. Para isso foi utilizado resíduo de material magnético mole e material isolante (dois tipos de resinas). Os compósitos magnéticos foram fabricados a partir do processo de metalurgia do pó, misturando-se os materiais na proporção de 97% de material magnético mole e 3 % do material isolante, compactação e cura. Foram realizadas as etapas de caracterização do resíduo, elaboração do compósito e avaliação comparativa entre o material original e o material resinado quanto às propriedades morfológicas, mecânicas, elétricas e magnéticas.

2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Tratamento Térmico

O processo de tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento a que são submetidos os aços sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e velocidade de resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas (CHIAVERINI 1996).

Os principais objetivos dos tratamentos térmicos são os seguintes:

- remoção de tensões (oriundas de esfriamento, trabalho mecânico ou outra causa);
- aumento ou diminuição da dureza;
- aumento da resistência mecânica;
- melhora da ductibilidade;
- melhora da usinabilidade;
- melhora da resistência ao desgaste;
- melhora das propriedades de corte;
- melhora da resistência à corrosão;
- melhora da resistência ao calor;
- modificação das propriedades elétricas e magnéticas.

Os fatores que influenciam nos tratamentos térmicos são: aquecimento, tempo de permanência à temperatura e resfriamento (CHIAVERINI 1996).

2.1.1 Têmpera

O processo de têmpera consiste no aquecimento do aço até sua temperatura de austenitização – entre 815°C e 870°C – seguido de um resfriamento rápido. Os meios de resfriamento utilizados dependem da endurecibilidade dos aços (teor de carbono e presença de elementos de liga), da forma e dimensões das peças submetidas a têmpera, porque o que se procura nessa operação é a obtenção da estrutura martensítica. Os objetivos desse processo, sob ponto de vista de propriedades mecânicas, são aumento da dureza do aço e da sua resistência à tração.

Os meios mais comuns de resfriamento são os seguintes: (CHIAVERINI 1996)

- água;
- salmoura ou aditivos cáusticos;
- óleos;
- soluções aquosas de polímeros.

2.1.1.1 Têmpera por Indução

A têmpera por indução é um tipo de endurecimento superficial aplicado nos aços, é uma têmpera localizada. Os principais motivos de endurecer somente a superfície são:

- resistência ao desgaste;
- resistência à fadiga;
- tensões residuais compressivas na superfície;
- núcleo macio e tenaz;
- menor risco de trinca e nível de empenamento.

As principais vantagens deste processo em relação a têmpera total:

- difícil aplicar têmpera total em peças de grandes seções;
- endurecer somente áreas críticas de certas peças;

- precisão dimensional;
- diminuição do risco de trincas.

No processo de têmpera por indução a peça é envolvida por um condutor, uma bobina, e quando uma corrente alternada flui através deste originará um campo magnético alternado. Este campo magnético alternado produz um campo elétrico na peça que acaba criando uma corrente induzida e pela resistência da própria peça a esta corrente acaba causando o seu aquecimento pelo efeito joule ocorrendo a austenitização.

O aquecimento indutivo depende da forma da bobina de indução que produz o campo magnético, do número de voltas da bobina, da frequência de operação e da força elétrica da corrente alternada. O controle da camada pode ser feito com as seguintes variáveis:

- forma da bobina;
- espaço entre a bobina de indução e a peça;
- densidade de potência (kW/cm²);
- frequência;
- tempo de aquecimento.

Para uma pequena espessura de camada endurecida usa-se corrente de alta frequência, alta densidade de força e tempo reduzido. E para camadas mais espessas usa-se corrente de baixa frequência e períodos de tempo mais longos.

Entre os vários processos para aplicar-se aquecimento superficial por indução, podem-se citar os seguintes:

- têmpera simultânea: a peça a ser temperada é feita girar 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.

- têmpera contínua: a peça, ao mesmo tempo que gira no interior da bobina de indução, move-se ao longo de seu eixo, de modo a se ter uma aplicação progressiva de

calor. O dispositivo de resfriamento está montado a certa distância da bobina (CHIAVERINI 1996).

A figura 2.1 mostra o esquemático da têmpera por indução.

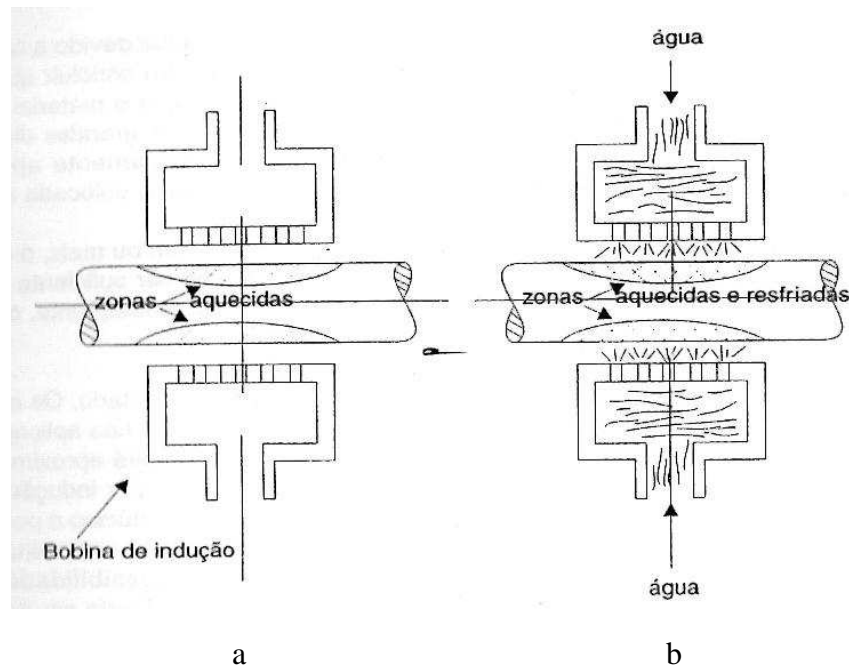


Figura 2.1 Desenho esquemático representando a técnica de têmpera por indução. (a) mostra-se o aquecimento da peça; à direita, (b) o resfriamento subsequente (CHIAVERINI 1996).

2.2 Concentradores de Fluxo

Para um processo de aquecimento indutivo, como a têmpera por indução, é importante pensar na eficiência deste procedimento. A seleção e o dimensionamento de um sistema de aquecimento indutivo é o de minimizar o excesso de potência do gerador indutivo, ou seja, reduzindo o custo operacional.

Se a relutância, resistência ao campo magnético, for diminuída, então para um mesmo valor de potência aplicada à entrada do indutor, estará disponível na saída para ser aplicada a peça, tornando o processo de aquecimento indutivo mais eficiente. Uma das maneiras de melhorar é aproximando o indutor o máximo possível da peça a ser aquecida e assim aumentando a eficiência do processo. Mas a área externa do indutor é a maior região por onde circulam as linhas de fluxo magnético e como o ar tem uma permeabilidade

magnética relativa igual a um, oferece um caminho fraco para as linhas de fluxo magnético no exterior do indutor. A relutância (\mathfrak{R}) pode ser calculada através da equação 1 .

$$\mathfrak{R} = \mathfrak{L} / \Phi \quad (1)$$

Onde:

\mathfrak{L} - força magnetomotriz (espira-ampère)

Φ - fluxo magnético (Wb)

A figura 2.2 abaixo mostra a diferença da distribuição do campo eletromagnético sem e com concentrador de fluxo magnético.

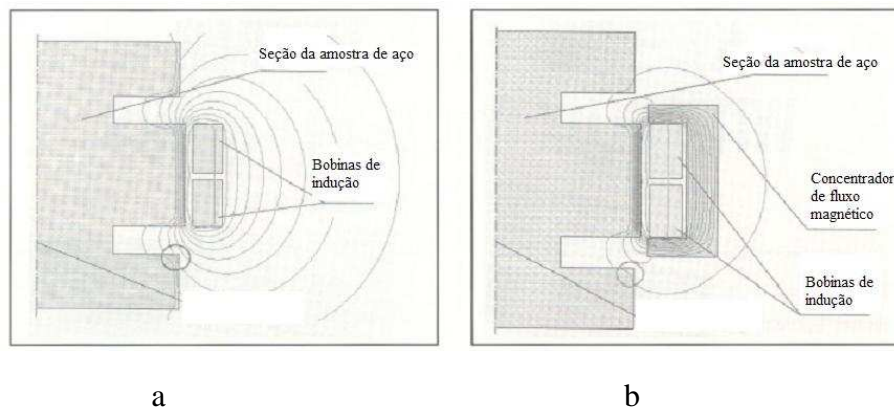


Figura 2.2 (a) mostra-se a distribuição do campo eletromagnético sem concentrador de fluxo magnético;(b)mostra-se a distribuição do campo eletromagnético com concentrador de fluxo magnético (adaptado pelo autor a partir de RUDNEV 1995).

Este fraco caminho na região externa ao indutor pode ser melhorado com a utilização de concentradores de fluxo magnético, os quais têm como objetivo principal canalizar o fluxo magnético. Para a seleção destes materiais devem cuidar as seguintes características:

- permeabilidade magnética (quanto mais alta melhor, isto significa menores perdas);
- nível máximo suportável da densidade do fluxo magnético (nível de saturação);

- usinabilidade;
- facilidade de instalação e remoção;
- capacidade para suportar a temperatura gerada pelo aquecimento da peça e agressão do ambiente (fluido de têmpera);
- fatores econ micos (custo do material, custo para fabrica o, instala o e sua vida útil).

As principais vantagens de utilizar os concentradores de fluxo magnético:

- facilidade em desenvolver o aquecimento da peça, devido ao melhor controle;
- melhores resultados metalúrgicos, devido a maior dureza superficial obtida, com uma potência determinada;
- mais peças por hora, com um indutor existente, devido a melhor eficiência do indutor;
- capacidade para selecionar a profundidade da camada na peça;
- capacidade para bloquear ou aquecer áreas selecionadas e pré determinada da peça;
- proporciona aumento da vida útil do equipamento, pois trabalha com menor densidade de potência (ALBATHERM 2009).

Estes materiais são constituídos de metais, tais como: Fe, Ni, Co e outros elementos. Geralmente, em processos de tratamento térmico de têmpera por indu o são usados materiais magnéticos moles. Sua curva de histerese   caracterizada em ser alta e estreita.

Os materiais mais utilizados para concentrar ou controlar o campo magnético em sistema de aquecimento indutivo são:

- Lamina o de concentrador de fluxo;
- Materiais a base de ferro eletrolítico;

- Materiais a base de ferro carbono;
- Ferritas puras ou materiais baseados em ferritas;
- Materiais compósitos moles.

2.2.1 Laminação de concentrador de fluxo

Estas lâminas são obtidas a partir de chapas de aço silício, tipo grão orientado, e normalmente são utilizadas em transformadores. A montagem desse concentrador de fluxo são várias laminas, 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 0,05 até 0,8 mm. Em comparação a outros materiais de concentradores de fluxo magnético, esse possui uma alta permeabilidade magnética e fluxo de saturação, além disso, tem baixo custo, sendo dessa forma uma vantagem para uso dessas lâminas. Como desvantagem em relação as outros tipos de materiais usados tem-se a questão degradação, os mesmos não são resistentes aos fluidos de refrigeração usados (RUDNEV 2003).

2.2.2 Materiais a base de ferro eletrolítico

Estes materiais foram desenvolvidos especificamente para aplicação em aquecimento indutivo. São facilmente e rapidamente usináveis, fabricados em muitas dimensões, e são classificados em dois tipos de liga com permeabilidade relativa acima de 56. Algumas ligas são para altas frequências (50 a 450 kHz) e outras para baixas frequências (50 Hz a 50 kHz) (RUDNEV 2003). Estes materiais não se deterioram com o tempo, podem ser rapidamente montados e desmontados durante o desenvolvimento do indutor e facilmente retirados e colocados no sistema de bobinas.

2.2.3 Materiais a base de ferro carbono

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 plástico), porém têm tamanhos muito pequenos e baixa permeabilidade ($\mu = 15$). Em termos de propriedades do material, possui uma resistência a temperatura similar aos outros dois materiais citados acima (eletrólitos e lâminas), porém é facilmente atacado por ácido e a profundidade de camada obtida é 10 a 20% menor (ALBATHERM 2009).

2.2.4 Ferritas puras ou materiais baseados em ferritas

As ferritas puras ou materiais a 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 em acordo a geometria da bobina. Quando avaliamos a ferrita em campo magnético fraco a mesma possui uma alta permeabilidade magnética ($\mu = 2000$ plus), porém possui baixa densidade de saturação e baixa ponto de currie (aproximadamente 220°C). Já em relação às propriedades mecânicas as ferritas têm a desvantagem de ser quebradiça sendo considerada um material frágil, dessa forma são difíceis de usinar, e possuem uma baixa resistência a choques térmicos (RUDNEV 2004).

2.2.5 Compósitos magnéticos moles

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

Os compósitos magnéticos moles são produzidos por técnica tradicional de compactação de pó seguido por tratamento térmico a baixas temperaturas, o qual não destrói a camada isolante entre as partículas de ferro. Diferentes propriedades magnéticas e mecânicas são obtidas dependendo do aglutinante, aditivos lubrificantes e camadas orgânicas nas partículas de ferro bem como compactação a quente ou a frio (SHOKROLLAHI 2007). Estes materiais estão sendo desenvolvidos para fornecer materiais com propriedades magnéticas competitivas (boa permeabilidade magnética relativa e saturação magnética), mas com alta resistividade elétrica. A alta resistividade alcançada é um fator importante na elaboração desses atrativos materiais em aplicações de baixas perdas, particularmente em altas frequências. Diferentemente dos materiais convencionais laminados, a resistência elétrica é isotrópica e a isotropia é vista como eliminar as restrições impostas nos materiais convencionais (School of Chemical Engineering and Advanced Materials University of Newcastle 2009).

Esses materiais são compósitos de micropartículas de ferro isoladas, polímero e um catalizador de sensibilidade térmica. O polímero é utilizado como isolante elétrico das partículas ferromagnéticas individuais e garante a integridade dos materiais. A figura 2.3

abaixo mostra a comparação dos materiais tradicionais (lâminas de aço e ferritas) com os compostos magnéticos moles (SMC).

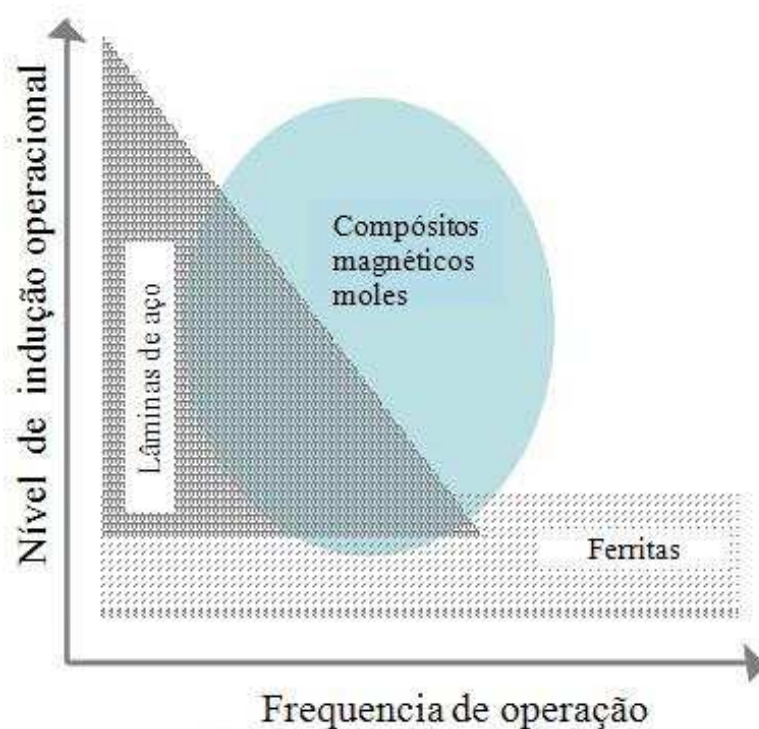


Figura 2.3 Comparação entre os materiais tradicionais e compostos magnéticos moles (SMC) (adaptado pelo autor a partir de ANDERSSON 2009).

Esse material é conhecido comercialmente como Fluxtrol family[®], produzido pela indústria Fluxtrol Manufacturing Inc. Dentro dessa família existem 5 principais materiais: Ferrotron 559[®], Fluxtrol 25[®], Fluxtrol 50[®], Fluxtrol A[®] e Fluxtrol 150[®] (FLUXTROL INC. 2009).

2.2.5.1 Ferrotron 559[®]

Ferrotron 559[®] é um material designado para uso em aplicações de alta frequência (50 KHz para severas MHz). Esse material tem permeabilidade inicial em torno de 16 e máxima permeabilidade 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. Ferrotron 559[®] é facilmente usinável e tem uma boa resistência a temperatura (250°C longo período e 300°C por curto tempo). Segue as características na Tabela 2.1 (FLUXTROL 2009).

Tabela 2.1 Propriedades Físicas do Ferrotron 559®

Propriedades	Unidades	Valor
Densidade	g/cm ³	5,9
Frequencia de operação	kHz	10-3000
Área de maior frequência	kHz	50-1000
Resistividade	kOhm.cm	>15

2.3 Propriedades Magnéticas

Os campos magnéticos são produzidos pelo movimento de cargas elétricas, que por sua vez produz o que conhecemos por força magnética. O magnetismo é um dos fenômenos responsáveis pela atração ou repulsão dos materiais. Exemplos de materiais que facilmente demonstram propriedades magnéticas são: ferro, níquel, cobalto e combinações destes materiais.

O comportamento magnético dos materiais pode variar muito conforme a sua estrutura e o seu arranjo eletrônico. Eles são classificados pelas suas respostas em presença de campo magnético externo como: diamagnéticos, paramagnéticos e ferromagnéticos.

Em uma estrutura cristalina, assim como em um átomo isolado, no máximo dois elétrons podem ocupar cada um dos níveis de energia de um átomo. Esses dois elétrons possuem spins opostos e, como cada elétron, quando girando em torno de mesmo, é equivalente a uma carga se movendo, cada elétron atua como um magneto extremamente pequeno, com os correspondentes pólos norte e sul.

Os elementos químicos que possuem o mesmo número de elétrons com spins “para cima” e “para baixo”, quase não reagem a um campo magnético externos e são chamados de diamagnéticos. Elementos que possuem número desemparelhado de elétrons exibem um momento magnético atômico, isto é, comportam-se como se cada átomo fosse um ímã. A maior parte dos elementos químicos é assim, mas esses “ímãs atômicos” pouco interagem entre si, resultando no fraco magnetismo dos materiais paramagnéticos.

Em apenas três dos cem elementos químicos da tabela periódica, ferro, cobalto e níquel, apresentam as características do ferromagnetismo, em que os momentos

magnéticos atômicos espontaneamente alinham-se paralelamente, gerando regiões magnetizadas no interior do material chamados de domínios magnéticos. Dependendo do material esse alinhamento magnético pode ser permanentemente retido, materiais magnéticos duros, ou esse alinhamento espontaneamente se desfaz, materiais magnéticos moles (CREMONEZI 2009). O tamanho e a forma da curva de histerese para materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos são de considerável importância prática. A área no interior de um ciclo representa uma perda de energia magnética por unidade de volume do material por ciclo de magnetização-desmagnetização; essa perda de energia é manifestada na forma de calor, que é gerado no interior da amostra magnética e é capaz de aumentar a sua temperatura (CALLISTER).

Materiais magnéticos duros são utilizados em ímãs permanentes, que devem possuir uma alta resistência à desmagnetização. Em termos de comportamento de histerese possui remanência, coercibilidade e fluxo de densidade de saturação elevados, bem como uma baixa permeabilidade inicial e grandes perdas de energia por histerese (CALLISTER). Estas 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 (CASTRO 2002).

Materiais magnéticos moles são usados em dispositivos que são submetidos a campo magnéticos alternados e onde as perdas de energia têm que ser baixas. Por esse motivo, a área relativa no interior do ciclo de histerese deve ser pequena; ela é caracteristicamente fina e estreita. Consequentemente este material deve possuir uma elevada permeabilidade inicial, além de uma baixa coercibilidade (CALLISTER). As curvas para materiais magnéticos duros e moles pode ser vista conforme a figura 2.4 abaixo.

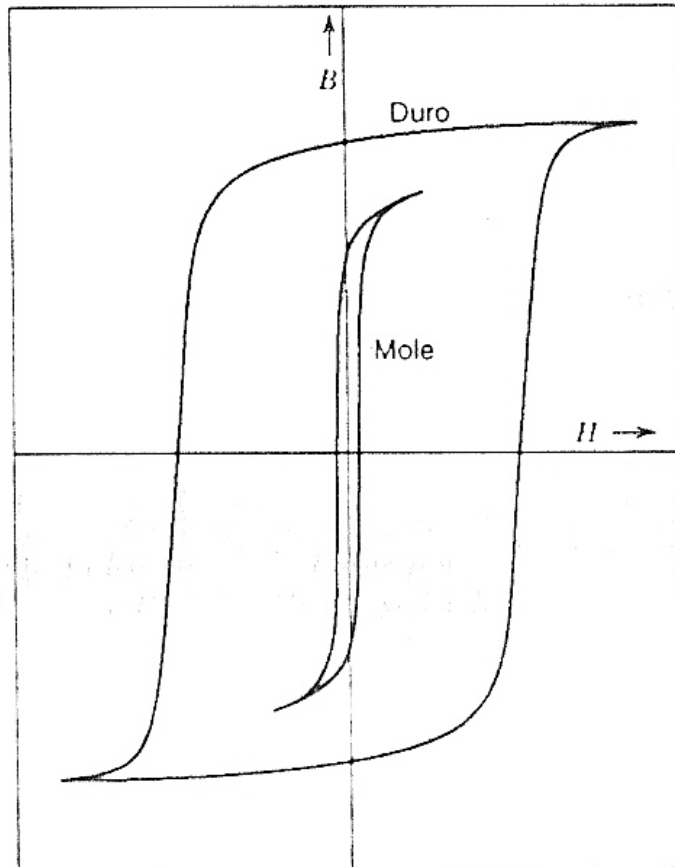


Figura 2.4 Curvas esquemáticas de magnetização para um material magnético mole e um duro (RALLS 1976).

Outra consideração em relação às propriedades para os materiais magnéticos é a resistividade elétrica. Além das perdas de energia por histerese que foram descritas acima, as perdas de energia podem resultar de correntes elétricas que são induzidas em um material magnético por um campo magnético alternado, conhecida como perdas por corrente parasitas de Foucault ou Eddy currents. Estas perdas são minimizadas com o aumento da resistividade elétrica, como por exemplo, com a formação de ligas por solução sólida, ferro-silício e ferro-níquel, e materiais isolantes (CALLISTER). A intensidade destas correntes é função da frequência do campo magnetizante, resultando em maiores perdas, quanto maior for a frequência do ciclo (CASTRO 2002).

A perda por correntes parasitas de Foucault (ou Eddy currents) pode ser expressa conforme a equação 2 (HENDRICKS 1991):

$$P_e = (C B^2 f^2 d^2) / (\rho) \quad (2)$$

Onde:

C- constante de proporcionalidade

B- densidade de fluxo

f- frequência

d- espessura do material

ρ - resistividade

Propriedades importantes:

- Campo magnético H (A/m): é o campo magnético criado por meio da passagem de corrente elétrica numa bobina.

- Momento magnético atômico (Am^2): é uma propriedade de cada átomo do material, relativa ao movimento de rotação dos seus elétrons.

- Magnetização M (A/m): campo magnético existente dentro do material, proporcional ao grau de alinhamento dos momentos magnéticos atômicos em relação ao campo externo aplicado.

- Indução magnética B (T): é soma do campo magnético externo com a magnetização do material.

- Permeabilidade relativa (μ_r): grandeza adimensional que representa o fator de amplificação da magnetização em função do campo magnético aplicado $\mu_r = (B / \mu_0 H)$.

- Permeabilidade do vácuo (μ_0): constante que correlaciona a indução magnética com o campo magnético : $B = (\mu_0 H)$.

- Permeabilidade absoluta (μ): é o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético e é representado por: $\mu = (\mu_r \times \mu_0)$.

- Curva de magnetização: representação gráfica da relação entre o campo magnético aplicado e a magnetização induzida ($H \times M$) ou com a indução magnética ($H \times B$).

- Saturação M_s : é o valor máximo alcançado pela magnetização M , quando todos os momentos magnéticos atômicos alinham-se com o campo externo aplicado.

- Campo coercivo H_c : campo magnético necessário para reduzir a indução magnética até zero, ou seja, para demagnetizar o material.

- Remanência B_r : indução magnética que permanece em um círculo magnético fechado após a remoção do campo magnético externo aplicado (CREMONEZI 2009).

2.4 Fatores que influenciam no comportamento magnético

2.4.1 Temperatura

A temperatura também pode influenciar as características magnéticas dos materiais. Com o aumento da temperatura de um sólido resulta em um aumento na magnitude das vibrações térmicas dos átomos. Os momentos magnéticos atômicos estão livres para girar; dessa forma, com o aumento da temperatura, o maior movimento térmico dos átomos tende a tornar aleatórias as direções de quaisquer momentos que possam estar alinhados.

Para os materiais ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos, os movimentos térmicos atômicos vão ao contrário das forças de pareamento entre os momentos dipolo atômicos adjacentes, causando algum desalinhamento do dipolo, independente do fato de um campo externo estar presente. Isso resulta em uma diminuição na magnetização de saturação tanto para materiais ferromagnéticos como para os ferrimagnéticos. A magnetização é máxima à temperatura de 0 K, em cujas vibrações térmicas são mínimas. Com o aumento da temperatura, a magnetização de saturação diminui gradualmente, e então cai abruptamente para zero, no que é conhecida por temperatura Curie, T_c . A magnitude da temperatura Curie varia de matéria para material, por exemplo para o ferro, cobalto, níquel e Fe_3O_4 , são de 768, 1120, 335 e 585 °C (CALLISTER).

2.4.2 Defeitos estruturais

Mudanças na microestrutura, na forma de inclusões magnéticas adicionais como partículas de segunda fase com diferentes propriedades magnéticas da matriz do material, causam mudanças nas propriedades histeréticas por introduzirem porosidade o que impede o movimento das paredes dos domínios e assim levando ao aumento da coercividade e da

perda por histerese. O mesmo acontece quando a densidade de discordâncias aumenta por deformação plástica, ou por tração ou compressão (JILES 1991).

2.4.3 Pressão de compactação e características das partículas

A etapa de preparação da amostra é muito importante para se ter as propriedades finais magnéticas requeridas, como o comportamento das perdas existentes, e estas são influenciadas com a pressão de compactação e as características das partículas.

A pressão de compactação tem influência na densidade da peça e conseqüentemente nas propriedades como a permeabilidade e o campo coercivo. Aumentando a pressão de compactação resultará em densidades mais altas, notando um aumento na permeabilidade e na indução de saturação sem qualquer degradação na força coerciva e uma diminuição nas perdas de energia (SHOKROLLAHI 2006).

As características das partículas são influenciadas com o tempo de moagem. Para tempos de moagem mais longos e o tamanho das partículas menores as perdas histeréticas são maiores, ou seja, as perdas de energia são maiores. A principal razão para este efeito é o trabalho a frio e as tensões residuais nos pós e também as interfaces das partículas aumentam de modo que para uma determinada quantidade de polímero as perdas aumentam (SHOKROLLAHI 2006). Esta perda histerética é principal parte da perda de energia a baixas freqüências. Este tipo de perda pode ser reduzida com tamanho de partícula maior, maior pureza de ferro nas partículas e tratamento térmico de alívio de tensões (SHOKROLLAHI 2007).

2.4.4 Adição de material isolante

Os compósitos magnéticos moles são basicamente partículas de pó de ferro cobertas com uma camada isolante muito fina. Um bom isolamento e partículas finas são geralmente requeridas para minimizar as perdas por correntes eddy em altas freqüências. A baixa freqüência o isolamento é menos crítico, mas mesmo assim, necessário, a fim de minimizar o efeito da corrente eddy na magnetização do material.

Em geral as camadas isolantes são classificadas em das principais categorias: camadas orgânicas e camadas inorgânicas. Camadas inorgânicas podem ser subdivididas

em várias categorias: óxido metálico (como Fe_2O_3), fosfoatos (fosfato de zinco, fosfato de ferro e fosfato de manganês) e sulfatos. Camadas orgânicas podem ser divididas em duas categorias: termoplásticas e termofixas.

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. As especificações seguem na tabela 2.2 abaixo (BOLETIM TÉCNICO 2004).

Tabela 2.2 Características Técnicas HRJ10236[®]

Propriedades	HRJ-10236
Fluxo à 125°C	20-45 mm
Cura à 154°C	50-90 s
Teor de hexametileno-tetramina	7,5-8,5 %
Granulometria passante pela M#200	Mínimo 97,0%

Resina CR-2001[®]: 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. As especificações seguem na tabela 2.3 abaixo (BOLETIM TÉCNICO 2008).

Tabela 2.3 Características Técnicas CR-2001[®]

Propriedades	CR-2001
Fluxo à 125°C	20-40 mm
Cura à 154°	40 – 60 s
Teor de hexa	8,5 – 9,5 %
Ponto de fusão capilar	75 – 90°
Retenção em malha 200	3% máximo

3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Caracterização do resíduo

3.1.1 Caracterização quanto à morfologia e à granulometria

A caracterização da morfologia foi realizada através da Microscopia Eletrônica de Varredura, em um microscópio da marca JEOL-JSM 5800, com objetivo de avaliar a textura e a forma das partículas.

3.1.2 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 $0,02^\circ$ e $1s$ por passo.

3.2 Elaboração do compósito magnético

O resíduo bruto do processo de usinagem foi submetido à moagem em um moinho de facas de marca Retsch, modelo SM2000. Neste equipamento, a peneira de controle utilizada foi de $0,1mm$. Como agente ligante para a elaboração do compósito foram utilizadas as resinas CR2001 e HRJ-10236.

Etapas realizadas na elaboração dos compósitos:

a) Preparação da amostra

- Pesagem da resina HRJ-10236 e da resina CR2001 (3% em peso). De acordo com resultados obtidos de outros autores (BARBOZA 2008) a adição de 3% em peso dessas resinas promove a redução da permeabilidade, mas por agir como um isolante entre as partículas aumenta a resistividade e conseqüentemente resulta a redução das perdas magnéticas por corrente de Foucault, importante para este tipo de utilização deste componente;

- Pesagem do resíduo de Ferrotron[®], 97% em peso;

- Adição da resina e do resíduo pesados no misturador;
- Mistura por um tempo de 30 min.

b) Compactação das amostras

- Lubrificação do ferramental da prensa e da matriz com estearato de sódio;
- Distribuição do material do misturador nas matrizes (Figura 3.1, Figura 3.2, Figura 3.3).

A amostra em forma de cilindro (Figura 3.1) foi utilizada para avaliação morfológica e das propriedades mecânicas. A amostra na forma toroidal (Figura 3.2) foi usada para medição das propriedades magnéticas. E a amostra na forma de barra (Figura 3.3) foi usada para medição da resistividade elétrica.



Figura 3.1 Matriz para compactação da amostra tipo cilindro.



Figura 3.2 Matriz para compactação da amostra tipo toroidal.



Figura 3.3 Matriz para compactação da amostra tipo barra.

- Todas as amostras foram compactadas na prensa hidráulica manual PS30T marca EKA com capacidade de 40 toneladas. Utilizou-se uma pressão de 600 MPa por cerca de 1 minuto. Considerando que 1 tonelada é 10.000 N, tem-se: $600 \text{ MPa} = 6 \times 10^8 \text{ N/m}^2 = 6 \times 10^4 \text{ ton/m}^2 = 6 \text{ ton/cm}^2$.

c) Cura

- Retirada do material da matriz;

- Introdução deste material em um forno, sem atmosfera controlada, para cura da resina. De acordo com o fabricante 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.

3.3 Caracterização do compósito magnético

3.3.1 Caracterização morfológica

A caracterização morfológica e a composição do composto magnético foram obtidas e avaliadas através da Microscopia Eletrônica de Varredura (microscópio da marca JEOL-JSM 5800) acoplado com EDS. As imagens foram obtidas por elétrons retroespalhados e elétrons secundários.

A densidade aparente dos compósitos magnéticos e da amostra original elaborados foi determinada através do princípio de Arquimedes.

3.3.2 Caracterização quanto ao comportamento mecânico

3.3.2.1 Caracterização quanto à dureza

A caracterização quanto à dureza das amostras elaboradas foi feita através do durômetro, marca Wolpert, modelo Diatestor. O ensaio foi realizado com esfera de 2,5 mm e carga de 15,625 kgf.

3.3.2.2 Caracterização quanto à resistência à compressão

Os ensaios de compressão foram realizados no equipamento universal de ensaios mecânicos, marca INSTRON , no LAMEF (Laboratório de Metalurgia Física da UFRGS). A velocidade utilizada foi de 1,5 mm/min e o ensaio realizado conforme a norma ASTM E9 (Standard Test Method for the Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature). Na figura 3.4 são apresentadas as amostras utilizadas no ensaio de compressão.



Figura 3.4 Amostras para ensaio de compressão: a) amostra original b) compósito com 3% resina HRJ10236[®] c) compósito com 3% resina CR2001[®].

3.3.3 Caracterização quanto ao comportamento magnético

A preparação das amostras para caracterização quanto ao comportamento magnético consiste na bobinagem (enrolamento de fio de cobre) de espiras primárias e secundárias, conhecida como Anel de Roland (figura 3.5). Este processo consiste em enrolar o anel com filme plástico, enrolamento de espiras secundárias, novo isolamento e enrolamento de espiras primárias.

Os compósitos magnéticos foram caracterizados em relação ao material original quanto ao comportamento magnético a partir das curvas de histerese, permeabilidade magnética e perdas magnéticas. A curva de histerese foi obtida através da amostra e equipamento com sensor Hall, da marca GlobalMag e programa THC_0906 – traçador de curvas de histerese TLMP – THC-14, mostrados na figura 3.5. O TCH é constituído por um amplificador de corrente capaz de magnetizar pequenas amostras mantendo o campo magnetizante senoidal. Um resistor “*shunt*” fornece uma tensão proporcional à corrente elétrica no enrolamento primário que permite estimar o campo magnetizante H. Um

circuito integrador permite gerar um sinal proporcional à indução magnética B . O TCH também permite o registro da curva de histerese, da curva de magnetização e estimativa das perdas magnéticas de amostras maiores utilizando fontes externas de magnetização. Um enrolamento secundário isolado deve ser providenciado para realizar a medida da indução magnética (BARBOZA 2009).

Através da curva de histerese é possível analisar perdas por histerese, permeabilidade magnética e coercitividade. As frequências utilizadas foram de 60 Hz e 400 Hz.

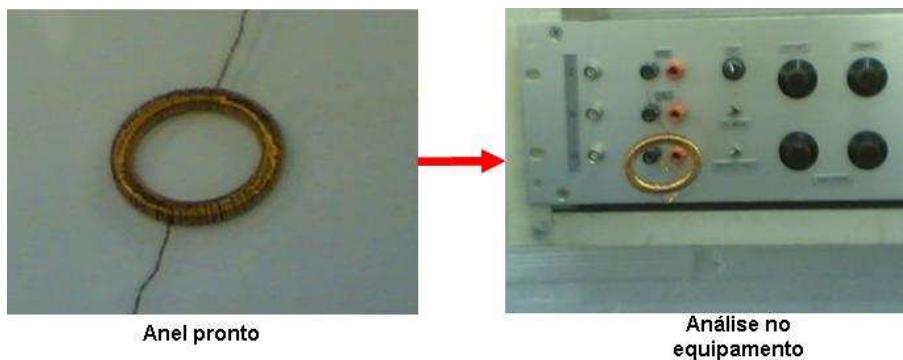


Figura 3.5 Amostra e dispositivo para análise de comportamento magnético

3.3.4 Caracterização quanto à resistividade

Foi utilizada uma fonte de tensão capaz de fornecer aproximadamente 300V em corrente contínua e um voltímetro digital com resistência conhecida e igual a 10 Mohms para vencer a alta resistência da amostra. Na figura 3.6 está representada a montagem do ensaio de resistividade e na figura 3.7 são apresentadas as amostras utilizadas neste ensaio.

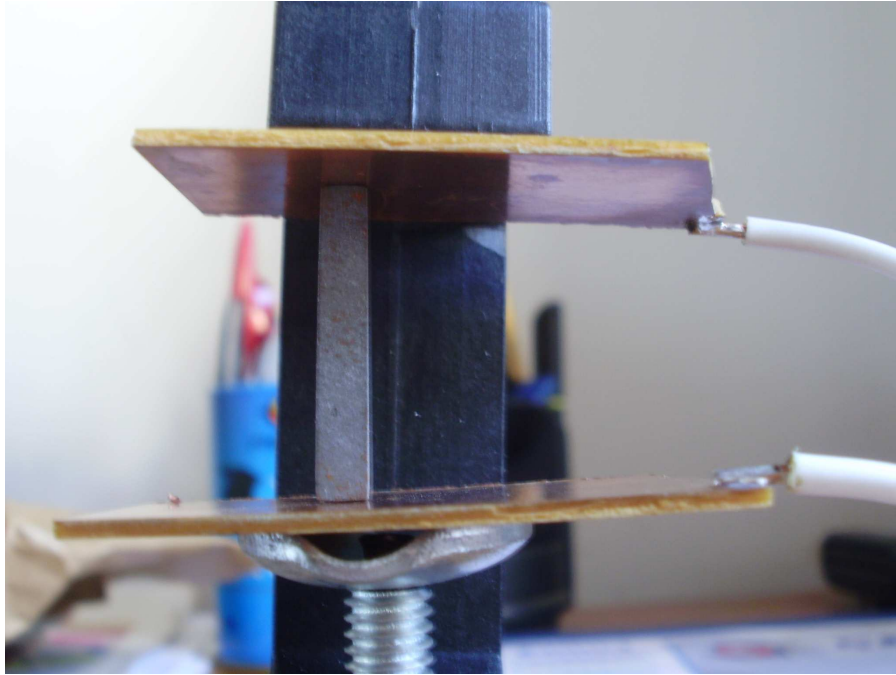


Figura 3.6 Montagem do ensaio de resistividade

A resistividade foi determinada através da resistência do material, utilizando a equação 3.

$$\rho = (A \cdot R) / L \quad (3)$$

Onde:

ρ - resistividade ($\Omega \cdot m$)

A- área da seção (m^2)

R- resistência elétrica (Ω)

L- comprimento da amostra (m)

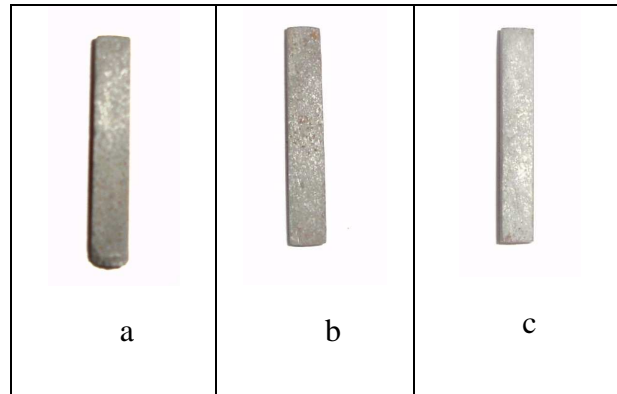


Figura 3.7 Amostras para ensaio de resistividade: a) compósito com 3% resina CR2001® b) compósito com 3% resina HRJ10236® c) amostra original.

As dimensões das amostras representadas na figura 3.7 são mostradas na tabela 3.1.

Tabela 3.1 Dimensões das amostras de resistividade

Amostra	Comprimento (cm)	Área (cm ²)
Ferrotron (original)	2,581	0,12
Ferrotron + 3% resina HRJ	2,737	0,10
Ferrotron + 3% resina CR2001	2,880	0,13

3.3.5 Análise de custo

A análise de custo 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.

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização do resíduo

4.1.1 Caracterização quanto à morfologia e à granulometria

A partir da figura 4.1 é possível observar a morfologia das partículas de resíduo do material magnético (Ferrotron®) empregado para a elaboração do compósito magnético.

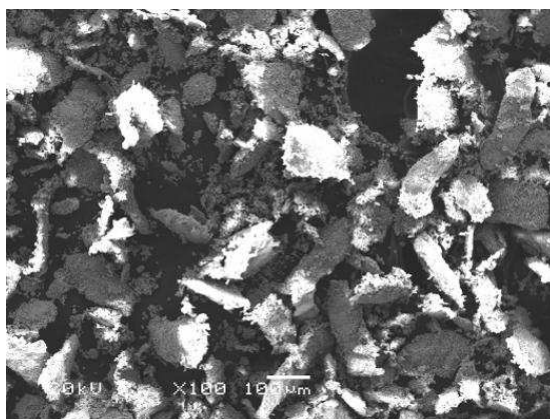


Figura 4.1 Resíduo empregado para a elaboração do compósito magnético.

Como mencionado anteriormente, as propriedades magnéticas dependem das características originais do material utilizado, tais como a forma, o tamanho e a distribuição do tamanho das partículas. Neste trabalho utilizou-se o material passante na peneira de 140# por apresentar uma melhor homogeneidade na distribuição das partículas.

4.1.2 Caracterização quanto à composição

A partir da figura 4.2 é possível observar que o material original (ferrotron®) é composto basicamente por ferro e níquel, conhecido como kamacita.

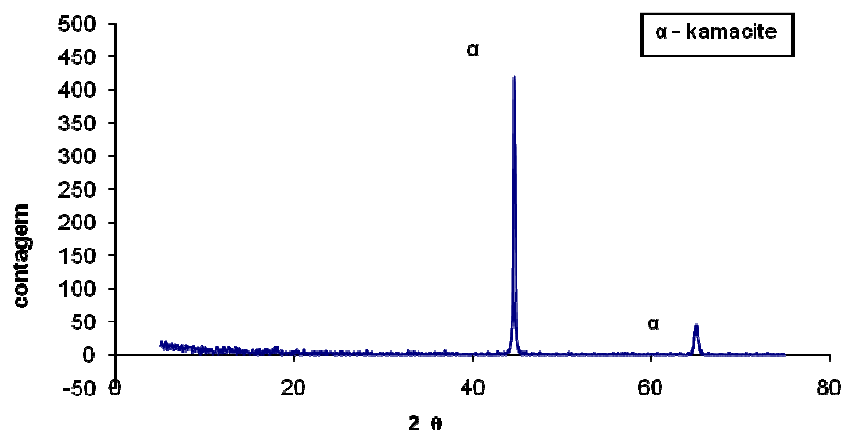


Figura 4.2 Difratoograma do resíduo do material original (ferrotron®)

4.2 Caracterização do compósito magnético

4.2.1 Caracterização quanto à morfologia

Pela análise das micrografias obtidas das amostras é possível observar a semelhança das morfologias conforme a figura 4.3. As imagens obtidas por elétrons retroespalhados (figura 4.4) evidenciam duas regiões: regiões escuras, composta pela resina, e regiões claras, composta por ferro e níquel. Pelos resultados obtidos é possível observar que o material original de Ferrotron® já apresentava na sua constituição a presença de uma resina. Os compósitos elaborados apresentaram grãos menores e conseqüentemente maior área de contorno.

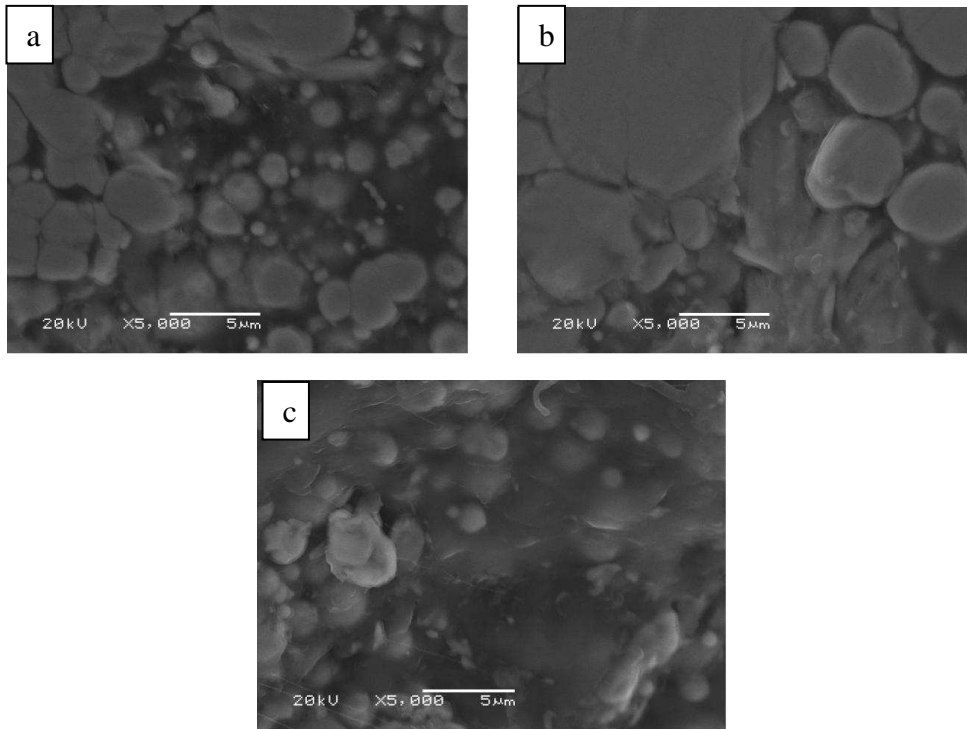


Figura 4.3 Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários (região da superfície) : a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original)

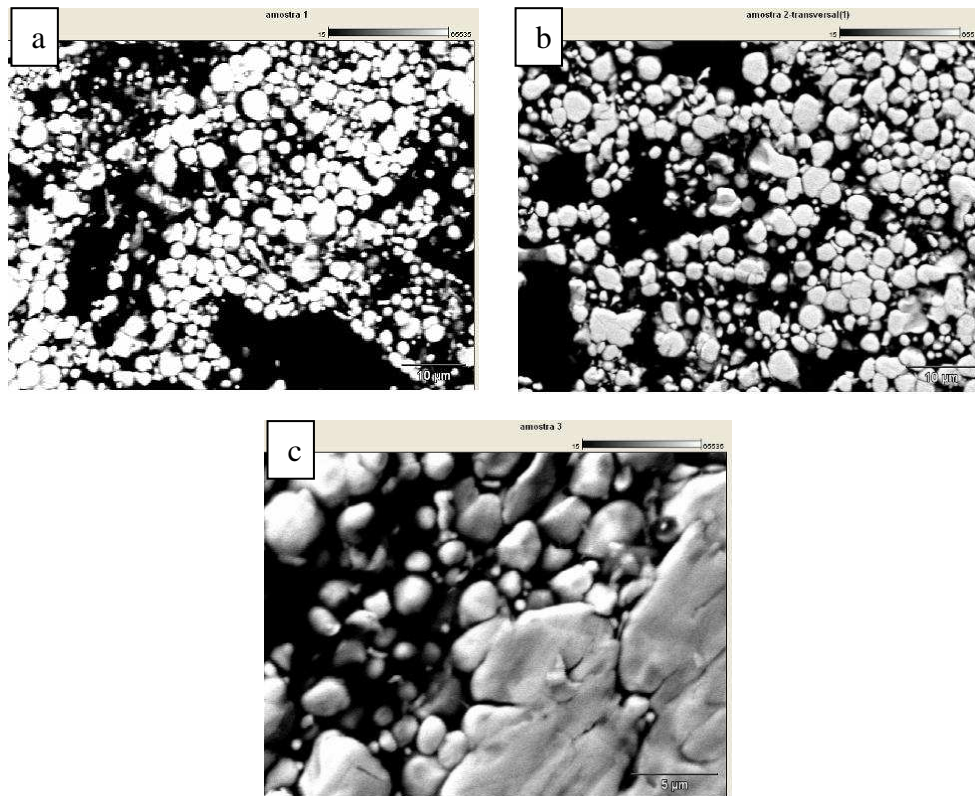


Figura 4.4 Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados (região da superfície): a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original)

A figura 4.5 e figura 4.6 mostram a morfologia das amostras após o ensaio de compressão evidenciando a maior quantidade de resina nos compósitos elaborados pelo seu estiramento. É possível observar o grau de porosidade, o qual tem influência nas propriedades magnéticas e nas propriedades mecânicas como mencionado anteriormente.

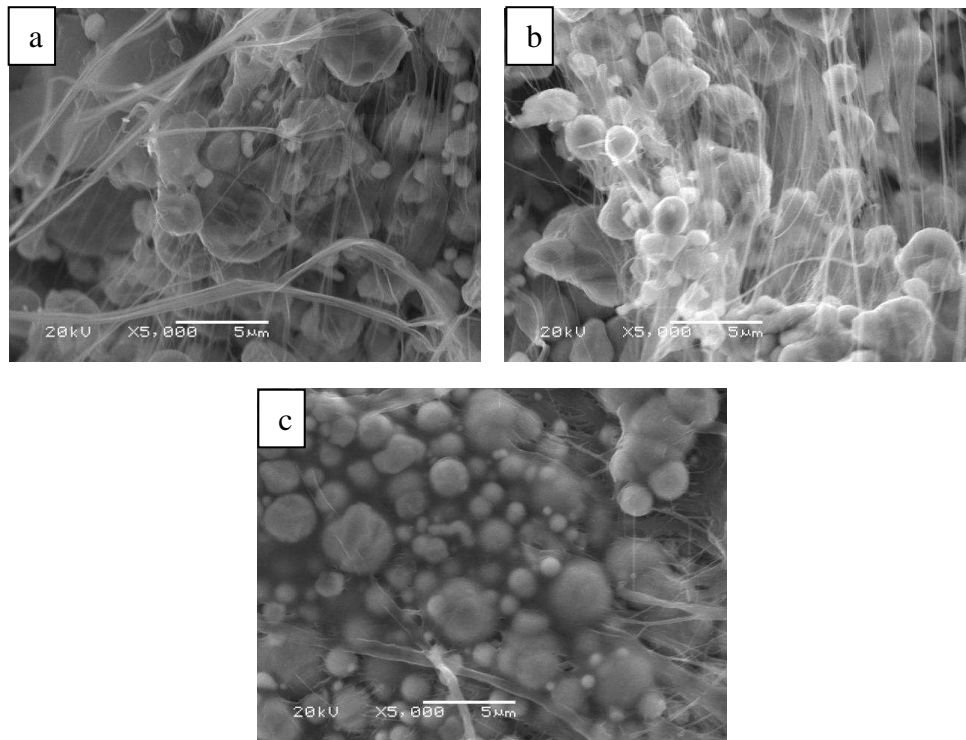


Figura 4.5 Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários (região da fratura):
a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron
(amostra original)

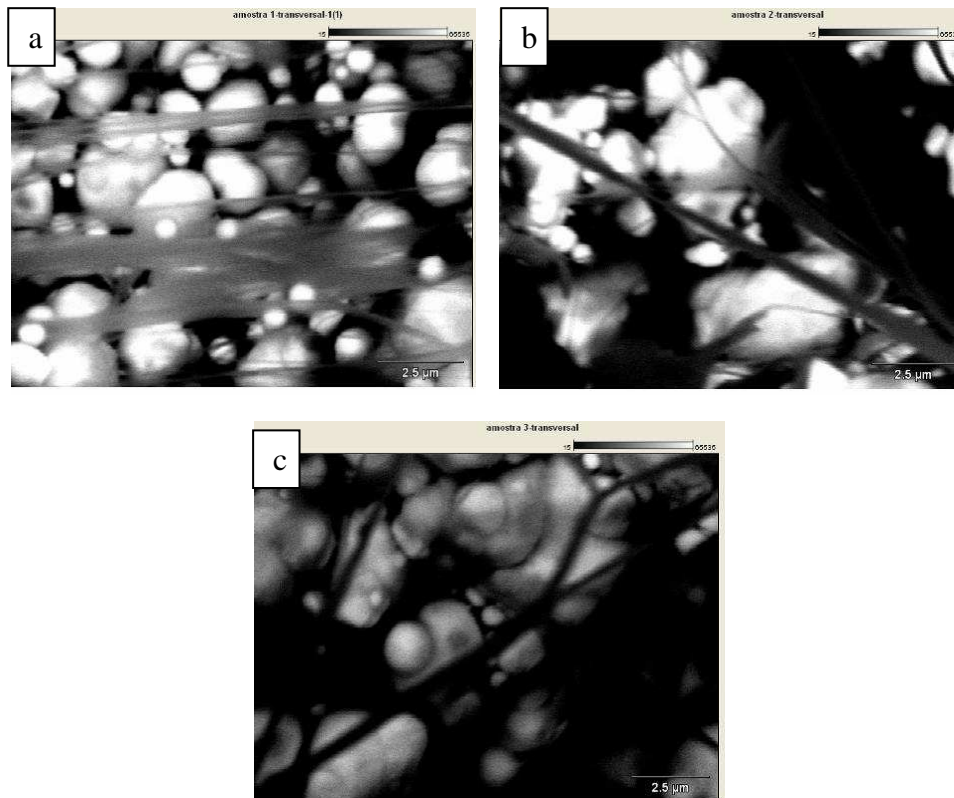


Figura 4.6 Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados (região da fratura): a) Ferrotron + 3% resina CR2001 b) Ferrotron + 3% resina HRJ c) Ferrotron (amostra original)

A tabela 4.1 apresenta os resultados obtidos quanto às densidades dos materiais elaborados. É possível perceber a redução da densidade nos compósitos magnéticos em relação à amostra original, Ferrotron[®], devido a maior porosidade apresentada.

Tabela 4.1 Densidades das amostras

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

4.2.2 Caracterização quanto ao comportamento mecânico

Os resultados obtidos nos ensaios de comportamento mecânico, compressão e dureza, estão apresentados conforme a tabela 4.2 abaixo. Nos compósitos magnéticos

elaborados verificaram-se valores semelhantes e inferiores quanto ao ensaio de compressão como no ensaio de dureza em relação ao material original. Este comportamento é decorrente pelos principais fatores como: maior porosidade como verificado nas densidades encontradas, o teor de resina e a microestrutura apresentada pelos compósitos.

Tabela 4.2 Resultados dos ensaios de compressão e dureza

Amostra	Tensão Máxima (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Dureza (HB)
Ferrotron + 3% resina CR2001	44,27	1,14	7,18
Ferrotron + 3% resina HRJ	55,12	1,23	7,32
Ferrotron	70,62	1,60	10,2

4.2.3 Caracterização quanto ao comportamento magnético

Os resultados obtidos pela caracterização das amostras quanto ao comportamento magnético estão mostrados nas figuras 4.7, figura 4.8, tabela 4.3 e tabela 4.4. Pode-se notar a queda da permeabilidade magnética, nas duas frequências utilizadas no ensaio (60 Hz e 400 Hz), no compósito com resina HRJ como no compósito com a resina CR2001. Este comportamento é devido ao tamanho de partícula, pois os compósitos elaborados têm menor tamanho, ao grau de porosidade, pressão de compactação e à adição de resina.

Contudo, as perdas magnéticas foram reduzidas tanto no compósito com a resina HRJ como no compósito com resina CR2001 nas duas frequências utilizadas no ensaio (60Hz e 400 Hz). Esta redução nas perdas magnéticas é decorrente ao aumento na porosidade e à adição de resina, pois estes dois fatores podem contribuir para a diminuição das perdas por correntes parasitas e diminuindo de forma global as perdas magnéticas. Conforme aumenta a frequência de operação as perdas aumentam como descrito na equação 2.

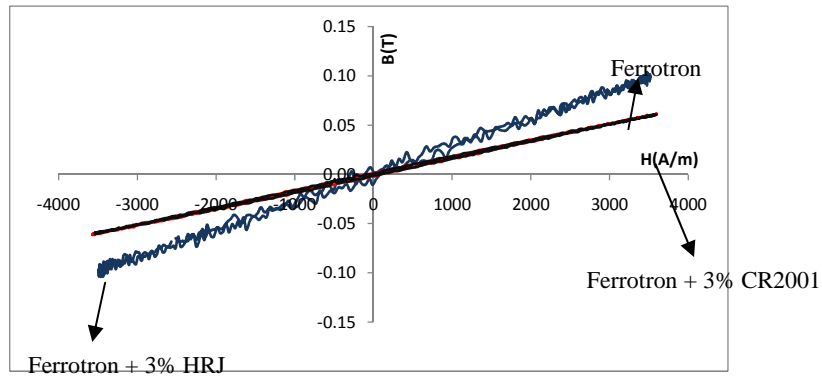


Figura 4.7 Curvas de histerese na frequência 60 Hz

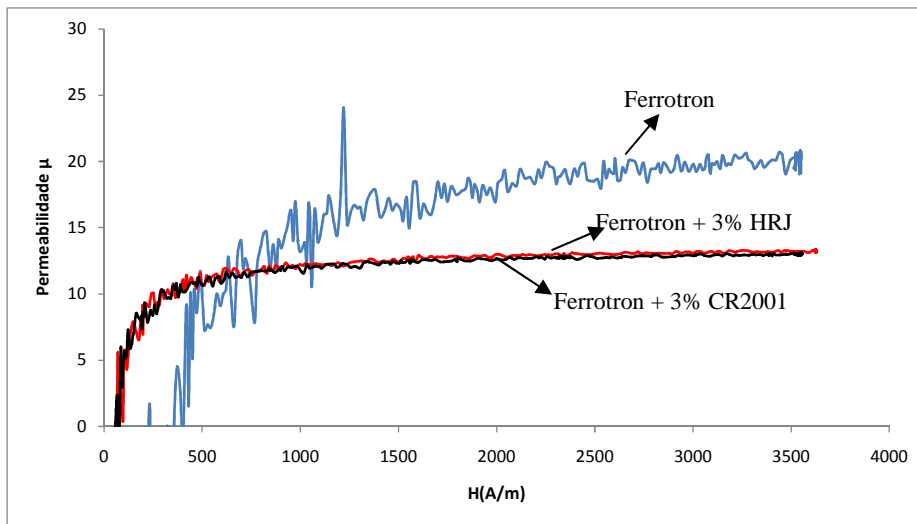


Figura 4.8 Curva de permeabilidade na frequência 60 Hz

Tabela 4.3 Resultados de permeabilidade magnética e perdas na frequência de 60 Hz

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

Tabela 4.4 Resultados de permeabilidade magnética e perdas na frequência de 400 Hz

Amostra	Permeabilidade Relativa	Frequencia (Hz)	Perdas (J/m ³)
Ferrotron + 3% CR2001	12	400	15,10
Ferrotron + 3% HRJ	12		15,35
Ferrotron (original)	20		32

4.2.4 Caracterização quanto à resistividade

Os resultados obtidos no ensaio de resistividade mostraram que a adição de resina (3%) influenciou nesta propriedade, aumentando o seu valor em relação à amostra original (Ferrotron) conforme a tabela 4.5. De qualquer maneira, os valores obtidos para todos os sistemas estudados estão superiores ao valor especificado para o Ferrotron em seu boletim técnico (resistividade > 15Kohm.cm). Como foi mencionado anteriormente, a redução das perdas magnéticas pode ser devido ao aumento da resistividade, dentre outros fatores. No caso dos compósitos a resistividade foi influenciada pelo tipo de resina, enquanto para as perdas magnéticas não foi observado o mesmo comportamento. Isso indica que no caso específico analisado as perdas magnéticas devem ter sido influenciadas especialmente por aspectos morfológicos (porosidade, tamanho de grão).

Tabela 4.5 Resultados de resistividade

Amostra	Resistividade (Gohm.cm)
Ferrotron + 3% CR2001	0,497
Ferrotron + 3% HRJ	0,240
Ferrotron (original)	0,238

4.2.5 Análise de custo

A elaboração dos concentradores de fluxo a partir do resíduo permitiu a redução do custo em até 89%.

5.0 CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos neste trabalho foi possível concluir que:

- É possível a obtenção de compósitos magnéticos a partir do resíduo de concentrador de fluxo magnético;
- Quanto às propriedades mecânicas e às propriedades magnéticas os compósitos elaborados tiveram resultados semelhantes, indicando que o tipo de resina não teve influência nessas propriedades. Entretanto, os compósitos obtidos tiveram uma redução nas propriedades mecânicas em relação ao material original (resíduo do concentrador de fluxo magnético);
- Os resultados obtidos no ensaio de resistividade mostraram que a adição de resina (3%) influenciou nesta propriedade, aumentando o seu valor em relação à amostra original (Ferrotron). De qualquer maneira, os valores obtidos para todos os sistemas estudados apresentaram-se superiores ao valor especificado para o Ferrotron em seu boletim técnico (resistividade > 15Kohm.cm).
- As perdas magnéticas para os compósitos magnéticos elaborados foram inferiores em relação ao material original;
- 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 demonstrou que existe a possibilidade de redução do valor por peça de até 89%.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Variar parâmetros na elaboração dos compósitos magnéticos visando melhorar as propriedades magnéticas e propriedades mecânicas.
- Avaliar o desempenho do material elaborado em escala industrial empregando os parâmetros utilizados no processo.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDERSSON, O.; HOFHECKER, P. **Advances in Soft Magnetic Composites- Materials and Applications**. 1 Jul. 2009 <<http://www.hoganas.com/Documents/>>

Published%20Articles/2009/PM09_09_PowderMet2200_Andersson_Hofecker.pdf >

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.

BARBOZA, Juliano. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. Dissertação. PPGEM. UFRGS, 2009.

CALLISTER, W. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5 ed.

CASTRO, N. A; RODRIQUES, D; LANDGRAF, F.J.G; YONAMINE, T. **Pó de ferro microencapsulado: efeito do tratamento térmico de recozimento na redução das perdas magnéticas**. Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, p. 891-903, 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7 ed., 1996.

Concentrador de Campo Magnético Aplicado no Aquecimento de Peças por Indução. AlbaTherm. <<http://www.albatherm.com.br/informativo/concentrador.asp>> Acessado em 13 Jul. 2009.

CREMONEZI, A; LOPES, H. **A metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental**. p. 79-95, 2009.

Development of Soft Magnetic Composites for Low Loss Applications. School of Chemical Engineering and Advanced Materials University of Newcastle. <<http://www.staff.ncl.ac.uk/s.j.bull/index.html>> Acessado em 20 Jul. 2009.

Fluxtrol Inc. <<http://www.fluxtrol.com/index.php>> Acessado em 22 Jul. 2009.

Fluxtrol Inc. <http://www.fluxtrol.com/index.php?action=product.ferrotron_559h> Acessado em 22 Jul. 2009.

HENDRICKS, C.R.; AMARAKOON, V.W.R.; SULLIVAN, D. **Processing of manganese zinc ferrites for high-frequency switch-mode power supplies**. p. 817-823, 1991.

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. 1 ed. 1991.

Propriedades da Resina CR2001. Boletim técnico SIGroup Crios, 2008.

Propriedades da Resina HRJ-10236. Boletim técnico Schenectady Brasil, 2004.

SHOKROLLAHI, H; JANGHORBAN, K. **The effect of compaction parameters and particle size on magnetic properties of iron-based alloys used in soft magnetic composites.** p. 41-43,2006

SHOKROLLAHI, H; JANGHORBAN, K. **Soft magnetic composite materials (SMCs).** p. 1-12, 2007.

RALLS, K. M.; COURTNEY, T. H.; WULFF, J. **Introduction to Materials Science and Engineering.** 1976.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R. **Keeping your temper with flux concentrator.** 1995 < <http://www.inductoheat.com/pdf/54.pdf>> Acessado em 22 Jul. 2009.

RUDNEV, V.; LOVELESS, D.; COOK, R.; BLACK, M. **Handbook of induction Heating.** 2003.

RUDNEV, V. **An Objective Assessment of Magnetic Flux Concentrators.** 2004. < http://www.hwg-inductoheat.de/fileadmin/media/Fachberichte/Flux_Concentrators.pdf > Acessado em 22 Jul. 2009.