

## Elaboração e caracterização de compósitos magnéticos

### *Elaboration and characterization of a magnetic composite*

#### **Vanessa Isabel do Santos Rodrigues**

Mestre em Ciência e Tecnologia dos Materiais - PPGEM - UFRGS.  
[vanessaisr@gmail.com](mailto:vanessaisr@gmail.com)

#### **Andrea Brasco Pampanelli**

Doutoranda em Ciência e Tecnologia dos Materiais - PPGEM - UFRGS.  
[andrapampanelli@terra.com.br](mailto:andrapampanelli@terra.com.br)

#### **Katiane de Oliveira Roxo**

Graduada em Ciências Biológicas Licenciatura Plena - UNISINOS.  
[kroxo@sesc-rs.com.br](mailto:kroxo@sesc-rs.com.br)

#### **Matias de Angelis Korb**

Mestrando em Ciência e Tecnologia dos Materiais - PPGEM - UFRGS.  
[matiasak@gmail.com](mailto:matiasak@gmail.com)

#### **Hugo Marcelo Veit**

Professor, Dr., Departamento de Engenharia de Materiais - UFRGS.  
[hugo.veit@ufrgs.br](mailto:hugo.veit@ufrgs.br)

#### **Célia de Fraga Malfatti**

Professora, Dra., Departamento de Engenharia Metalúrgica - UFRGS.  
[materiaisxenergia@gmail.com](mailto:materiaisxenergia@gmail.com)

### **Resumo**

No processo de têmpera por indução, o material é aquecido por um campo magnético gerado por uma corrente alternada de alta frequência, que passa através de uma bobina. Para melhorar a eficiência do processo, são utilizados, junto à bobina, orientadores de fluxo magnético, que são materiais magnéticos moles. Esses orientadores de fluxo são constituídos de componentes ferromagnéticos e um ligante dielétrico. Geralmente é necessário realizar um ajuste dimensional desses concentradores, através de usinagem, gerando perda de matéria-prima e produção de resíduo. Nesse trabalho, foi realizada a elaboração de um compósito de matriz polimérica a partir do resíduo oriundo do processo de ajuste dimensional. Para elaboração desse compósito, o resíduo foi cominuído e misturado com dois tipos diferentes de resinas fenólicas na concentração de 3%. Os compósitos magnéticos obtidos foram caracterizados quanto à morfologia, propriedades mecânicas, magnéticas, elétricas e caracterização ambiental. Os resultados mostraram que os compósitos apresentaram redução das propriedades magnéticas e mecânicas comparativamente ao material original. Mesmo assim o material apresenta potencial para uso como concentrador de fluxo, pois foi observada a redução das perdas magnéticas.

**Palavras-chave:** Compósitos magnéticos, concentradores de fluxo, resíduos.

### **Abstract**

*In the induction heating treatment process, the material is heated by a magnetic field generated by a high frequency alternating current that passes through an inductor. To improve the efficiency of the process, a flux concentrator, which is constituted by soft magnetic materials, is used. This flux concentrator consists of ferromagnetic components and a dielectric binder. In some industrial processes, the dimensional adjustment of this tool can cause loss of raw material and produce 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. To prepare the magnetic composite, the waste was comminuted and mixed with two different types of phenolic resin at a concentration of 3%wt. The magnetic composites obtained were characterized according to morphology, mechanical, magnetic and 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, reduction of magnetic losses was observed for the composite obtained, highlighting the potential of this composite for use as a magnetic flux concentrator.*

**Keywords:** Magnetic composites, concentrators flow, wastes.

## 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. Nesse 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). 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 (Rudenev, 2004; Jiles, 1991). 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 (Borges, 2007). 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. Podem ser utilizadas matrizes metálicas, cerâmicas ou poliméricas. No caso das matrizes poliméricas, entre todas as resinas, a epóxi é a que possui melhores propriedades mecânicas (Pereira, 2006). 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.

Os concentradores de fluxo são conhecidos, 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® (Fluxtrol, 2009).

Nesse trabalho, foi usado o Ferrotron 559®, pois possui altíssima resistividade elétrica e é um material designado para uso em aplicações de alta frequência que solicitem reduções de perdas magnéticas. Além disso, Ferrotron 559® é facilmente usinável e tem uma boa resistência à temperatura (250°C por longo período e 300°C por curto tempo) (Fluxtrol, 2009). A Tabela 1 apresenta as características gerais do Ferrotron 559®.

Atualmente, na indústria, são uti-

lizados, principalmente, 4 modelos de concentradores de fluxo Ferrotron 559®, de acordo com a dimensão necessária. Um dos modelos mais utilizados é o Ferrotron®3"x2".

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo a elaboração e a 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. Nesse trabalho, foram utilizados os resíduos de uma indústria automotiva, onde, no ano de 2008, foram consumidas 112 peças de Ferrotron 559®, e gerados, aproximadamente, 12 kg de resíduo por mês dos 4 modelos mais utilizados, conforme a Tabela 2. O aproveitamento desse resíduo pode reduzir 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).

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. Os compósitos obtidos foram caracterizados quanto à morfologia e quanto às propriedades magnéticas, mecânicas, elétricas e ambientais.

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

Tabela 1  
Características Físicas do Ferrotron 559® (Fluxtrol, 2009).

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

Tabela 2  
Modelos de Ferrotron® X Consumo.

## 2. Metodologia

Inicialmente foi realizada a caracterização do resíduo, através de critérios

ambientais, morfológicos, granulométricos e de composição.

### Caracterização do resíduo

Extremamente importante antes de realizar o reaproveitamento de um resíduo é a determinação de sua classificação enquanto resíduo e depois de transfor-

mado em outro produto. A classificação ambiental foi realizada segundo a norma NBR 10004. Os ensaios de lixiviação foram realizados segundo a norma

NBR10005 e os ensaios de solubilização foram realizados de acordo com a NBR 10006.

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. A distribuição granulométrica foi determinada pela passagem por peneiras.

## Elaboração do compósito magnético

O resíduo bruto foi submetido à moagem em um moinho de facas marca Retsch, modelo SM2000. Nesse equipamento, a peneira de controle utilizada foi de 0,1mm. 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 #.

Na formulação do compósito, foram utilizados dois tipos de resinas: a resina CR2001® e a resina HRJ-10236®.

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  $2\theta$  entre 14 e 75°, com passo de 0,02 e 1s por passo.

Após a caracterização do resíduo, o compósito magnético foi elaborado através da mistura do resíduo com duas resinas diferentes. O compósito foi, então, caracterizado quanto às suas características físicas, morfológicas, térmicas, mecânicas, magnéticas e de resistividade.

Essas resinas foram escolhidas devido as suas propriedades, como, por exemplo: temperatura de cura; temperatura de utilização; dureza; ductilidade; resistividade elétrica; resistência à vibração, entre outras.

- **Resina CR2001®:** 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.
- **Resina HRJ10236®:** é uma resina

fenólica modificada em pó, tipo novolaca, que contém hexametilenotetramina. É indicada, principalmente, para fabricação de pastilhas de freios, lonas pesadas ou leves e discos de embreagem. A resina HRJ-10236® proporciona médio coeficiente de atrito ao material de fricção, com boa estabilidade térmica e baixo *fading* (perda de atrito). Os demais itens, como resistência mecânica, desgaste e recuperação de atrito, são considerados bons.

## Descrição das etapas realizadas para a elaboração dos compósitos

### a) Preparação da mistura:

- Pesagem da resina HRJ10236® e da CR2001® (3% em peso). Os ligantes orgânicos têm a função de conferir ao grânulo e à peça conformada uma resistência mecânica suficiente. De acordo com resultados obtidos por outros autores (Barbosa, 2008), 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 consequência, 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:

• Distribuição do material do misturador nas matrizes (Figura 1). A amostra em forma de cilindro foi empregada para avaliação da morfologia e das propriedades mecânicas. A amostra na forma toroidal foi usada para medição das propriedades mag-

néticas. A amostra na forma de barra foi utilizada para medição da resistividade elétrica.

- Todas as amostras 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 minuto.

### c) Cura

- O processo de cura foi realizado em um forno sem atmosfera controlada. Foi realizada uma pré-cura até 50°C, com patamar de 2 minutos, e posterior aquecimento a 200°C, com patamar de 2 minutos.

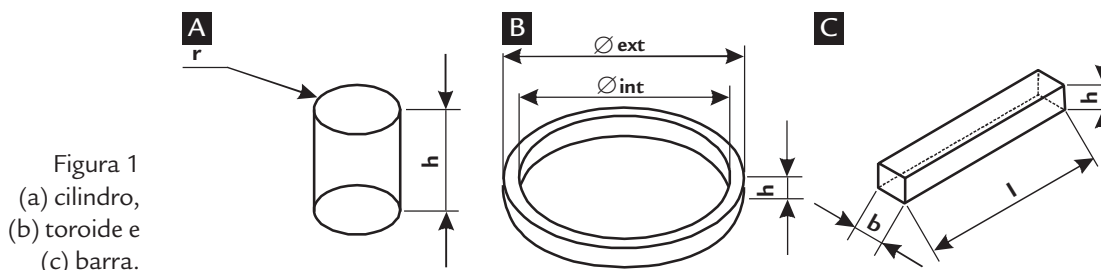


Figura 1  
(a) cilindro,  
(b) toroide e  
(c) barra.

## Caracterização do compósito magnético

A morfologia e a composição dos compósitos magnéticos obtidos e da amostra original foram avaliadas por Microscopia Eletrônica de Varredura (microscópio da marca JEOL-JSM 5800) contendo EDS acoplado. Para caracterização física dos compósitos magnéticos e da amostra original foi determinada

a densidade aparente, empregando-se o princípio de Arquimedes.

Para as análises termogravimétricas desse trabalho, utilizou-se o equipamento da Mettler Toledo TGA/SDTA 851e. O ensaio seguiu a norma ASTM E 1131. As análises foram realizadas na faixa de temperatura entre 25 e 900°C,

com taxa de aquecimento de 20°C.min<sup>-1</sup> em atmosfera de N<sub>2</sub>. 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. Essa técnica pode ser aplicada para estudo de envelhecimento acelerado, cinética de de-

composição e estabilidade de oxidação (Neag, 1995).

Para a caracterização mecânica das amostras elaboradas, foram realizados os ensaios de dureza e resistência à compressão. 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. Os ensaios de compressão foram realizados em um Equipamento Universal de Ensaios Mecânicos, marca INSTRON. A velocidade utilizada foi 1,5 mm/min e o ensaio realizado de acordo com a norma ASTM E9.

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.

Para a obtenção da curva de histerese, foram elaboradas amostras na forma de anel toroidal (Figura 1b) e as medidas foram realizadas em um equipamento com sensor Hall. 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.

A análise de resistividade foi determinada a partir da resistência do material, utilizando a Equação 1. 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 mede valores elevados de resistência elétrica, onde o ohmímetro não consegue medir. A área da amostra utilizada foi de: 16,16cm<sup>2</sup>.

$$\rho = \frac{R * A}{L} \quad (1)$$

Onde:

$\rho$  = resistividade elétrica em  $\Omega$ m.

A= Área da seção da amostra, medida em m<sup>2</sup>.  
R= Resistência elétrica em  $\Omega$ .

L= Comprimento da amostra, medido em m.

### 3. Resultados e discussão

#### Caracterização do Resíduo

Na Tabela 3 estão apresentados os resultados dos ensaios de lixiviação e solubilização do resíduo de Ferrotron<sup>®</sup> de acordo com a NBR 10004.

A partir da análise de lixiviação, o resíduo de Ferrotron<sup>®</sup> 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.

A partir da Figura 2, é possível observar a morfologia das partículas de resíduo do material magnético (Ferrotron<sup>®</sup>).

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  $\mu$ m e textura menos rugosa possível. Como pode-se observar na Figura 2, o material moído passante na peneira 140# (Figura 2f) corresponde àquele com melhor homogeneidade na distribuição das partículas e esse comportamento é um fator importante para elaboração do compósito. Por isso, no presente trabalho, esse foi o resíduo (Figura 2f) empregado para a obtenção

Parâmetro	Lixiviação			Solubilização		
	Resultado	Limite Máximo		Resultado	Limite Máximo	
Alumínio (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		<0,2	0,2	OK
Arsênio ( $\mu$ g.l <sup>-1</sup> )	<1,5	1,0	OK	<1,5	0,01	OK
Bário (mg.l <sup>-1</sup> )	<0,5	70	OK	<0,5	0,7	OK
Cádmio (mg.l <sup>-1</sup> )	<0,005	0,5	OK	<0,005	0,005	OK
Sódio (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		2,305	200	OK
Cobre (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		0,552	2,0	OK
Zinco (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		0,309	5,0	OK
Chumbo (mg.l <sup>-1</sup> )	<0,005	1,0	OK	<0,005	0,01	OK
Cromo Total (mg.l <sup>-1</sup> )	0,183	5,0	OK	<0,003	0,05	OK
Ferro (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		0,882	0,3	NOK
Manganês (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		0,017	0,1	OK
Mercúrio ( $\mu$ g.l <sup>-1</sup> )	<0,05	0,1	OK	<0,05	0,001	OK
Fenol (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		0,012	0,01	OK
Nitrato (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		<0,04	10,0	OK
Cianeto (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		<0,0003	0,07	OK
Sulfato (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		4,438	250,0	OK
Surfactantes (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		<0,01	0,5	OK
Cloreto (mg.l <sup>-1</sup> )	-	-		8,34	250,0	OK
Fluoreto (mg.l <sup>-1</sup> )	9,79	150	OK	2,24	1,5	NOK
Prata (mg.l <sup>-1</sup> )	<0,0015	5,0	OK	<0,0015	0,05	OK
Selênio ( $\mu$ g.l <sup>-1</sup> )	<2,0	1,0	OK	<2,0	0,01	OK

Tabela 3 - Análise de lixiviação.

do compósito magnético.

Pela Figura 3, pode-se observar que a maior concentração da massa passante acumulada apresenta uma distribuição com tamanho entre 250 e 500  $\mu\text{m}$ , apresentando, dessa forma, uma amostra com

uma boa distribuição granulométrica.

A partir da Figura 4 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 (Ramsdem, 1966).

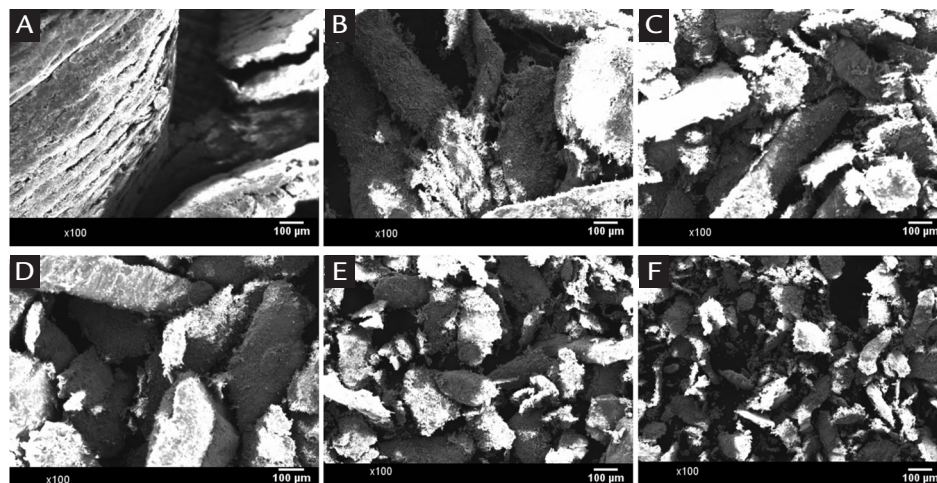


Figura 2  
Resíduo de (Ferrotron®):

- 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#.

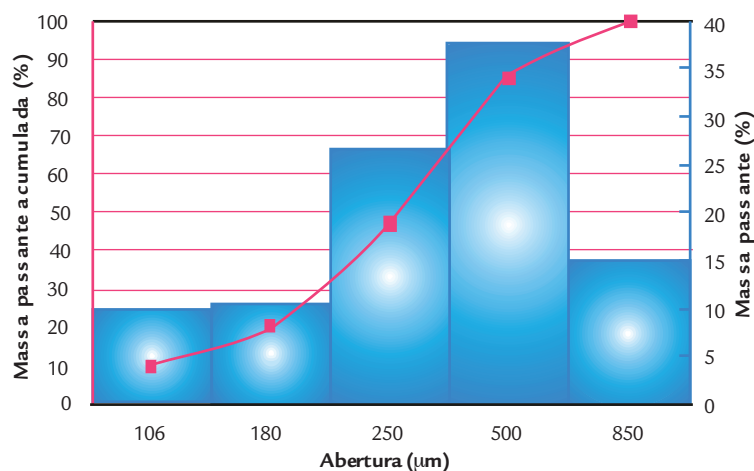


Figura 3  
Distribuição granulométrica do resíduo moído passante pela peneira de 140#.

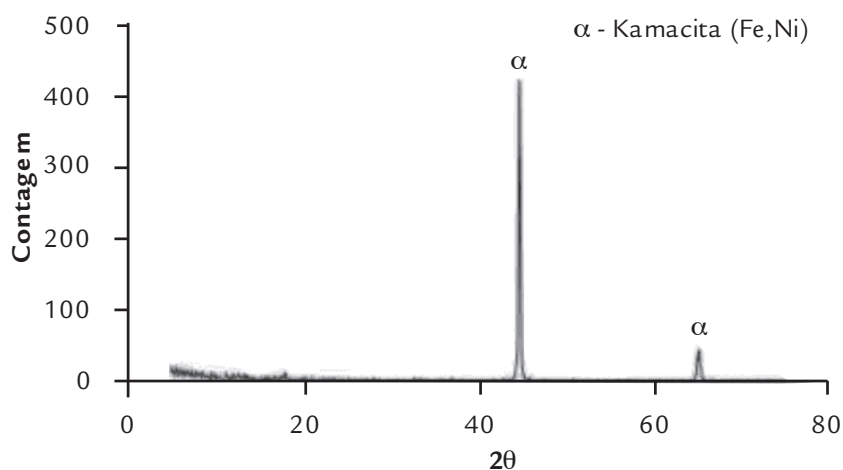


Figura 4  
Difratograma do resíduo de material magnético (Ferrotron®).

## Caracterização do compósito magnético

Na Tabela 4 e na Tabela 5, 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 não sofreram alteração quanto à classificação ambiental. Além

disso, é possível observar que a adição da resina aprimorou a capacidade do compósito em encapsular alguns elementos químicos, reduzindo a presença do mesmo no lixiviado e no solubilizado. Essa propriedade é muito importante, pois

impede que elementos desse material, quando disposto como resíduo, lixivem ou solubilizem para o meio externo.

Pela análise do aspecto da superfície das amostras obtidas por elétrons secundários - MEV (Figura 5), é possível observar uma morfologia muito seme-

lhante para os três sistemas estudados. As imagens obtidas com elétrons retroespalhados - MEV (Figura 6) evidenciam as regiões constituídas por resina (regiões escuras) e pela kamacita, que é composta por Fe e Ni (regiões claras). Os resultados mostraram que mesmo a amostra origi-

nal 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 6a e Figura 6b) apresentaram grãos menores e, conseqüentemente, uma maior área de contorno de grão.

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

Tabela 4  
Análise de lixiviação do compósito.

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

Tabela 5  
Análise de solubilização do compósito.

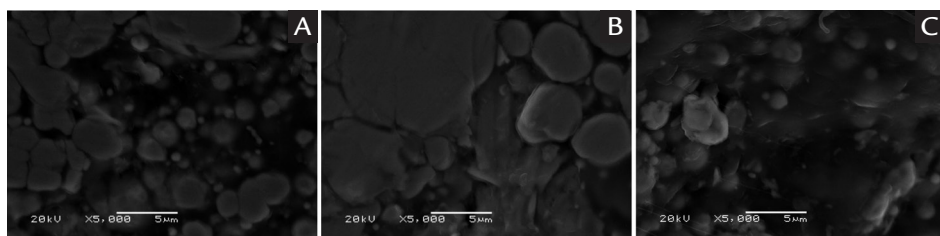


Figura 5  
Micrografias obtidas no MEV por elétrons secundários:  
a) Compósito (Ferrotron® + 3% resina CR2001);  
b) Compósito (Ferrotron® + 3% resina HRJ);  
c) Amostra original de Ferrotron®.

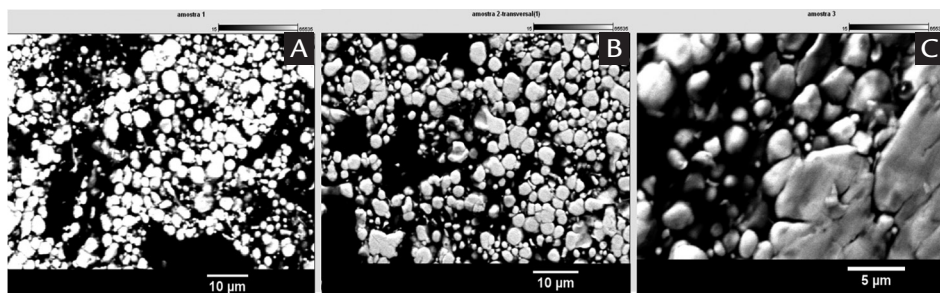


Figura 6  
Micrografias obtidas no MEV por elétrons retroespalhados:  
a) Compósito (Ferrotron® + 3% resina CR2001);  
b) Compósito (Ferrotron® + 3% resina HRJ);  
c) Amostra original de Ferrotron®.

A Tabela 6 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.

Tabela 6  
Resultados de densidade.

Os resultados obtidos por análise térmica (Figura 7, Figura 8 e Figura 9) 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 próxi-

mo a essa temperatura, 576°C e 583°C, respectivamente, além de mais 4 eventos associados, possivelmente, à presença de aditivos ou impurezas.

Vale salientar que a resina CR-2001® é uma resina fenólica tipo novolaca em pó modificada com epóxi, enquanto a resina HRJ® é uma resina fenólica modificada em pó, tipo novolaca, que contém

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

entre 7,5 e 8,5 % hexametileno-tetramina (Boletim Técnico, 2008; Boletim Técnico, 2004). Os resultados obtidos pelas análises de TGA, para as resinas antes da mistura com Ferrotron® (Figura 10 e Figura 11), indicam a presença de picos de degradação antes de 500°C, possivelmente relacionados à decomposição dos constituintes das mesmas. A resina CR-2001® é aquela que apresenta degradação importante em temperatura mais baixa (Figura 10), **no entanto, quando adicionada ao Ferrotron®, esse efeito é minimizado e a principal degradação ocorre, aproximadamente, à mesma temperatura do compósito elaborado com a resina**

HRJ®, indicando, dessa forma, o efeito importante da resina já incorporada ao material original. É importante considerar que o material original, comercializado como Ferrotron®, é obtido por metalúrgica do pó e constituído por kamacita com adição de uma resina comercial (não divulgada pelo fornecedor).

Portanto a análise do comportamento térmico dos compósitos magnéticos obtidos indica que os compósitos elaborados podem sofrer alterações, ainda de pequena importância, antes de 500°C. Porém a temperatura de trabalho prevista para esse material, quando empregado como concentrador de fluxo, está abaixo

de 300°C (mesmo o composto original Ferrotron®, não é indicado para operação por longo tempo em temperaturas superiores a 300°C - Fluxtrol, 2009) estando bem abaixo do pico da primeira degradação para os compósitos obtidos com ambas as resinas. 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%, pois o material original também é constituído por resina (Figura 6).

Os resultados obtidos no ensaio de compressão e de dureza estão apresentados na Tabela 7. A partir desses

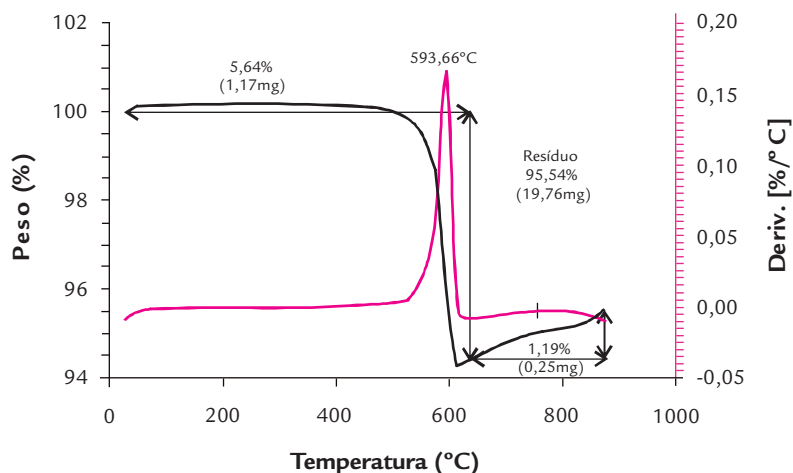


Figura 7  
Curva TGA e sua derivada DTG para a amostra Ferrotron®.

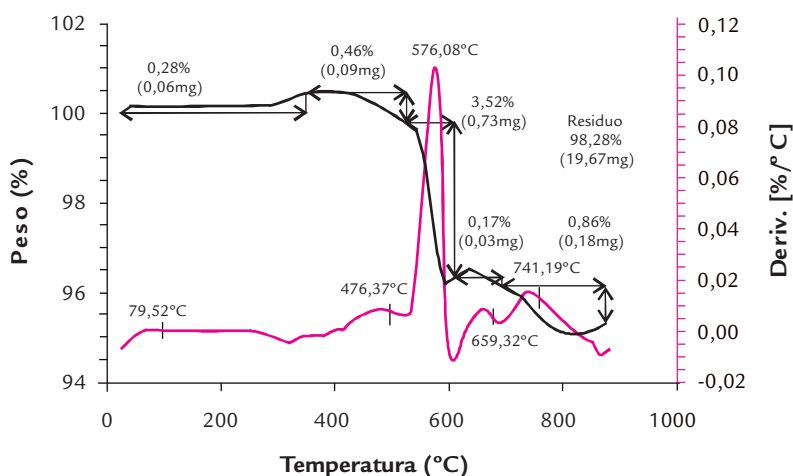


Figura 8  
Curva TGA e sua derivada DTG para a amostra Ferrotron® + HRJ.

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. 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.

Inúmeros fatores podem afetar essas propriedades mecânicas. Entre esses fatores podem ser citados: a quantidade de resina adicionada, parâmetros de processamento (tais como pressão de compactação) e tamanho das partículas.

Através da análise da densidade, pode-se considerar que os compósitos apresentam maior porosidade comparativamente ao material original. Além

disso, a presença de uma maior quantidade de resina também é evidenciada na morfologia pelas imagens de topo (Figura 6). Entretanto, pela análise de comportamento térmico, observou-se que as perdas 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, a microestrutura e a presença de porosidades

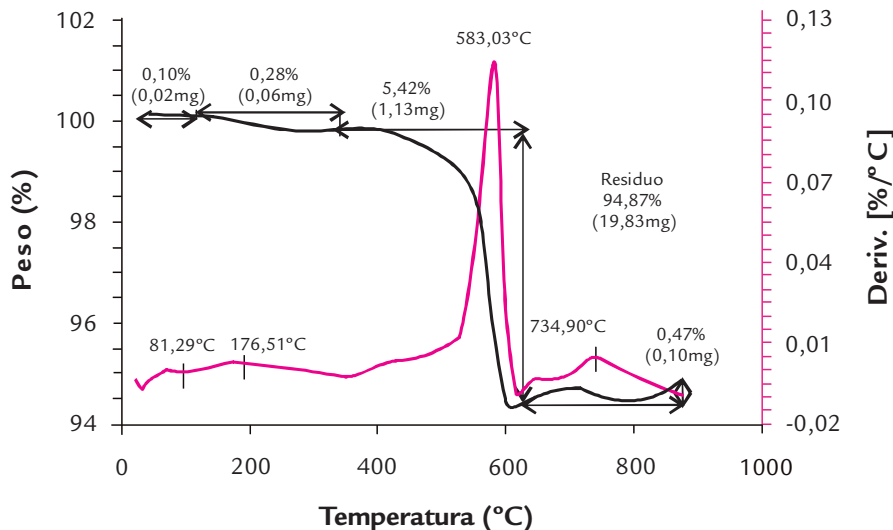


Figura 9  
Curva TGA e sua derivada, DTG para a amostra Ferrotron® + CR2001.

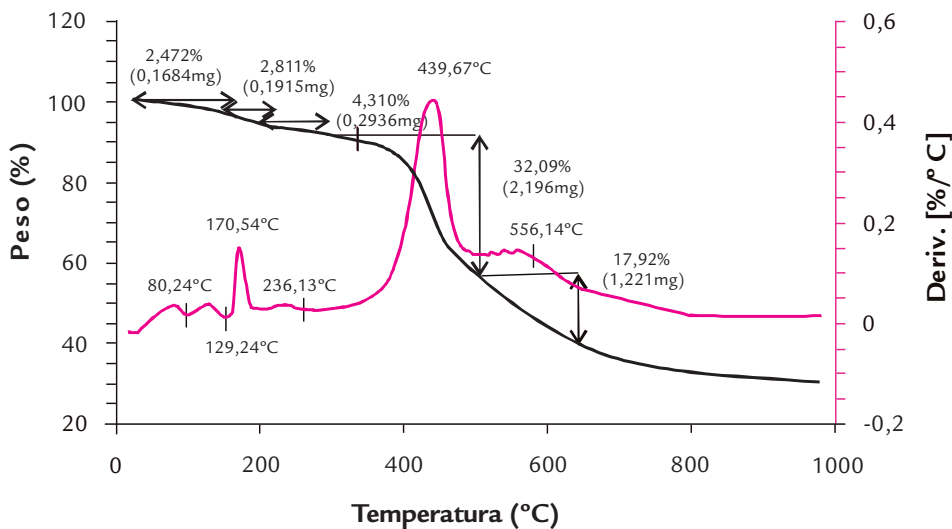


Figura 10  
Curva TGA e sua derivada DTG para a amostra CR2001.

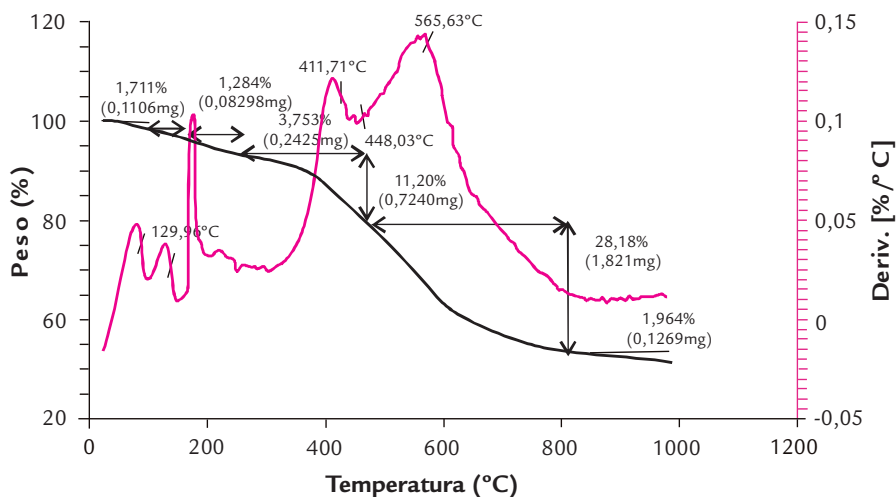


Figura 11  
Curva TGA e sua derivada DTG para a amostra HRJ.



Tabela 7  
Resultados dos ensaios de compressão e dureza.

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

podem ter sido os principais fatores que contribuíram para a diminuição da resistência mecânica dos compósitos.

A partir dos resultados obtidos pelo ensaio de caracterização magnética (Figura 12, Figura 13, Tabela 8), 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. Não foi evidenciado um aumento importante da coercividade, ou seja, a porosidade e os defeitos não foram suficientes para restringir os movimentos das paredes do domínio.

No entanto, os valores das perdas magnéticas foram reduzidos para ambos os compósitos. Essa redução pode ser consequência da adição da resina, que agiu como isolante elétrico, em torno das partículas de Ferrottron®, pois a adição de resina reduz perdas por correntes parasitas. 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 de passar por partes não-magnéticas que são constituídas pela resina e pelos poros (Cremonesi, 2009).

É importante ressaltar que, apesar de a permeabilidade do material ter-se

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. A adição de 3% de resina (independentemente do tipo de resina) gerou um aumento da resistividade elétrica, como pode ser observado na Tabela 9. 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 12  
Curva de histerese do material original e do material com resina em frequência 60Hz.

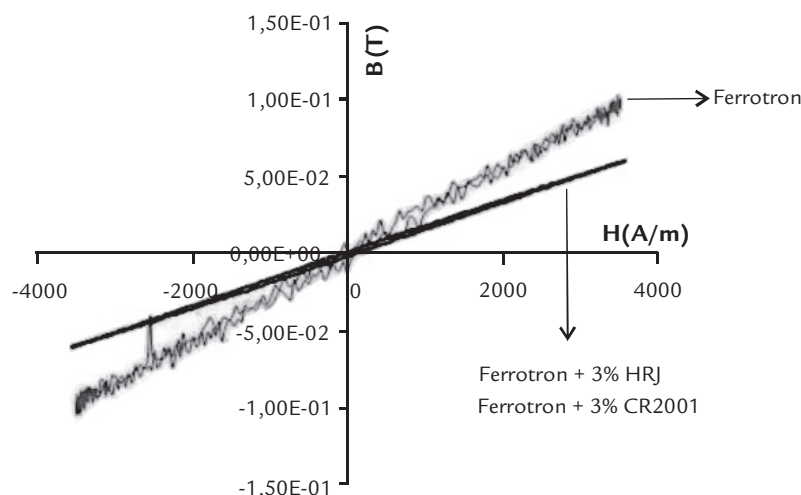


Figura 13  
Curva de magnetização da amostra original e da amostra com resina em frequência 60Hz.

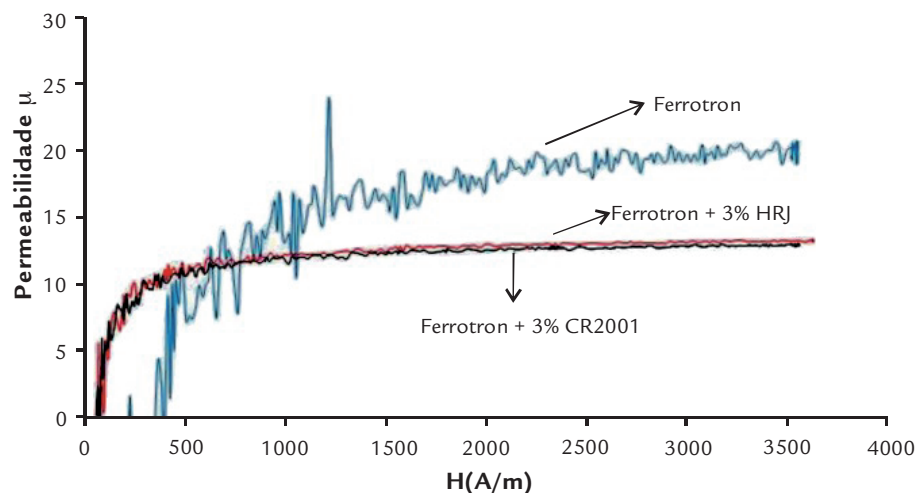


Tabela 8  
Resultados de permeabilidade magnética e perdas em frequência de 60Hz e 400 Hz.

Amostra	60 Hz		400 Hz	
	Permeabilidade relativa	Perdas (J/m <sup>3</sup> )	Permeabilidade relativa	Perdas (J/m <sup>3</sup> )
Ferrottron + 3% resina CR2001	12	12,79	12	15,10
Ferrottron + 3% resina HRJ	13	13,40	12	15,35
Ferrottron	20	29,03	20	32

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

Tabela 9  
Resultados de resistividade elétrica.

#### 4. 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 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 um melhor desempenho em relação às perdas magnéticas. Os compósitos apresentaram perdas magnéticas na ordem de 15 J/m<sup>3</sup>, enquanto o material original apresentou perdas magnéticas na ordem de 32 J/m<sup>3</sup>.

Em relação à análise de caracterização ambiental, não houve alteração. O material manteve-se como resíduo não inerte - classe IIA, 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 reuso como concentrador de fluxo, reduzindo impacto ambiental e de custos.

#### 5. Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq, a CAPES e a FAPERGS.

#### 6. Referências bibliográficas

- BARBOSA, 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS - CBECIMAT, 18. *Anais...* Porto de Galinhas – PE, 2008.
- BORGES, G. J. *Estudo do comportamento magnético de filmes finos eletrodepositados que apresentam magnetização perpendicular*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física, 2007. (Tese de Doutorado).
- CREMONEZI, A., LOPES, H. *A Metalurgia do pó: alternativa econômica com menor impacto ambiental*. São Paulo: Editora Metallum Eventos Técnicos, 2009. cap. 3, p. 85-95 (Materiais magneticamente moles).
- FLUXTROL CENTRE FOR INDUCTION TECHNOLOGY. *Section 2: Material Characteristics*. 2009, p. 1-7. Disponível em: <http://www.fluxtrol.com>. Acessado em 24/03/2010.
- JILES, D. *Introduction to magnetism and magnetic materials*. London: Chapman and Hall, 1991. 440p.
- NEAG, C. M. *Paint and coating testing manual*, ASTM, 1995. 850p. cap. 75 (Coatings characterization by thermal analysis).
- 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: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS, CBECIMAT, 17. *Anais...* Foz do Iguaçu - PR, 2006.
- PROPRIEDADES DA RESINA CR2001. Boletim Técnico SIGroup Crios, 2008.
- PROPRIEDADES DA RESINA HRJ-10236. Boletim Técnico Schenectady Brasil, 2004.
- RAMSDEM, A. R., CAMERO, E. N. Kamacite e Taenite superstructures and a metastable tetragonal phase in iron meteorites. *American Mineralogist*, v. 51, n. 1 e 2, p. 37-55, 1966.
- RUDENEV, V. I. An objective assessment of magnetic flux concentrators. *Heat Treating Progress*, December, p.19-23, 2004.

Artigo recebido em 31 de março de 2010. Aprovado em 06 de junho de 2011.