

**NICOLAU APOENA CASTRO**

**PÓ DE FERRO MICROENCAPSULADO: EFEITO DO  
TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA REDUÇÃO  
DAS PERDAS MAGNÉTICAS.**

**Trabalho de formatura apresentado à  
Escola Politécnica da Universidade de  
São Paulo.**

Engenharia Metalúrgica e de Materiais

Orientador:

André Paulo Tshiptshin

Co-orientadores:

Daniel Rodrigues

Fernando José Gomes Landgraf

**SÃO PAULO**

**2003**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus co-orientadores Daniel Rodrigues e Fernando Landgraf, que estiveram presentes em todas as etapas da pesquisa.

À Taeko Yonamine pela dedicação e pelo auxílio prestado em relação às medidas de perdas magnéticas.

Ao meu orientador André Paulo Tschiptschin pela possibilidade de realização do trabalho.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas pela disponibilização dos equipamentos utilizados na realização do trabalho e a toda a equipe do Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos pelo convívio e companheirismo.

## **SUMÁRIO**

<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>4</b>
<b>3. EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NAS PERDAS MAGNÉTICAS HISTERÉTICAS</b>	<b>25</b>
<b>3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>25</b>
<b>3.2 RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>28</b>
<b>3.3 CONCLUSÕES</b>	<b>31</b>
<b>4. EFEITO DO REVESTIMENTO ISOLANTE NAS PERDAS MAGNÉTICAS</b>	<b>32</b>
<b>4.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b>	<b>32</b>
<b>4.2 RESULTADOS OBTIDOS</b>	<b>35</b>
<b>4.3 CONCLUSÕES</b>	<b>41</b>
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS</b>	<b>42</b>

# **PÓ DE FERRO MICROENCAPSULADO: EFEITO DO TRATAMENTO TÉRMICO DE RECOZIMENTO NA REDUÇÃO DAS PERDAS MAGNÉTICAS.**

## **Resumo:**

A primeira etapa desse trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das perdas magnéticas histeréticas após tratamento térmico de recozimento em pó de ferro microencapsulado. Foram realizados recozimentos em duas etapas distintas: antes e depois a compactação do pó de ferro. O primeiro recozimento visa o crescimento dos grãos. O recozimento após a compactação visa minimizar a presença de defeitos microestruturais. Tanto o crescimento de grãos quanto a recuperação microestrutural são importantes para a redução das perdas histeréticas. Realizaram-se análises de perdas histeréticas em amostras antes e depois dos recozimentos.

A segunda etapa do trabalho visa testar duas estratégias de revestimento isolante: uma à base de magnetita e outra à base de partículas nanométricas de sílica. O comportamento das perdas magnéticas das amostras produzidas foram comparadas com um pó de ferro microencapsulado comercial (SomaloyTM 550), fornecido pela Höganäs AB.

**Palavras-chave:** microencapsulado, perdas magnéticas, pó de ferro.

**Abstract:**

The first aim of this work is to study the hysteretic loss behavior after annealing of insulated iron powder. Two kinds of annealing were carried out: after and before the powder pressing. The first annealing was performed in order to increase the grain size and second one was done to minimize the microstructural defects. The increase of the grain size and the reduction of the microstructural defects are very important to decrease the hysteretic loss. Magnetic losses were measured in as-pressed and in annealed samples. The second aim is to study the magnetic loss behavior (hysteresis, parasitic and excess loss) after annealing of insulated iron powder, where the iron particles were superficially oxidized. Two kinds of insulation material were tried: one based on magnetite and the other based on nanometric particles of silica. The behavior of magnetic loss of the two kinds of samples produced was compared to a commercial insulated iron powder (Somaloy<sup>TM</sup> 550), from Höganäs AB.

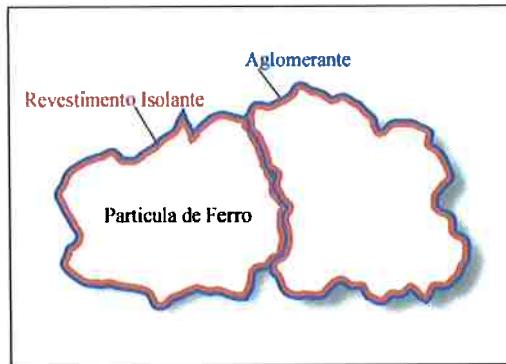
The main idea is, by means of recovery annealing, to minimize the amount of microstructural defects, which are responsible for the hysteresis loss increasing.

Besides that, keep the electrical resistivity after annealing is fundamental for minimizing parasitic loss.

Magnetic losses were measured in as-cast and in annealing samples. The electrical resistivity of the samples was measured in order to calculate parasitic loss. The hysteresis loss was obtained from the hysteresis loops measured at 5 mHz. The excess loss corresponds to the difference between total and the sum of hysteresis and parasitic loss.

## 1. Introdução:

Pó de ferro microencapsulado é um material ferromagnético composto por partículas de ferro revestidas por um isolante elétrico, que reduz a condutividade elétrica do material. A figura 1.1 representa esquematicamente partículas de ferro microencapsuladas.



**Figura 1.1:** Desenho esquemático de um pó de ferro microencapsulado<sup>1</sup>.

Os pós de ferro microencapsulados foram desenvolvidos para fabricação de núcleos de motores elétricos (figura 1.2), e são potenciais substitutos das chapas de aços elétricos de grão não orientado, devido principalmente a possibilidade de produção de peças monobloco através de metalurgia do pó.



**Figura 1.2:** Núcleo de motor elétrico produzido por pó de ferro microencapsulado<sup>1</sup>

Este trabalho tem como objetivo estudar o comportamento das perdas magnéticas histeréticas após tratamento térmico de recozimento em pó de ferro microencapsulado. Foram realizados recozimentos em duas etapas distintas: antes e após a compactação do pó de ferro. O primeiro recozimento visa o crescimento dos grãos. O recozimento após a compactação

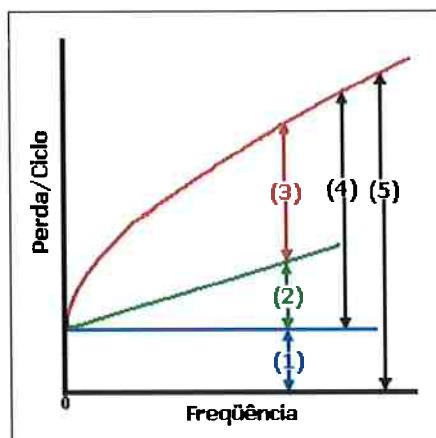
visa minimizar a presença de defeitos microestruturais. Tanto o crescimento de grãos quanto a recuperação microestrutural são importantes para a redução das perdas histeréticas. Realizaram-se análises de perdas histeréticas em amostras antes e depois dos recozimentos.

### 1.1 Perdas Magnéticas:

Para entender melhor a aplicação do pó de ferro microencapsulado será apresentada uma breve introdução sobre perdas magnéticas, que serão apresentadas com mais detalhes no item 2.2. As perdas magnéticas de um material ferromagnético são compostas por três parcelas:

- Perdas por correntes parasitas (ou de Foucault);
- Perdas por histerese (ou em corrente contínua);
- Perdas anômalas.

A figura 1.3 ilustra a separação das perdas magnéticas em um material ferromagnético.



**Figura 1.3: separação de perdas magnéticas<sup>2</sup>.**

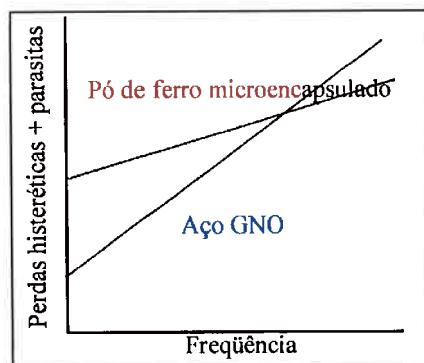
Onde:

- Perda por histerese;
- Perda por corrente parasita;
- Perda anômala;
- Perda total (1+2+3);
- Perda por corrente parasita aparente (2+3);

### 1.1.1 Perdas por correntes parasitas:

As correntes parasitas são geradas durante os ciclos de magnetização sob campos magnéticos alternados. Sua intensidade é função da freqüência do campo magnetizante, resultando em maiores perdas, quanto maior for a freqüência do ciclo. As perdas por correntes parasitas podem ser minimizadas reduzindo-se a espessura de chapas (em motores elétricos) ou aumentando-se a resistividade elétrica do material ferromagnético.

O isolamento elétrico existente entre as partículas do pó de ferro microencapsulado proporciona resistividade elétrica superior ao material convencional (aço elétrico GNO), reduzindo as perdas por correntes parasitas. Como as perdas parasitas crescem com a freqüência, altas freqüências favorecem os materiais microencapsulados, em termos de perdas magnéticas totais. A figura 1.4 representa o comportamento das perdas magnéticas com a freqüência.



**Figura 1.4:** Comportamento dos materiais em função da freqüência.

### 1.1.2 Perdas por histerese:

As perdas por histerese 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.

Devido a deformação ao qual o material microencapsulado foi submetido (durante a compactação), existe a necessidade de recuperar sua microestrutura, sendo necessário um tratamento térmico de recuperação ou recristalização. Este tratamento tem como objetivo reduzir as perdas histeréticas do material.

Quando um material ferromagnético é exposto a um campo magnético alternado, à medida que esse campo vai aumentando, a indução também vai aumentando até atingir a saturação ( $B_s$ ). A partir desse ponto, se o campo magnético for reduzido a zero, a indução vai diminuir até um valor denominado indução residual ( $B_r$ ). Se o campo for aplicado no sentido inverso ao primeiro, a indução diminuirá até atingir o zero. O valor do campo em que isso ocorre é denominado campo coercivo ( $H_c$ ). Se o campo continuar aumentando, a indução magnética atingirá novamente a saturação ( $-B_s$ ). Completando-se um ciclo, teremos uma curva chamada de curva de histerese. A área dessa curva representa as perdas totais do material em um ciclo. Quando o ensaio é realizado em corrente contínua, pode-se dizer que a área da curva é equivalente às perdas histeréticas.

### 1.1.3 Perdas de excesso:

Perdas de excesso, conhecidas também como perdas anomais, são definidas como a diferença entre as perdas totais e a soma das perdas histeréticas e parasitas.

## 2. Revisão Bibliográfica

Como a aplicação do pó de ferro microencapsulado é semelhante aos aços elétricos, é importante analisar as principais características desse material.

Existem dois grandes grupos de aços elétricos: os aços de grão orientado (GO) e os de grão não orientado (GNO). O principal uso dos aços GO é em transformadores. Neste texto

serão discutidos principalmente os aços GNO, que são amplamente utilizados em motores elétricos. Estes materiais devem ser isotrópicos no plano da chapa para que se obtenha um melhor desempenho nos motores.

A textura do aço elétrico GNO após o recozimento final irá influenciar propriedades como permeabilidade e perdas magnéticas. Existe uma textura cristalográfica teórica ideal que geraria maior permeabilidade e menores perdas magnéticas. Essa textura cristalográfica é a  $\{100\}<0vw>$ , ou seja, todos os grãos com o plano (100) paralelo à superfície da chapa e a direção [001] de cada grão distribuída aleatoriamente em todas as direções no plano da chapa.

Isto se deve ao seguinte: os eixos [100] são os eixos de fácil magnetização no ferro  $\alpha$ . Estes eixos devem estar distribuídos aleatoriamente paralelos à superfície da chapa, pois o campo é aplicado paralelamente à chapa e em todas as direções. O único plano que contém duas direções  $<100>$  é o plano {100}. Assim define-se a melhor condição, ou seja, textura fibra {100}  $<0vw>$ . Aços com essa textura ainda não são produzidos comercialmente. A textura final depende de diversos fatores, tais como textura da “bobina a quente”, composição química, estrutura cristalina, impurezas, tamanho de grão inicial, grau de deformação, microestrutura de deformação e outros.

Os aços elétricos GNO são divididos em duas categorias: os aços semiprocessados e os aços totalmente processados. O processamento dos aços elétricos de grão não orientado envolve etapas de laminação a quente, laminação a frio e recozimento. No caso dos aços semiprocessados, a chapa laminada a quente (“bobina a quente”) com aproximadamente 2,5 mm de espessura sofre uma laminação a frio até atingir aproximadamente 0,55 mm de espessura, é recozida e laminada a frio com baixo grau de deformação. O fabricante de motores recebe a chapa, faz a estampagem no formato desejado e o recozimento final em atmosfera descarbonetante. No caso dos aços totalmente processados, a bobina a quente é laminada a frio até aproximadamente 0,5 mm de espessura e então é recozida para

recristalização total, sendo utilizada nessas condições. As deformações a frio causam mudanças microestruturais que afetam a textura do material encruado e consequentemente a textura do material após a recristalização. Em operações industriais de trabalho a frio tal como laminação de chapas é menos dispendioso fazer reduções consecutivas sem um recozimento intermediário. Assim, os produtos geralmente sofrem reduções de área acima de 90% entre os recozimentos. Isto resulta em grãos com tendência a assumir determinadas orientações. O grau de deformação dos aços elétricos é bastante intenso (da ordem de 80% de deformação), causando no posterior recozimento um tamanho de grão muito pequeno, da ordem de 10 µm, inadequado para as propriedades magnéticas. Trabalhos anteriores mostraram que o tamanho de grão ideal está na faixa de 100 a 150 µm (Shimanaka et al., 1982). Para que se consiga este tamanho de grão, é feita uma laminação a frio com baixo grau de deformação (também chamada de laminação de encruamento) e então o recozimento final.

## *2.1. A Importância dos aços elétricos*

A importância desse tema está ligada ao fato de que os aços para fins elétricos são os materiais magnéticos utilizados em maior volume no país e no mundo. O Brasil produz anualmente 335.000t (em 1998) de aços para fins elétricos, utilizados em transformadores, motores, geradores, reatores de iluminação, medidores de energia e outras aplicações. Estima-se que o mercado brasileiro de aços para fins elétricos movimente pelo menos 200 milhões de dólares por ano. O Brasil tem participação destacada neste mercado, tanto como produtor de aços elétricos (principalmente Acesita, CSN, Usiminas) como também de motores e equipamentos (Weg, Tecumseh, Embraco, Arno) que utilizam esses aços.

## 2.2 Propriedades Importantes

As propriedades dos aços elétricos são controladas para minimizar as perdas magnéticas e maximizar a permeabilidade magnética. As perdas estão diretamente relacionadas à eficiência energética das máquinas elétricas, enquanto que a permeabilidade magnética, com o fator de ampliação do fluxo magnético.

### 2.2.1 Perdas Magnéticas:

As perdas magnéticas de um material ferromagnético são compostas por três parcelas:

- d) Perdas por correntes parasitas (ou de Foucault);
- e) Perdas por histerese (ou em corrente contínua);
- f) Perdas anômalas.

A figura 2.1 ilustra a separação das perdas magnéticas em um material ferromagnético.

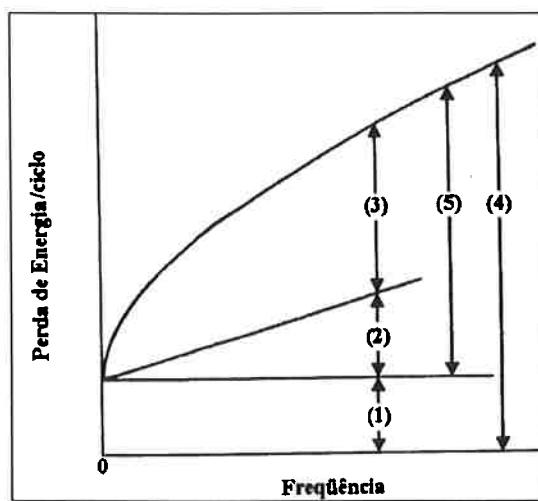


Figura 2.1: separação de perdas magnéticas<sup>2</sup>.

Onde:

- 1 – Perda por histerese;
- 2 – Perda por corrente parasita;
- 3 – Perda anômala;
- 4 – Perda total (1+2+3);
- 5 – Perda por corrente parasita aparente (2+3).

### **Perdas por correntes parasitas:**

As correntes parasitas são geradas durante os ciclos de magnetização sob campos magnéticos alternados. Sua intensidade é função da freqüência do campo magnetizante, resultando em maiores perdas, quanto maior for a frqüência do ciclo. Pode-se minimizar as perdas por correntes parasitas se utilizarmos chapas finas isoladas entre si (em motores elétricos) ou aumentando-se a resistividade do material ferromagnético (adicionando-se silício, por exemplo).

### **Perdas por histerese:**

As perdas por histerese 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.

Quando um material ferromagnético é exposto a um campo magnético, à medida que esse campo vai aumentando, a indução também vai aumentando até atingir a saturação ( $B_s$ ). A partir desse ponto, se o campo magnético for reduzido a zero, a indução vai diminuir até um valor denominado indução residual ( $B_r$ ). Se o campo for aplicado no sentido inverso ao

primeiro, a indução diminuirá até atingir o zero. O valor do campo em que isso ocorre é denominado campo coercivo ( $H_c$ ). Se o campo continuar aumentando, a indução magnética atingirá novamente a saturação ( $-B_s$ ). Completando-se um ciclo, teremos uma curva chamada de curva de histerese. A área dessa curva representa as perdas totais do material em um ciclo. Quando o ensaio é realizado em corrente contínua, pode-se dizer que a área da curva é equivalente às perdas histeréticas. A figura 2.2 representa a curva de histerese de um material ferromagnético.

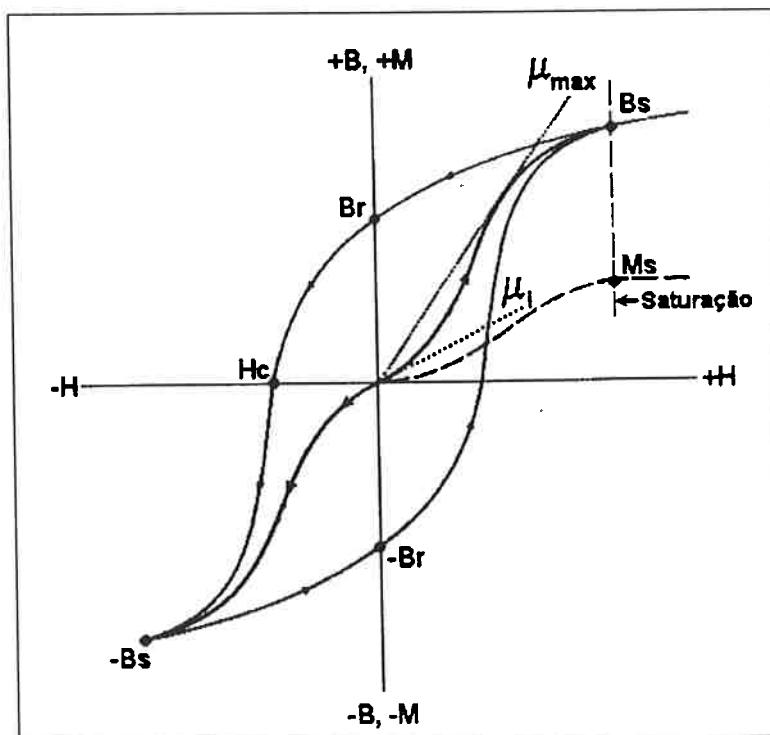


Figura 2.2: Curva de histerese magnética típica de um material ferromagnético<sup>2</sup>.

Indução magnética (B): é o número de linhas de fluxo por unidade de área perpendicular à direção desse fluxo;

Campo magnético ou força magnetizante (H): é a intensidade de um campo magnético e corresponde à força aplicada pelo campo;

Permeabilidade magnética relativa ( $\mu$ ): é a razão entre a indução magnética e o campo magnetizante. Essa razão é a medida da facilidade com a qual um material pode ser magnetizado. Essa grandeza é medida em relação ao ar.

Indução de saturação ( $B_s$ ): é o valor da indução quando a magnetização atinge seu valor máximo.

Indução residual ( $B_r$ ): é a indução remanescente no material quando o campo magnético é reduzido a zero;

Campo coercivo ( $H_c$ ): é o campo magnético que deve ser aplicado para reduzir a zero a indução magnética.

Permeabilidade inicial ( $\mu_i$ ): é o coeficiente angular que se obtém quando se traça uma tangente à curva virgem de histerese assim que o campo começa a ser aplicado, sendo que o ponto inicial da tangente é a origem dos eixos;

Permeabilidade máxima ( $\mu_{max}$ ): é o maior coeficiente angular que se pode obter quando se traça uma tangente à curva virgem de histerese, sendo que o ponto inicial da tangente é a origem dos eixos.

### **Perdas anômalas (ou de excesso):**

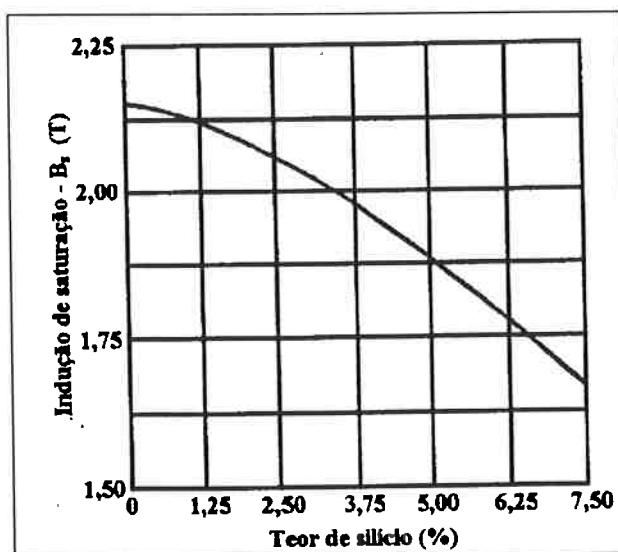
Ainda não se sabe a causa das perdas anômalas nem a correlação existente com as propriedades do material. Perdas anômalas são simplesmente definidas como a diferença entre as perdas totais e a soma das perdas histeréticas e parasitas.

## **2.2 Fatores que afetam as propriedades magnéticas**

Existem alguns fatores que podem influenciar as propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão não orientado, tais como composição química, espessura final da tira, tamanho de grão, tensões residuais, textura cristalográfica, precipitados e defeitos subsuperficiais (oxidação interna, nitretação). A seguir será discutida a influência desses fatores no desempenho do aço.

### 2.2.1 Composição química

São adicionados elementos de liga como Si, Al e Mn para aumentar a resistividade elétrica dos aços elétricos e, consequentemente, reduzir as perdas parasitas. Entretanto, quanto maior o teor desses elementos de liga, menor será a indução de saturação do material. A figura 2.3 mostra o efeito do teor de Si na indução de saturação.



**Figura 2.3:** Influência do teor de Si na indução de saturação de um aço elétrico<sup>3</sup>.

Outro fator limitante à adição de silício e outros elementos de liga ao aço elétrico é a redução da plasticidade do material. Como os aços elétricos são obtidos através de laminação e estampagem, torna-se um fator muito importante. Admite-se trabalhar industrialmente com

teores de Si em torno de 3,5%. A figura 2.4 mostra o efeito do Si nas perdas magnéticas totais de um aço elétrico GNO.

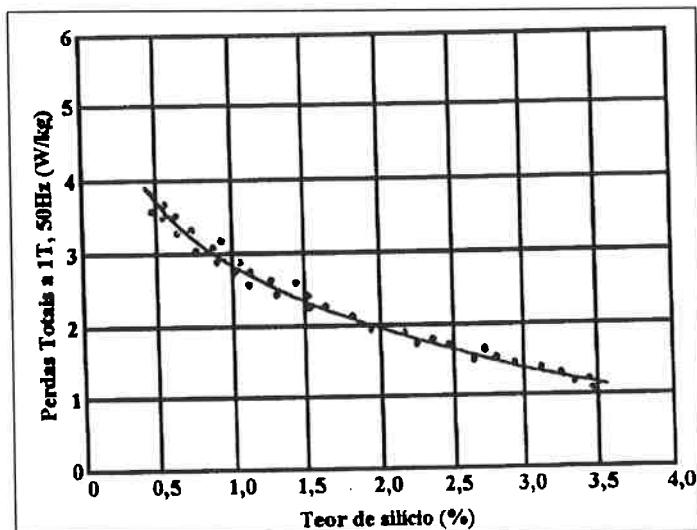


Figura 2.4: Redução das perdas magnéticas totais com a adição de Si<sup>3</sup>.

Elementos como S, N, Ti e O têm efeito indireto no processo de fabricação, pois formam precipitados e/ou inclusões. As inclusões aumentam as perdas por histerese, impedindo o crescimento do grão, portanto perdendo as propriedades magnéticas. A seguir estão apresentados gráficos avaliando a influência do O, S e N nas perdas magnéticas.

## 2.2.2 Espessura final da tira

Quando várias tiras de aço de grão não orientado são testadas juntas, apresentam perda magnética inferior a uma barra compacta de mesma espessura. Isso ocorre porque o caminho percorrido pelas correntes parasitas diminui. Entretanto, quanto mais fino for o material, maiores são as perdas histeréticas. Portanto, a perda total em função da espessura final passa por um ponto ótimo, ou seja, um ponto de perda mínima. A figura 2.5 mostra o comportamento das perdas totais com a variação da espessura.

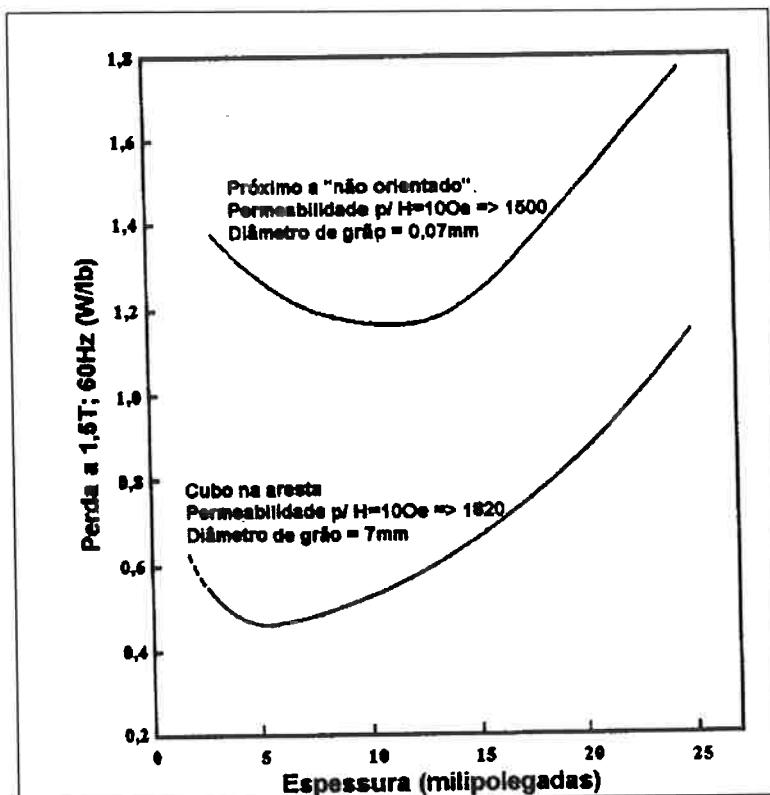


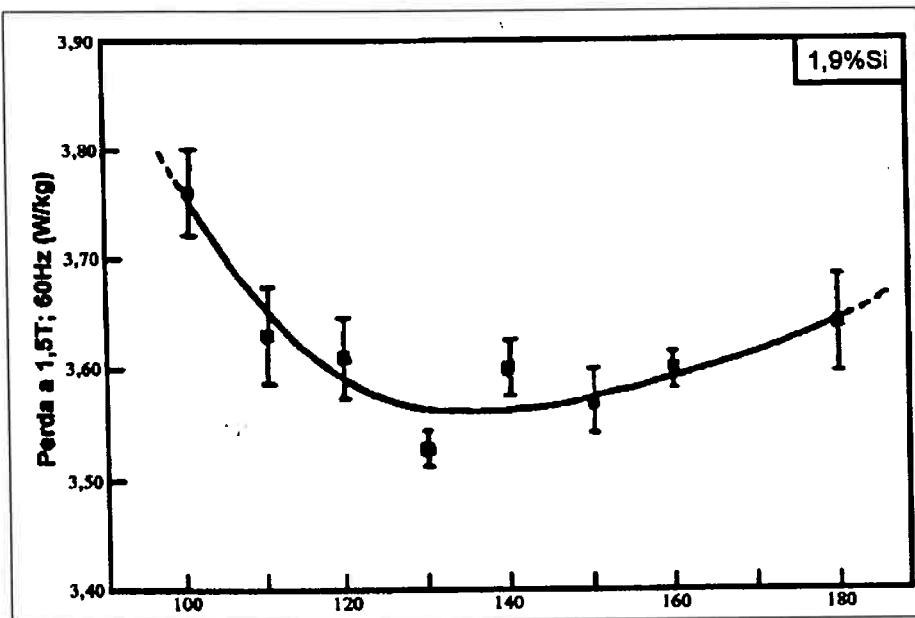
Figura 2.5: variação das perdas totais com a espessura da lâmina<sup>3</sup>.

Nos microencapsulados, as partículas isoladas eletricamente entre si produzem o mesmo efeito das tiras de aços elétricos, reduzindo as perdas parasitas.

### 2.2.3 Tamanho de grão final

Nos aços de grão não orientado, o diâmetro de grão final varia de 50µm a 200 µm. Esses grão são divididos em regiões magnetizadas espontaneamente chamadas de domínios magnéticos. As regiões de transição entre estes domínios são chamadas de paredes de domínio. Grãos maiores aumentam o tamanho dos domínios e diminuem o número de paredes, facilitando a movimentação dessas durante a magnetização. Em decorrência disso, ocorre uma redução de perdas por histerese. Por outro lado, o aumento da velocidade de movimentação de paredes aumenta perdas por correntes parasitas induzidas durante a variação

do campo magnetizante. Portanto, existe um tamanho de grão que provoque perdas totais mínimas, como mostra a figura 2.6.



**Figura 2.6:** influência do tamanho de grão nas perdas magnéticas totais<sup>3</sup>.

#### 2.2.4 Tensões Residuais

as tensões residuais produzem um acréscimo nas perdas magnéticas totais e podem ser geradas por impurezas que distorcem a estrutura cristalina ou por tensões mecânicas introduzidas durante o processamento do material, como por exemplo, resfriamentos bruscos, tensionamentos excessivos da tira durante o recozimento final, empenos durante o manuseio, flexionamentos da tira, dentre outros. Essas tensões provocam distorções na estrutura cristalina do material, dificultando a movimentação das paredes de domínio durante a magnetização do material, podendo ser minimizadas com a redução de impurezas como o carbono, enxofre, nitrogênio e oxigênio ou por diminuição das tensões mecânicas por tratamento térmico de recuperação.

### 2.2.5 Precipitados e defeitos sub-superficiais

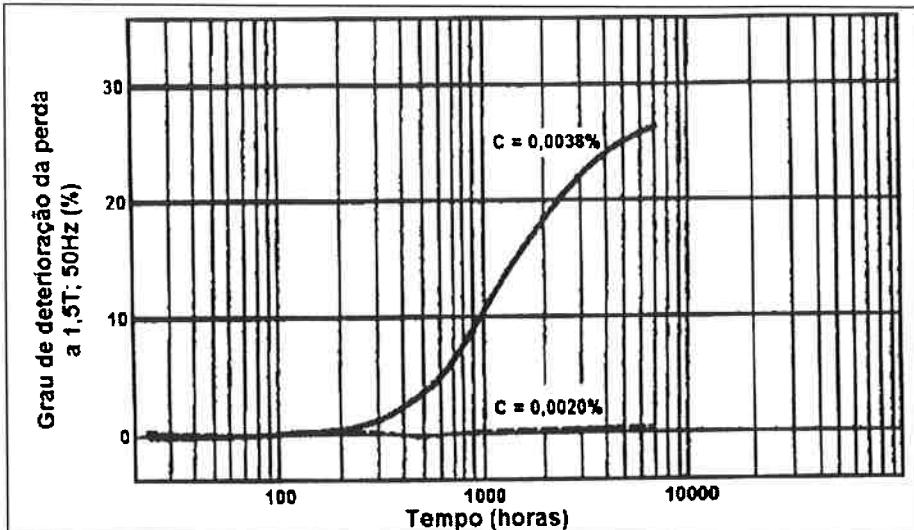
Durante o processo de fabricação de aços elétricos são realizados tratamentos térmicos (em atmosferas ricas em O<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>) que podem causar a oxidação e/ou nitretação interna do material, aumentando as perdas magnéticas totais. Quanto menor a espessura da lâmina, maior será a influência desse defeito.

A oxidação e a nitretação interna geram inclusões não metálicas, provocando ancoramento das paredes de domínio. Com a redução da mobilidade das paredes de domínio aumentam-se as perdas histeréticas e a permeabilidade do material é reduzida.

As inclusões não metálicas também podem causar redução do tamanho de grão, aumentando as perdas magnéticas totais.

### 2.2.6 Envelhecimento magnético

A formação de precipitados, em geral carbonetos ou nitretos é termodinamicamente favorável, pois reduz a energia livre do sistema. A temperatura afeta diretamente o tempo em que ocorre precipitação, portanto a temperatura de trabalho de um motor elétrico é de fundamental importância para calcularmos a vida útil do material ferromagnético. Com a precipitação haverá ancoramento de paredes de domínio, causando degradação magnética do material. Os teores de C, N, P e outros elementos formadores de precipitados influenciam diretamente o envelhecimento magnético. Quanto maior o teor desses elementos, mais propícios a precipitação estarão os aços. A figura 2.7 mostra a influência do teor de C no envelhecimento magnético.



**Figura 2.7:** influência do teor de C no envelhecimento magnético<sup>3</sup>.

### 2.2.7 Textura Cristalográfica

Uma chapa de aço consiste de um número imenso de grãos. Pode-se identificar a orientação de cada grão em relação a algum referencial espacial da chapa. São utilizados geralmente dois referenciais: o plano de sua superfície e a direção do comprimento da bobina, também chamada de direção de laminação ou direção longitudinal. A textura cristalográfica é uma descrição da distribuição de orientações do conjunto de grãos da chapa em relação a esses referenciais.

Em uma chapa de aço, seria possível imaginar uma textura aleatória, ou seja, grãos orientados em todas as direções possíveis. Porém os tratamentos termo-mecânicos feitos na chapa provocam alterações na textura. Podem ser observadas texturas bem definidas dependendo do tratamento que a chapa sofreu.

Já foi dito que para os aços elétricos de grão não orientado a textura teórica ideal é a textura fibra {100} <0vw>, ou seja, que todos os grãos possuam plano tipo {100} paralelo à superfície da chapa e direções <001> aleatoriamente distribuídas ao longo da superfície da chapa. O que se observa em aços semiprocessados é uma textura não favorável às

propriedades magnéticas. Um grande número de grãos tem o plano (111) paralelo à superfície da chapa, com a direção [112] paralela à direção de laminação. Esse plano não é favorável, pois não possui nenhuma direção [100] no plano paralelo à superfície da chapa. O que geralmente se observa é que após laminação a frio e recocimento de aços, forma-se uma textura fibra {111} muito pronunciada. Essa textura não é boa para o caso dos aços elétricos. Existem alguns grupos de pesquisa que buscam diminuir a fração de grãos com textura fibra {111} e aumentar a textura fibra {100} através de diversos experimentos, como por exemplo aumentar o tamanho de grão da bobina a quente (Takashima, 1993), laminar material parcialmente recristalizado (Takashima, 1997), lingotamento contínuo de tiras (Park et al., 2001), laminação cruzada (Ushimagi et al., 1988 apud de Campos, 2000) e outros. Porém, ainda não foi descoberto um processo comercial para a produção da textura teórica ideal.

## 2.2.8 Texturas de recristalização

As texturas de recristalização são grandemente afetadas pelos mecanismos de início da recristalização e pela microestrutura de deformação. Além disso, outros fatores são importantes, tais como o efeito do grau de deformação, a textura inicial, tamanho de grão inicial e a pureza do metal.

A natureza da textura de recristalização é determinada basicamente por dois fatores:

- As orientações dos novos grãos;
- As taxas de nucleação e crescimento relativas desses grãos.

Existem duas teorias para explicar a textura de recristalização: nucleação orientada e crescimento orientado.

*Nucleação orientada:* núcleos apresentam orientação definida (distribuição de orientação cristalográfica não é aleatória)

*Crescimento orientado:* distribuição de orientação cristalográfica de núcleos é randômica, mas alguns núcleos crescem mais rapidamente que outros.

Portanto, na primeira, admite-se que a textura de recristalização seria determinada pela orientação dos núcleos de recristalização. Na segunda, a textura de recristalização seria determinada pelos núcleos que crescem mais velozmente. A hipótese de crescimento orientado invoca, portanto, o conceito de contornos especiais, os quais são contornos que se moveriam com mais rapidez que outros. No caso de aços, ocorreria alta mobilidade se a relação de coincidência entre contornos corresponder a uma rotação de 27º em torno da direção <110> (Humphreys et al., 1996).

Como já discutido no item 2.2.7, a textura de deformação de ferro e aço baixo carbono consiste principalmente de dois componentes: a textura fibra <111> paralela à direção normal e a textura fibra <110> paralela à direção longitudinal. As mudanças mais pronunciadas nessa segunda fibra durante o recozimento são um aumento nas intensidades dos componentes {110} e uma diminuição das orientações {100} (Humphreys, 1996). Com respeito à textura fibra <111> // DN a situação é menos reproduzível e a intensidade das componentes {111} <uvw> podem tanto aumentar ou diminuir. Apesar disso, essas componentes {111} <uvw> são as maiores tanto em chapas laminadas como em chapas recozidas.

De acordo com Hutchinson (Hutchinson, 1984), em um material deformado submetido a recozimento, o primeiro componente de textura a nuclear é a {011}, porém com baixa intensidade, seguido do {111} com alta intensidade, e por último, o {100}, com intensidade média (figura 2.4.2). Para conseguir textura teórica ideal, é necessário portanto avaliar processos que causem diminuição dos componentes de textura {011} e {111} e aumento do componente de textura {100}.

Em metais cúbicos de corpo centrado, as texturas de deformação são relativamente insensíveis ao material e parâmetros do processo. Geralmente são obtidas duas fibras intensas: as fibras  $\alpha$  e  $\gamma$ . O grau de deformação (redução na laminação) é importante para o reforço de diferentes componentes de textura (Hutchinson, 1999).

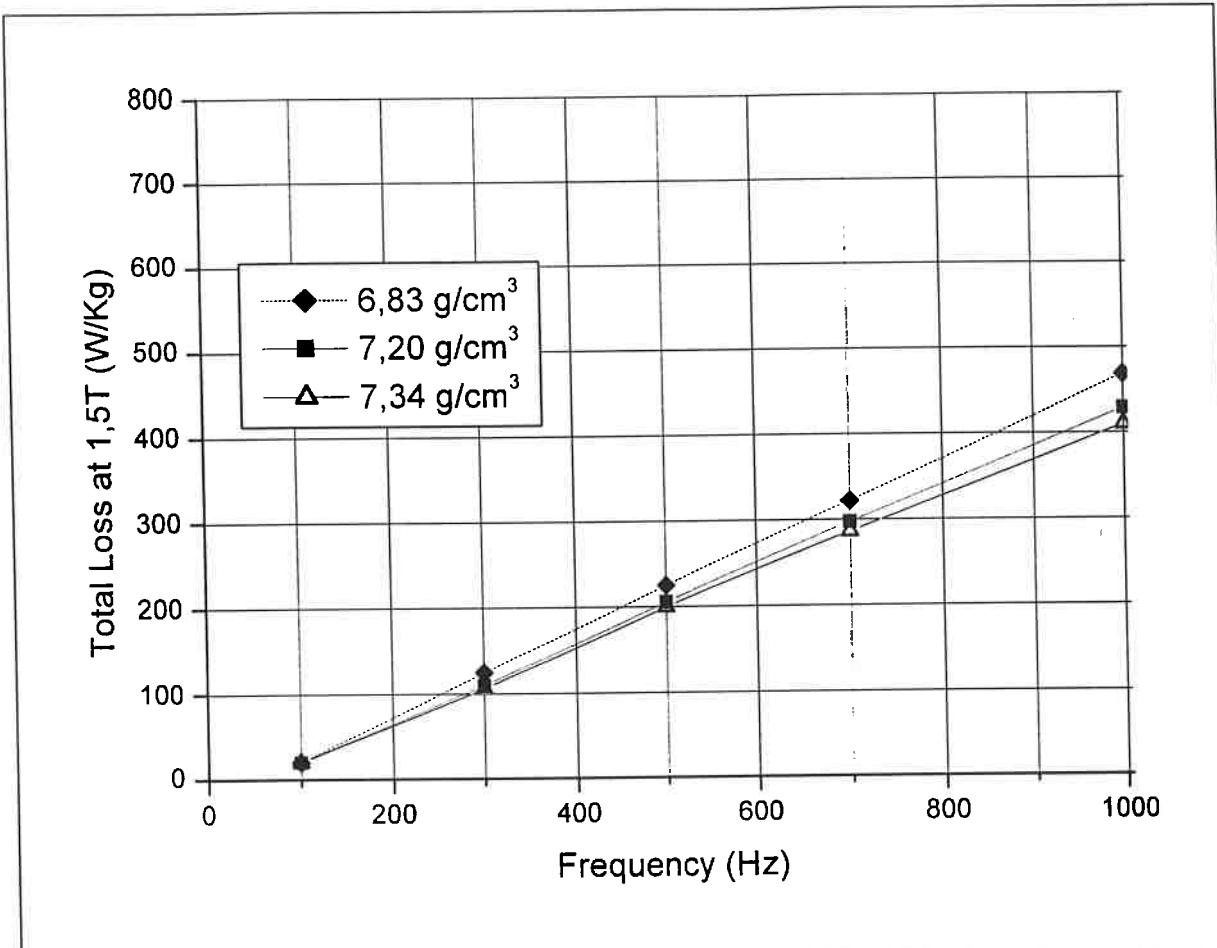
dos aços.

### **2.3 Propriedades dos Pós de Ferro Microencapsulado:**

Como os pós de ferro microencapsulados são materiais ainda pouco estudados, existe pouca bibliografia relacionada. As principais informações foram extraídas de catálogos de materiais comerciais e artigos recentemente publicados.

#### **2.3.1 Efeito da densidade do compactado no comportamento das perdas magnéticas:**

A figura 2.8 apresenta o comportamento das perdas magnéticas para três materiais compactados com densidades distintas. As três amostras foram compactadas com o mesmo pó (Somaloy 500TM, com 0,5% de Kenolube, tratadas a 500°C por 30 minutos).



**Figura 2.8:** Comportamento das perdas magnéticas totais em função da freqüência para amostras com densidades distintas<sup>4</sup>.

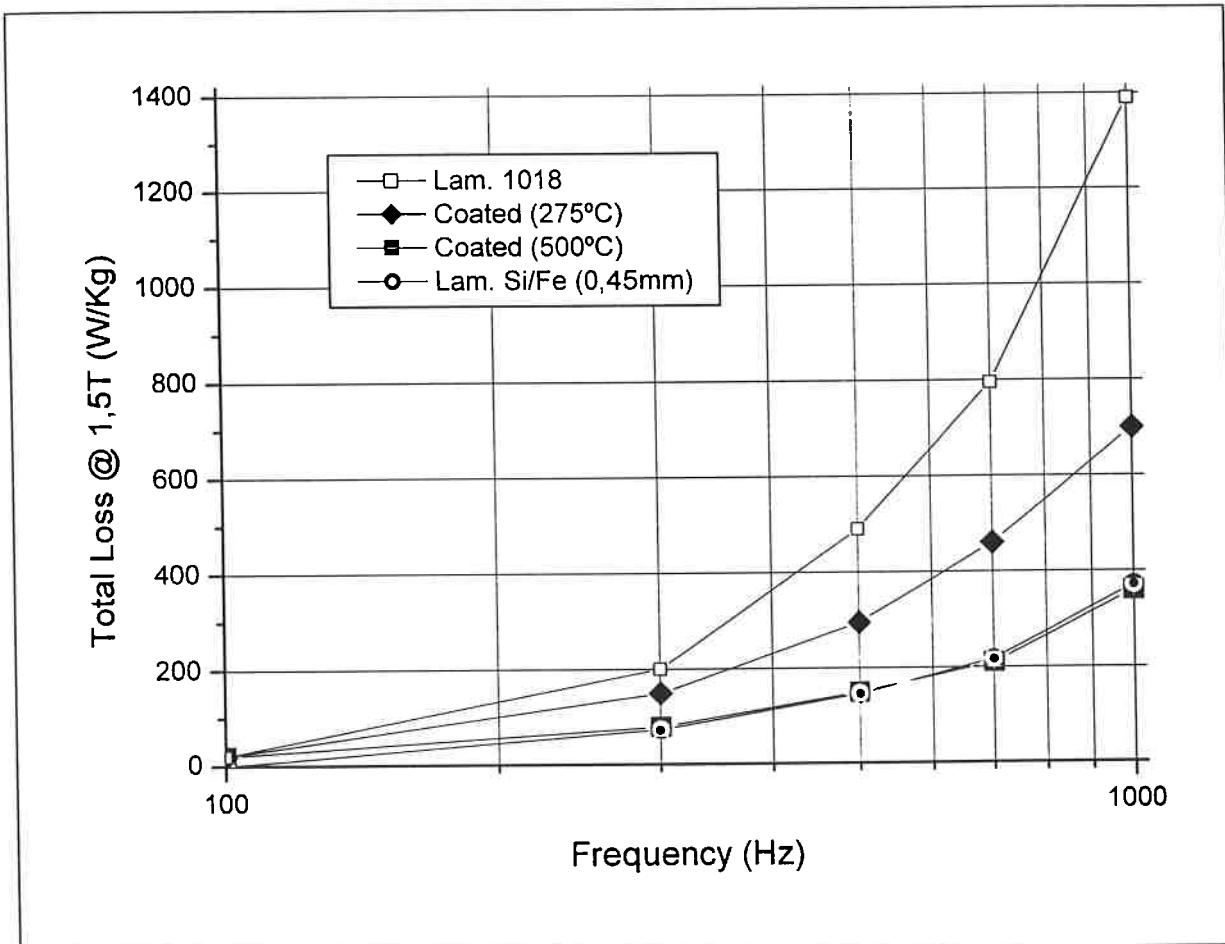
As amostras com densidades mais elevadas foram compactadas a pressões superiores.

A partir do gráfico percebe-se que o desempenho das perdas magnéticas totais com a freqüência melhora com o aumento da densidade. Portanto não há redução de resistividade elétrica com o aumento da compactação.

### 2.3.2 Comparação entre microencapsulados comerciais e aços elétricos:

A figura 2.9 apresenta o comportamento das perdas magnéticas totais em função da freqüência para dois aços elétricos convencionais (aço 1018 e Fe-3% Si) e microencapsulados comerciais (Somaloy 500 fornecido pela Höganäs AB), utilizando-se dois aglomerantes

distintos: LB1 para a amostra tratada a 275°C e Kenolube para a amostra tratada a 500°C. A temperatura de tratamento térmico foi escolhida levando-se em consideração a degradação térmica do aglomerante.



**Figura 2.9:** Comparação entre microencapsulados e aços elétricos quanto ao comportamento das perdas magnéticas em função da freqüência<sup>5</sup>

Observa-se que os materiais com melhores desempenhos são o aço Si e o microencapsulado tratado a 500°C. O pior material é o aço 1018 devido à baixa resistividade elétrica.

### 2.3.3 Desempenho das perdas magnéticas de microencapsulados comerciais em função do aglomerante utilizado:

A figura 2.10 apresenta o desempenho do pó microencapsulado Somaloy 550TM utilizando-se aglomerantes distintos (LB1 e Kenolube), tratados a temperaturas distintas ( $275^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ ).

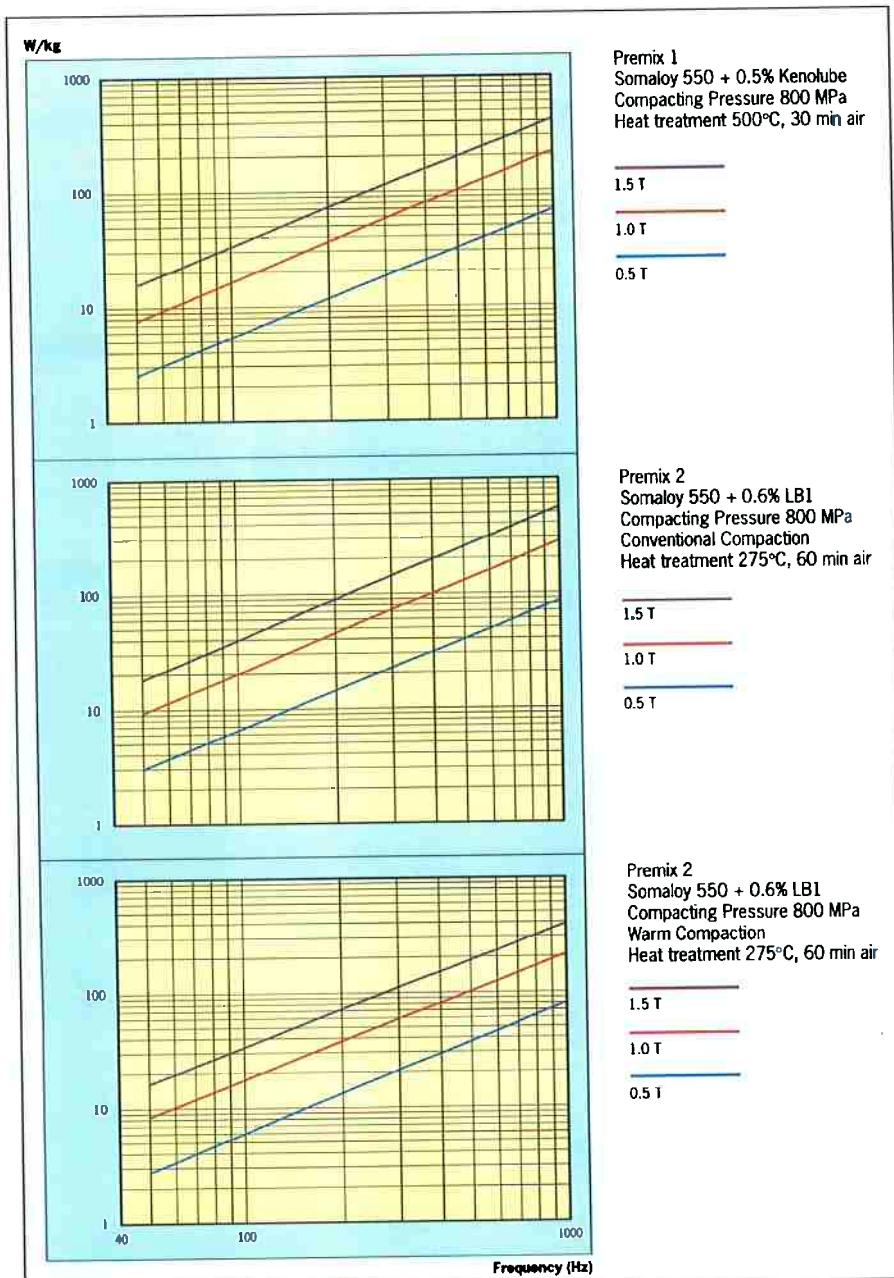


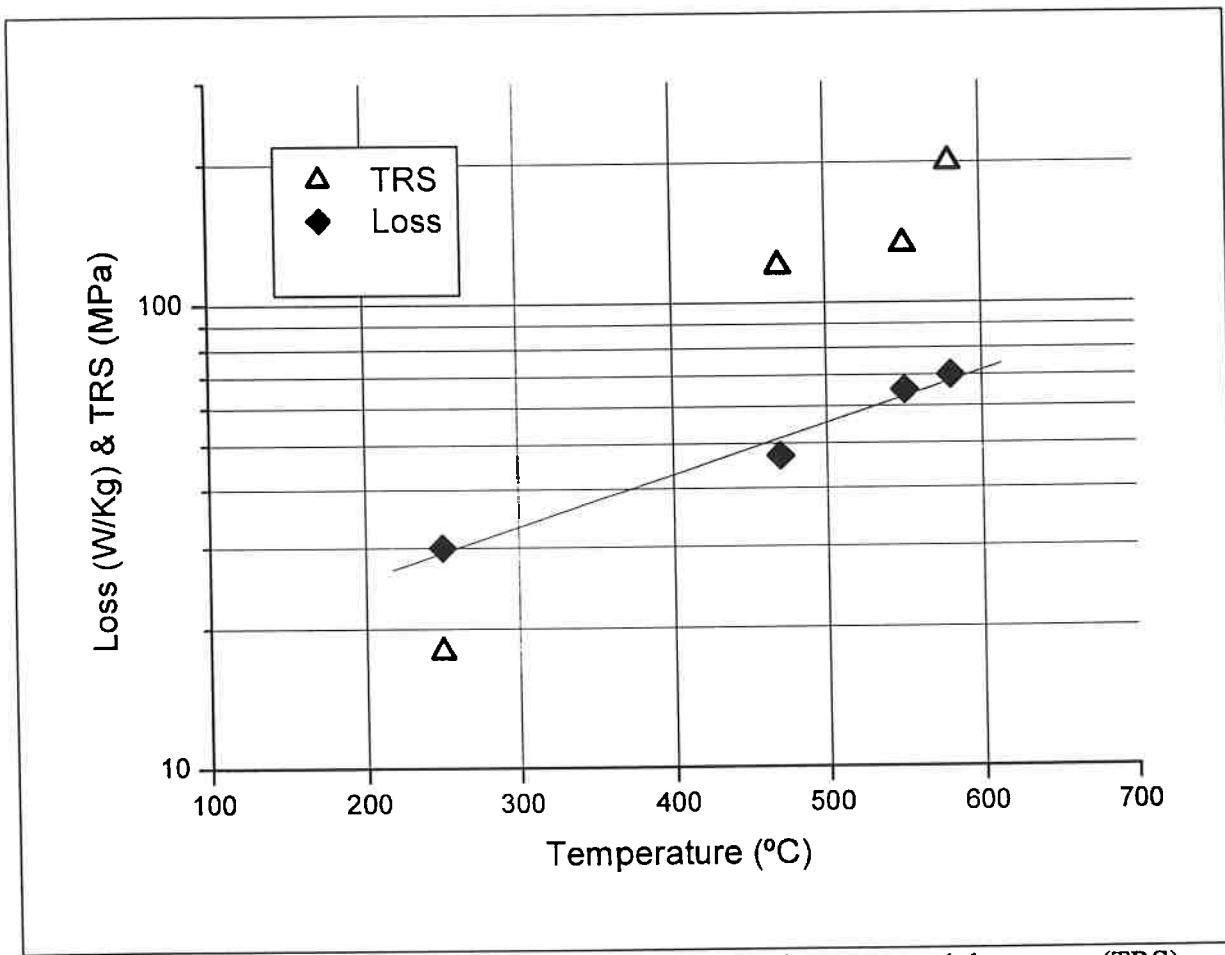
Figura 2.10: Desempenho de aglomerantes em relação às perdas magnéticas totais em função da freqüência<sup>8</sup>.

Pode-se observar que o melhor aglomerante utilizado é o Kenolube, pois permite tratamento térmico a temperatura mais elevada sem perder o isolamento elétrico.

### 2.3.4 Efeito do tratamento térmico nas perdas magnéticas totais e na resistência mecânica do compactado:

Foi analisado o efeito da temperatura de tratamento térmico em pó de ferro microencapsulado (Somaloy 500TM) com 0,5% de Kenolube.

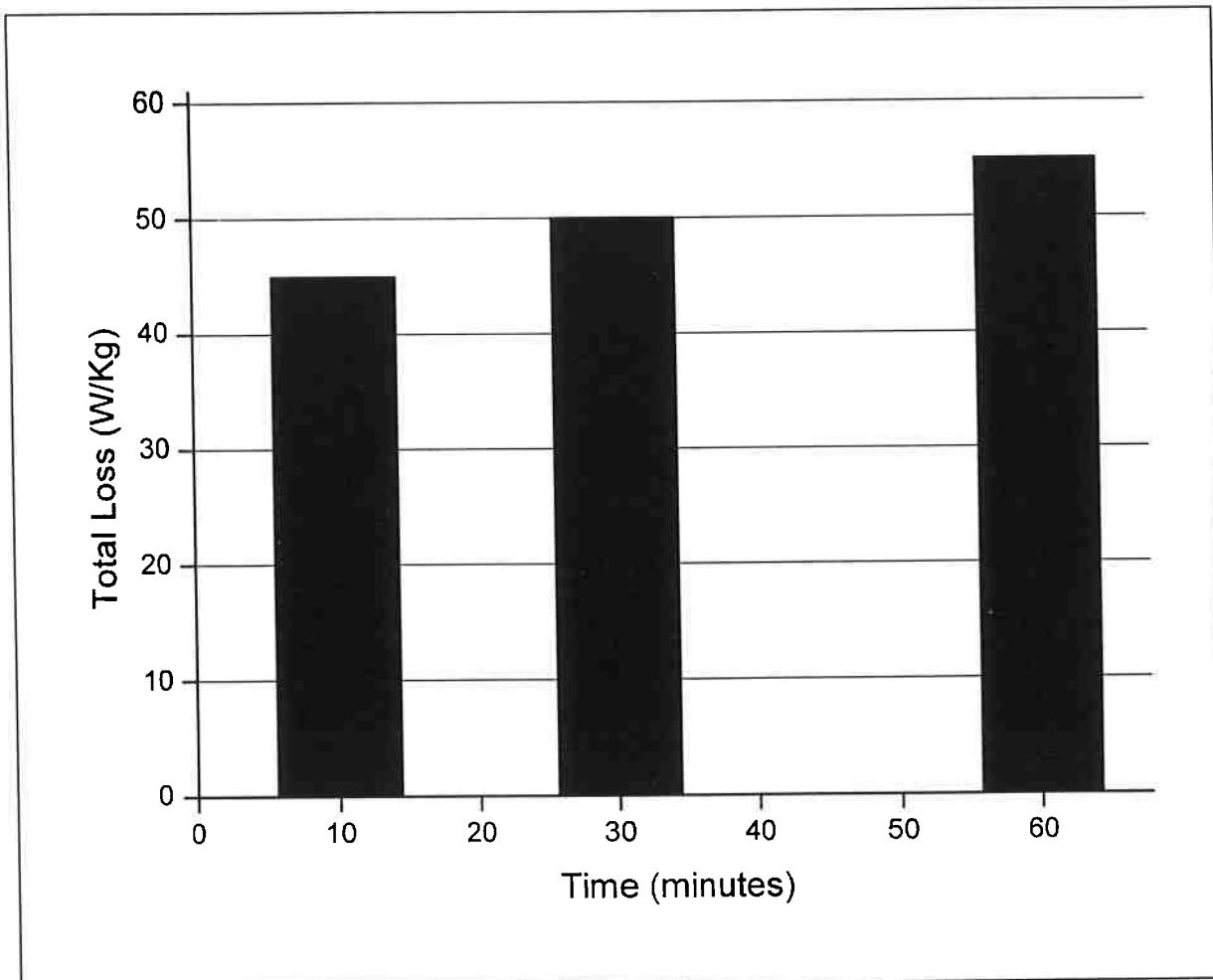
A figura 2.11 apresenta o efeito da temperatura de tratamento nas perdas magnéticas totais a 100Hz e na resistência mecânica.



**Figura 2.11:** Perdas magnéticas totais a 100Hz e resistência transversal de ruptura (TRS) em função da temperatura de tratamento para o Somaloy 500 com 0,5% de Kenolube<sup>7</sup>.

Observa-se que tanto as perdas magnéticas quanto a resistência mecânica do compactado elevam-se com o aumento da temperatura. O aumento da resistência mecânica deve-se à cura do aglomerante. A elevação das perdas deve-se a degradação do revestimento isolante.

A figura 2.12 apresenta o comportamento das perdas magnéticas totais a 100Hz em função do tempo de tratamento térmico a 475°C.



**Figura 2.12:** Efeito do tempo de tratamento térmico a 475°C em pó de ferro

microencapsulado (Somaloy 500 com 0,5% de Kenolube) nas perdas magnéticas totais a 100Hz<sup>7</sup>.

O gráfico mostra o aumento das perdas magnéticas totais com o decorrer do tempo, indicando que ocorre perda de resistividade elétrica devido à degradação do revestimento isolante.

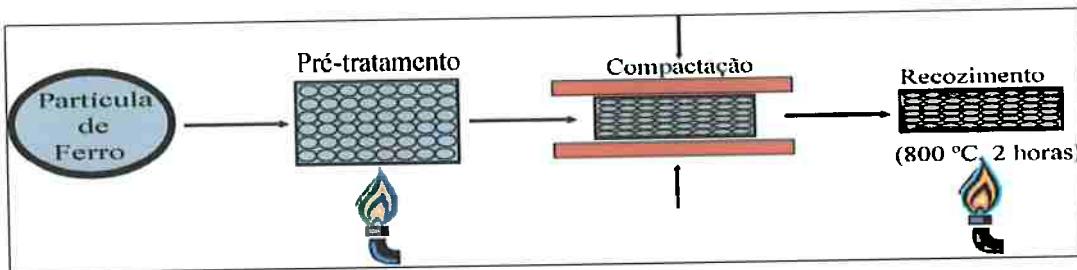
### **3. Efeito do tratamento térmico de recozimento nas perdas magnéticas histeréticas:**

O objetivo desta etapa é estudar o comportamento das perdas magnéticas histeréticas após tratamento térmico de recozimento em pó de ferro microencapsulado. Foram realizados recozimentos em duas etapas distintas: antes e após a compactação do pó de ferro. O primeiro recozimento visa o crescimento dos grãos. O recozimento após a compactação visa minimizar a presença de defeitos microestruturais. Tanto o crescimento de grãos quanto a recuperação microestrutural são importantes para a redução das perdas histeréticas. Realizaram-se análises de perdas histeréticas em amostras antes e depois dos recozimentos.

#### **3.1 Procedimento Experimental:**

Para a fabricação das amostras foi utilizado pó de ferro atomizado, fornecido pela Höganäs AB, classificado granulometricamente (partículas entre 100 e 200 µm).

Foram testadas duas estratégias distintas de tratamento térmico. A primeira, denominada pré-tratamento foi realizada no pó de ferro antes da compactação. O objetivo do pré-tratamento era de aumentar o tamanho dos grãos, reduzindo-se assim as perdas por histerese magnética. A segunda estratégia, denominada recozimento, foi realizada após a compactação do pó de ferro. O objetivo do recozimento era de reduzir a densidade de discordâncias e defeitos microestruturais, reduzindo-se também as perdas histeréticas. O fluxograma do procedimento experimental está ilustrado na figura 3.1.



**Figura 3.1:** Procedimento experimental.

### 3.1.1 Pré-tratamento:

O pré-tratamento foi realizado a temperaturas de 700 e 800°C por 2 horas, em forno com atmosfera controlada de nitrogênio.

### 3.1.2 Compactação:

A compactação do pó de ferro foi realizada em prensa hidráulica a 100 e 900 MPa. O objetivo da compactação a 100 MPa foi de minimizar a deformação plástica das partículas de ferro e com isso reduzir o efeito das discordâncias e defeitos microestruturais nas perdas histeréticas. Neste caso foi necessário o uso de aglomerante para aumentar a resistência a verde do compactado. Para 900 MPa não foi necessário o uso de aglomerante, pois o compactado apresentou resistência a verde suficiente para manipulação.

### 3.1.3 Recozimento:

O recozimento foi realizado após deformação plástica provocada pela compactação, para reduzir tensões por meio de recristalização. Os defeitos gerados pela deformação são prejudiciais às propriedades magnéticas do ferro. O tratamento foi feito a 800 °C por 2 horas em forno com atmosfera controlada de nitrogênio.

### 3.1.4 Medidas de Perdas Histeréticas:

Os valores das perdas histeréticas foram determinados em toróides de pó de ferro compactado. Ao redor dos toróides foram enroladas duas bobinas (primária e secundária). A bobina primária é responsável pelo campo magnético aplicado ( $H$ ) e a secundária, responsável pela detecção da tensão induzida pela amostra. A figura 3.1.2 representa esquematicamente as amostras utilizadas na determinação das perdas histeréticas.

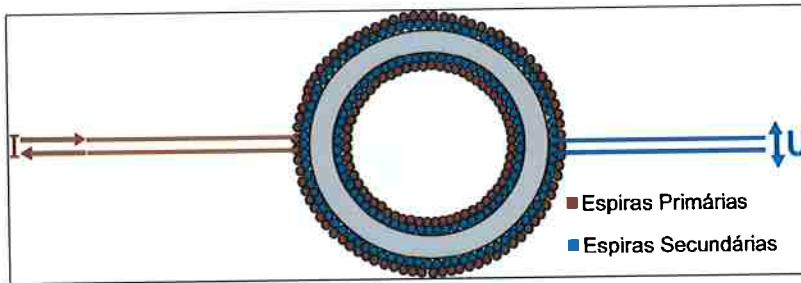


Figura 3.1.2: Representação esquemática de amostra utilizada na medida de perdas magnéticas.

O valor das perdas totais do sistema foi determinado a partir da área da curva de histerese obtida nas análises de perdas magnéticas. Quando a freqüência é baixa (5mHz), pode-se dizer que as perdas parasitas e anômalas são desprezíveis, restando somente as perdas por histerese. À medida que ocorre aumento da freqüência, as perdas parasitas e anômalas deixam de ser desprezíveis e as perdas histeréticas permanecem constantes, portanto adotou-se freqüência de 5 mHz.

### 3.1.5 Amostras Produzidas:

Para avaliar a influência da deformação plástica e dos tratamentos térmicos nas perdas histeréticas, foram preparadas 8 amostras. Os processos de produção das amostras estão apresentados na figura 6.

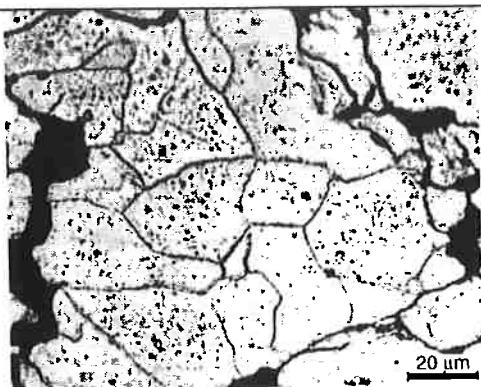
**Tabela 3.1:** Amostras produzidas

Amostra	Pré-Tratamento	Pressão de Compactação	Recozimento
1	---	100 MPa	---
2	---	900 MPa	---
3	700°C, 2 horas	100 MPa	---
4	800°C, 2 horas	100 MPa	---
5	700°C, 2 horas	900 MPa	---
6	800°C, 2 horas	900 MPa	---
7	700°C, 2 horas	900 MPa	800°C, 2horas
8	800°C, 2 horas	900 MPa	800°C, 2horas

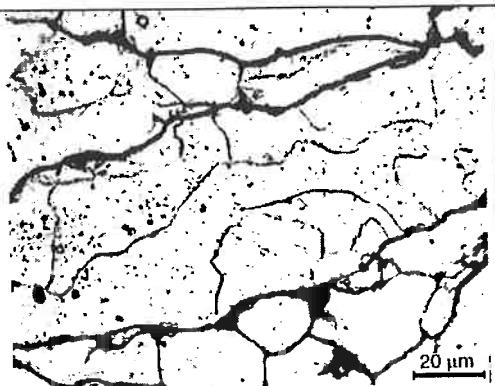
### **3.2 Resultados Obtidos:**

#### **3.2.1 Análise Microestrutural:**

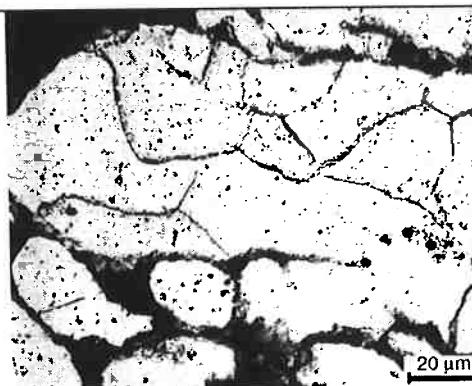
A análise microestrutural foi feita em microscópio óptico. As imagens obtidas estão expressas nas imagens a seguir.



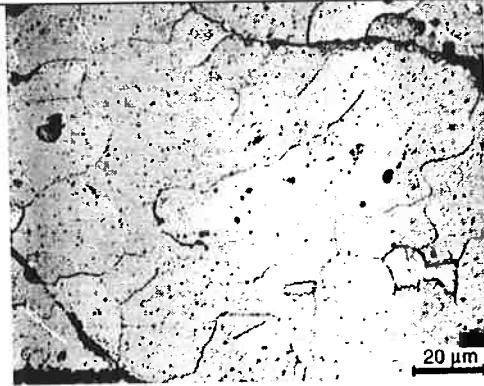
**Figura 3.2:** Imagem da amostra 2 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.



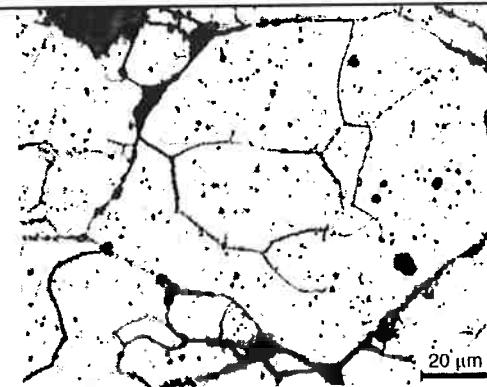
**Figura 3.3:** Imagem da amostra 5 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.



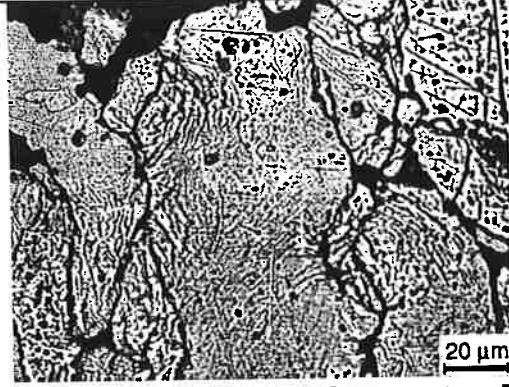
**Figura 3.4:** Imagem da amostra 6 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.



**Figura 3.5:** Imagem da amostra 7 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.



**Figura 3.6:** Imagem da amostra 8 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.



**Figura 3.7:** Imagem da amostra 5 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar bandas de cisalhamento intragrangular.

A análise microestrutural permitiu concluir que o tamanho médio de grãos antes de qualquer tratamento é de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ , como se pode observar na figura 3.2. Após os pré-

tratamentos a 700 e 800°C (ver figuras 3.3 e 3.4), não houve aumento do tamanho de grão. Para as amostras sem recocimento é possível observar bandas de cisalhamento intragranular (ver figura 3.7), indicando que o material está encruado. Após o recocimento a 800° C, também não houve aumento do tamanho de grão nem por recristalização nem por crescimento de grão, como mostram as figuras 3.5 e 3.6. Não foram mais observadas bandas de cisalhamento intragranular, indicando que houve alívio de tensões e redução da densidade de defeitos microestruturais após o recocimento.

### 3.2.2 Análise de Perdas Histeréticas:

Foram medidas as energias dissipadas a 5 mHz de freqüência e a 0,5 T de indução máxima. A partir desses resultados calcularam-se o valor das perdas histeréticas a 60 Hz. Os resultados estão apresentados na tabela 2.2

**Tabela 2.2:** Perdas histeréticas.

Amostra	Pré-Tratamento	Pressão de Compactação	Recozimento	Perdas Histeréticas 60 Hz, 0,5T(W/Kg)
1	---	100 MPa	---	3,95
2	---	900 MPa	---	3,13
3	700°C, 2 horas	100 MPa	---	3,80
4	800°C, 2 horas	100 MPa	---	3,79
5	700°C, 2 horas	900 MPa	---	3,35
6	800°C, 2 horas	900 MPa	---	3,32
7	700°C, 2 horas	900 MPa	800°C, 2horas	2,12
8	800°C, 2 horas	900 MPa	800°C, 2horas	2,06

Foram obtidas perdas histeréticas elevadas para as amostras 1, 3 e 4, compactadas a 100

MPa, contrariando a expectativa, pois utilizando-se pressões inferiores (abaixo do limite de elasticidade de ferro), a deformação das partículas é minimizada, pouco interferindo na microestrutura do material. Aumentando-se a pressão de compactação para 900 MPa, a deformação das partículas foi mais intensa, porém as perdas histeréticas reduziram aproximadamente 20% (amostra 2, 5 e 6). Hipóteses preliminares indicam que a presença de porosidade (aproximadamente 40% para

amostras 1, 3, 4 e 10% para as demais) pode dificultar a movimentação de paredes de domínio, aumentando as perdas histeréticas. Um gradiente de densidades na espessura do compactado também pode estar interferindo nas medidas magnéticas, pois o fluxo magnético é heterogêneo na amostra de pó de ferro.

Os pré-tratamentos a 700 e 800°C não foram eficientes para a redução das perdas histeréticas do material, como era esperado devido ao não crescimento dos grãos. O resultado pode ser observado nas análises das amostras 3 a 6. O recozimento a 800°C (amostras 7 e 8) foi eficiente, reduzindo aproximadamente 36% as perdas histeréticas em relação ao material sem recozimento (amostras 5 e 6), indicando que houve redução da densidade de discordâncias e defeitos microestruturais. Embora tenha havido redução das perdas histeréticas, elas ainda são mais altas em relação aos aços elétricos de grão não orientado, que apresentam perdas histeréticas próximas a 0,2 W/Kg (0,5T e 60 Hz).

### **3.3. Conclusões:**

- O pré-tratamento do pó de ferro a 700 e 800 °C não proporcionou crescimento dos grãos do material e não foi eficiente para a redução das perdas por histerese magnética;
- O recozimento a 800 °C realizado nas amostras após a compactação a 900 MPa não proporcionou aumento do tamanho de grãos do material, porém foi responsável pela redução de 36% nas perdas histeréticas;
- As amostras compactadas a 900 MPa apresentaram perdas histeréticas aproximadamente 20% inferiores às amostras compactadas a 100 MPa, contrariando o resultado esperado;
- As perdas histeréticas medidas nas amostras preparadas são aproximadamente 10 vezes maiores do que em um aço elétrico de grão não orientado.

#### **4. Efeito do revestimento isolante nas perdas magnéticas:**

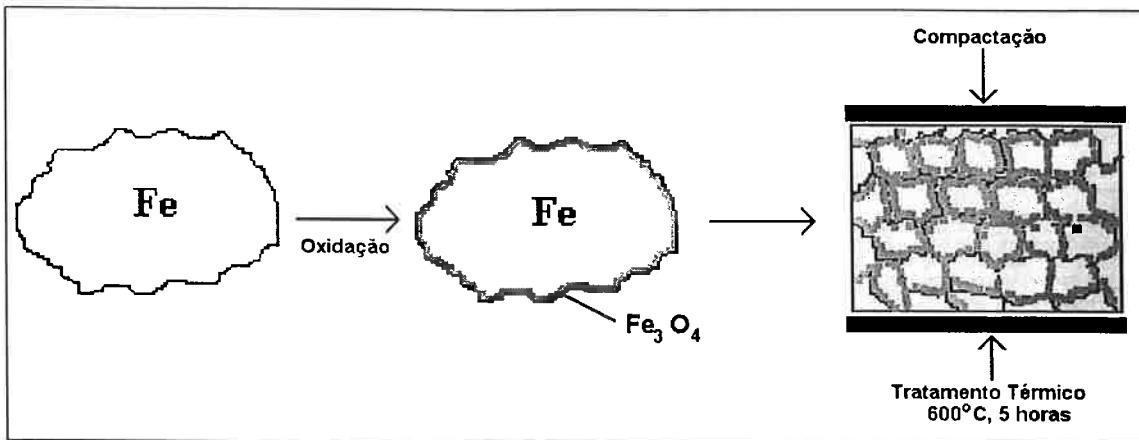
Esta etapa do trabalho visa testar duas estratégias de revestimento isolante: uma à base de magnetita e outra à base de partículas nanométricas de sílica. O comportamento das perdas magnéticas das amostras produzidas foram comparadas com um pó de ferro microencapsulado comercial (SomaloyTM 550), fornecido pela Höganäs AB.

##### **4.1. Procedimento Experimental:**

Foram testadas duas estratégias distintas de revestimento elétrico. A primeira (amostra 1), baseia-se na formação de uma camada isolante de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  na superfície das partículas de ferro produzidas por atomização. A segunda (amostra 2), baseia-se no isolamento a partir da mesma camada isolante de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , com uma camada adicional de partículas nanométricas de sílica. A seguir estão descritos os procedimentos detalhados de cada estratégia de revestimento.

###### **4.1.1 Amostra 1:**

A amostra 1 foi obtida a partir de pó de ferro, oxidado superficialmente em forno com atmosfera controlada de  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . O procedimento está esquematizado na figura 4.1



**Figura 4.1:** Procedimento experimental.

#### 4.1.1.1 Revestimento Elétrico:

O revestimento foi obtido pela oxidação superficial das partículas a partir de tratamento térmico em forno elétrico, sob atmosfera controlada de  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_2\text{O}$ . O objetivo é obter uma camada de magnetita como revestimento elétrico. Como a magnetita é aderente ao ferro metálico, espera-se boa capacidade de isolamento entre as partículas.

#### 4.1.1.2 Compactação:

A compactação do pó de ferro revestido foi realizada em prensa hidráulica a 900 Mpa.

#### 4.1.1.3 Tratamento térmico de recuperação:

O tratamento térmico de recuperação foi realizado para reduzir tensões após deformação plástica durante a compactação. Os defeitos gerados pela deformação são prejudiciais às propriedades magnéticas do ferro.

O tratamento foi realizado em forno tubular sob vácuo. As amostras tratadas neste trabalho foram submetidas a temperatura de 600 °C por 5 horas.

#### **4.1.1.4 Medidas de Perdas Magnéticas:**

As análises de perdas magnéticas foram determinadas em anéis de pó de ferro compactado. Ao redor dos anéis foram enroladas duas bobinas (primária e secundária). A bobina primária é responsável pelo campo magnético aplicado ( $H$ ) e a secundária, responsável pela detecção da tensão induzida pela amostra.

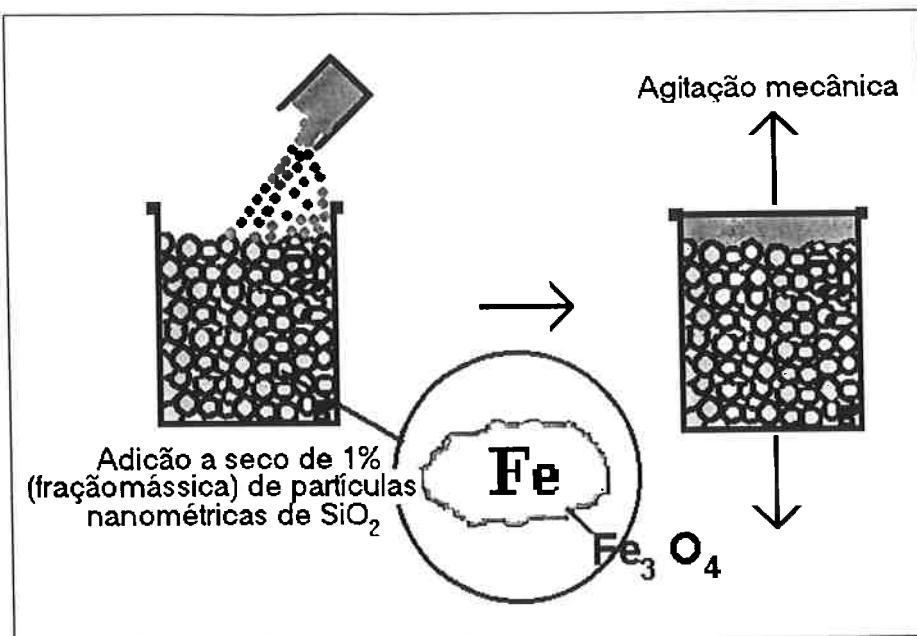
O valor das perdas totais do sistema foi determinado a partir da área da curva de histerese obtida nas análises de perdas magnéticas. Quando a freqüência é baixa (5mHz), pode-se dizer que as perdas parasitas e anômalas são desprezíveis, restando somente as perdas por histerese. À medida que ocorre aumento da freqüência, as perdas parasitas e anômalas deixam de ser desprezíveis e as perdas histeréticas permanecem constantes.

#### **4.1.1.5 Medidas de Resistividade Elétrica:**

A resistividade elétrica foi calculada a partir da resistência elétrica do material, que por sua vez, foi obtida através de um Ohmímetro convencional. Esse tipo de equipamento mede a resistência elétrica submetendo-se um corpo de prova a uma corrente elétrica e medindo-se o potencial. A partir da lei de Ohm, obtém-se a resistência elétrica.

#### **4.1.2 Amostra 2:**

A amostra 2 sofreu o mesmo processo da amostra 1, incluindo-se uma etapa de revestimento com partículas nanométricas de sílica (5nm), após a oxidação superficial do pó de ferro. Após o revestimento, as partículas sofreram compactação e tratamento térmico nas mesmas condições da amostra 1. A figura 4.2 representa a etapa de revestimento com  $\text{SiO}_2$ .



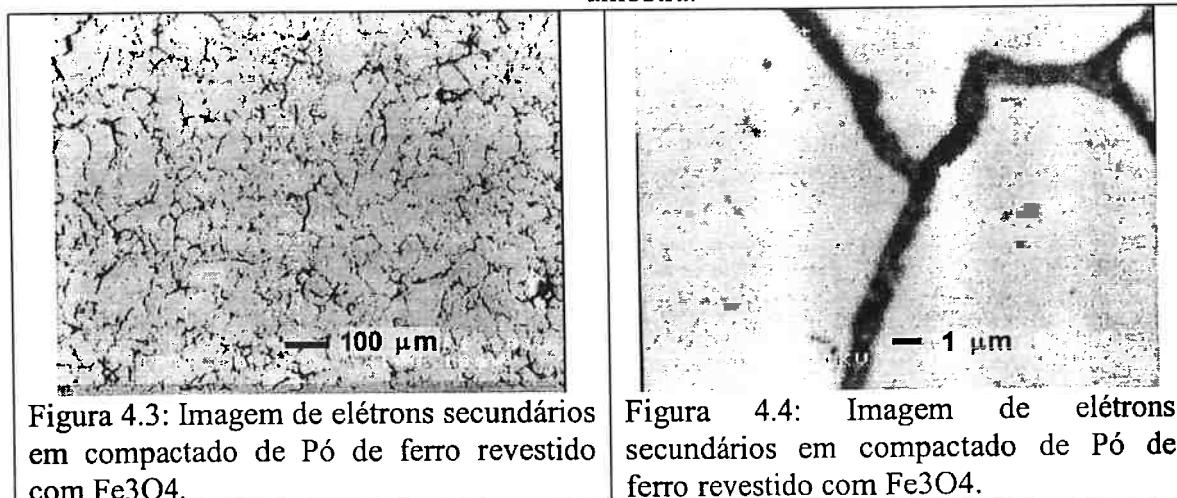
**Figura 4.2:** Revestimento com  $\text{SiO}_2$ .

#### 4.2. Resultados Obtidos:

##### 4.2.1 Análise Microestrutural:

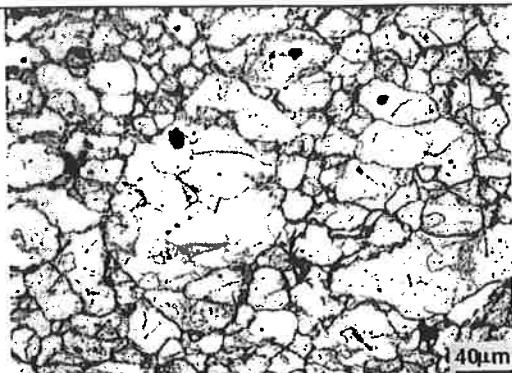
###### Amostra 1:

A microestrutura da amostra 1, foi analisada a partir de imagens obtidas em microscópio eletrônico de varredura. As figuras 4.3 a 4.6 apresentam as imagens da seção transversal dessa amostra.

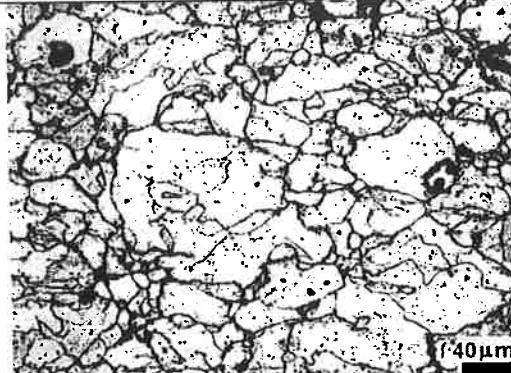


**Figura 4.3:** Imagem de elétrons secundários em compactado de Pó de ferro revestido com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .

**Figura 4.4:** Imagem de elétrons secundários em compactado de Pó de ferro revestido com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ .



**Figura 4.5:** Microscopia óptica de compactado (encruado) de Pó de ferro revestido com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A amostra sofreu ataque químico com Nital 5%, revelando-se contornos de grão.



**Figura 4.6:** Microscopia óptica de compactado (recozido) de Pó de ferro revestido com  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . A amostra sofreu ataque químico com Nital 5%, revelando-se contornos de grão.

#### Amostra 2:

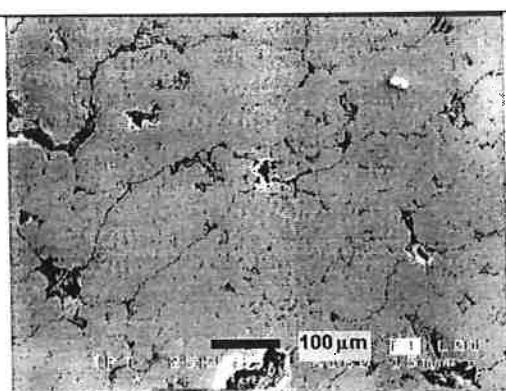
A microestrutura da amostra 2 foi semelhante à amostra 1, pois não foi possível detectar

as partículas nanométricas de sílica.

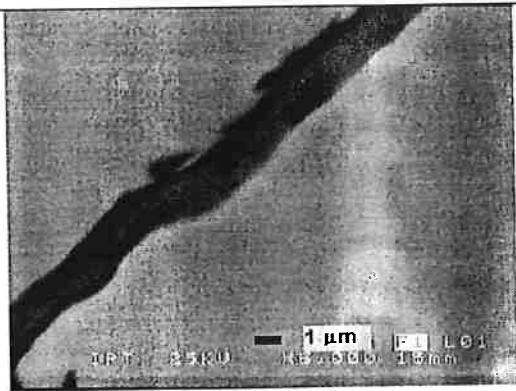
#### Somaloy 550<sup>TM</sup>:

Para se comparar os resultados obtidos para as amostras 1 e 2, analisou-se um anel de pó de ferro microencapsulado comercial (Somaloy 550), fornecido pela Höganäs AB . O corpo de prova foi compactado e recuperado termicamente segundo sugestões da própria Höganäs AB.

As figuras 4.7 e 4.8 são imagens da seção transversal desse anel.



**Figura 4.7:** Imagem de elétrons secundários em anel de Somaloy 550<sup>TM</sup>



**Figura 4.8:** Imagem de elétrons secundários em anel de Somaloy 550<sup>TM</sup>.

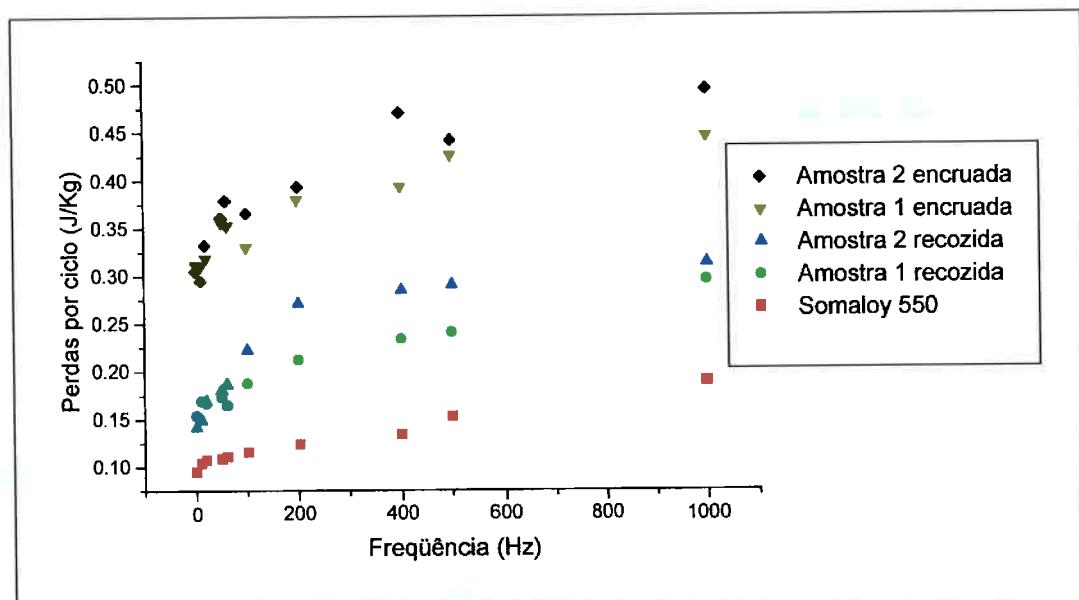
A partir das microestruturas foi possível concluir que as amostras produzidas em laboratório apresentaram tamanho de partícula inferior ao material comercial. Quanto a camada isolante, ambos os materiais apresentaram espessura de aproximadamente 1  $\mu\text{m}$ . O tamanho de grão, tanto do material comercial quanto do material experimental, é de aproximadamente 10  $\mu\text{m}$ .

#### **4.2.2 Análise de Perdas Magnéticas:**

Foram analisadas perdas magnéticas em função da freqüência (5 mHz a 1000 Hz).

Após a análise de perdas magnéticas, foi realizado tratamento térmico de recuperação (600 °C por 5 horas) nas amostras 1 e 2, e posteriormente, analisaram-se novamente as perdas magnéticas.

Os resultados das análises de perdas magnéticas estão apresentados na figura 4.9.



**Figura 4.9:** Representação gráfica das perdas magnéticas entre as amostras analisadas.

Observa-se que houve redução das perdas histeréticas do material após o tratamento térmico, indicando que houve boa recuperação microestrutural.

Os materiais produzidos em laboratório apresentaram perdas superiores ao material comercial, tanto em relação a perdas histeréticas (conforme nota-se na extração das perdas magnéticas para freqüência zero) quanto em relação a perdas parasitas (conforme a inclinação da curva de perdas magnéticas em função da freqüência).

O revestimento isolante com sílica não apresentou melhoria do comportamento das perdas com a freqüência, indicando que o isolamento elétrico proporcionado pelas partículas nanométricas de sílica não foi efetivo, apesar dos valores mais altos de resistividade elétrica.

Foram medidas as resistividades elétricas das amostras para calcular o valor das perdas parasitas e realizar a separação das perdas magnéticas. Os resultados encontram-se na tabela 4.1.

**Tabela 4.1:** Valores de resistividade elétrica das amostras analisadas.

Material	Resistividade ( $\mu\Omega \cdot m$ )
Amostra 1 encruada	42
Amostra 1 recozida	3
Amostra 2 encruada	473
Amostra 2 recozida	21
Somaloy <sup>TM</sup> 550	100 <sup>8</sup>
Fe - Si GNO	0.5

Observa-se que ocorre redução da resistividade elétrica das amostras, após o tratamento térmico. Isso pode ser explicado pela degradação da camada isolante após o aquecimento sob vácuo. Quanto a medida de resistividade elétrica do material comercial, Somaloy<sup>TM</sup> 550, adotou-se valor encontrado na literatura<sup>8</sup>.

A partir das resistividades obtidas foram calculados os valores das perdas por corrente parasita através da equação:

$$P_p = \frac{(\pi \cdot B \cdot f \cdot e)^2}{6 \cdot d \cdot \rho}$$

Onde:

$P_p$  = perdas por corrente parasitas;

B = máxima indução;

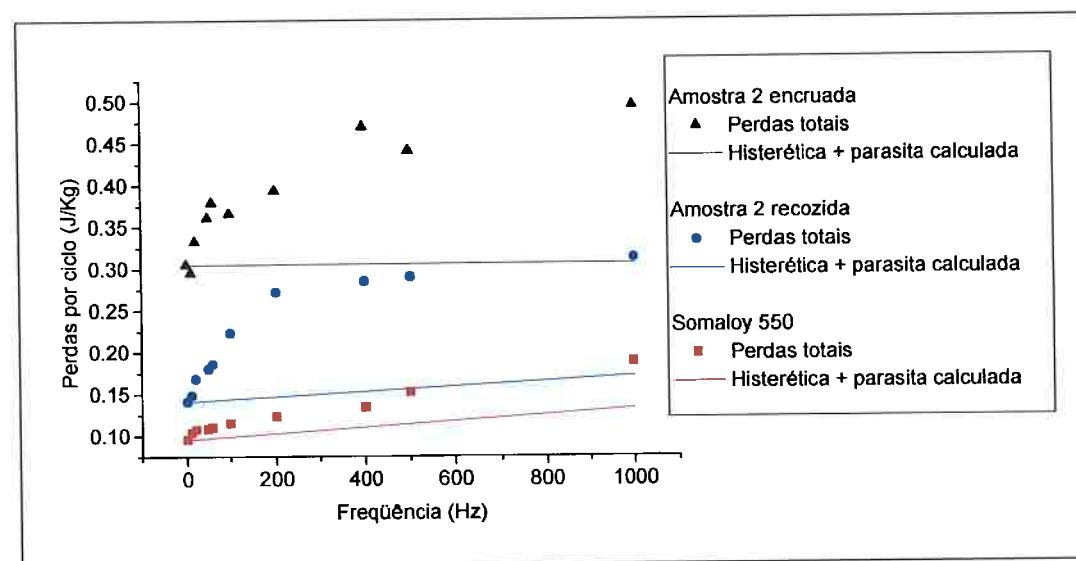
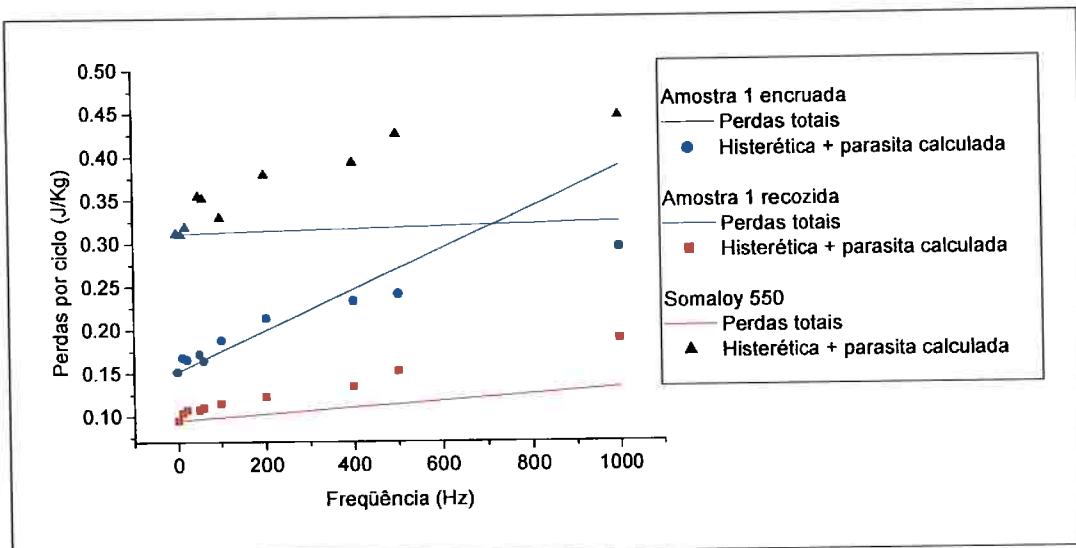
f = freqüência;

e = espessura do anel;

d = densidade do anel;

$\rho$  = resistividade do anel.

Para analisar os valores das perdas parasitas calculadas, foram construídos gráficos apresentando os valores perdas totais, obtidos a partir das análises magnéticas, e as curvas das perdas parasitas calculadas, somadas às perdas histeréticas. A diferença entre esses dois valores representa as perdas de excesso.



A figura 4.10 permite concluir que a resistividade da amostra 1 após o tratamento térmico foi subestimada, pois as perdas parasitas calculadas a partir da equação, adicionadas às perdas histeréticas superaram o valor das perdas totais da mesma amostra, a partir de 200 Hz. Sendo assim, as perdas de excesso seriam negativas. Portanto é provável que a técnica

convencional de determinação de resistividade não é indicada para o material microencapsulado.

A técnica utilizada para calcular a resistividade do anel de Somaloy<sup>TM</sup> 550 mostrou-se mais coerente, pois o comportamento das perdas parasitas acompanhou melhor o crescimento das perdas totais em função da freqüência.

#### **4.3 Conclusões:**

O tratamento térmico de recozimento apresentou como principais efeitos:

- Redução em aproximadamente 50% das perdas histeréticas;
- Redução da resistividade elétrica em aproximadamente 95%;
- O comportamento das perdas parasitas adicionadas às perdas anômalas permaneceu inalterado.

A redução das perdas histeréticas indica que houve boa recuperação microestrutural do material. A redução da resistividade elétrica pode ser relacionada a degradação do revestimento óxido entre as partículas, porém a preservação das perdas parasitas somadas às perdas anômalas não confirmam tal resultado.

- A técnica convencional de cálculo de resistividade não é indicada para o material microencapsulado;
- As amostras 1 e 2, desenvolvidas em laboratório apresentaram perdas histeréticas superiores ao material comercial;
- O comportamento das perdas magnéticas totais em função da freqüência indica que o material comercial apresenta melhores propriedades em relação às amostras produzidas em laboratório.

## 5. Referências bibliográficas

- (1) Höganäs AB - The Lastest Developments in Soft Magnetic Composite Technology – “Update”, 1999, pg 2
- (2) CULLITY, B. D. Soft Magnetic Materials. Electrical Steel, pg. 495 a pg 525 1972
- (3) Santos, C. P – Texturas de Deformação e Recristalização e Propriedades Magnéticas em Aço Silício de Grão não Orientado 3,20%Si – Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo, 2000, 160p a 185p.
- (4) Höganäs AB - The Lastest Developments in Soft Magnetic Composite Technology, 1997, pg 3.
- (5) Jansson, Patricia - Höganäs AB - SMC a Rapidly Expanding Materials Group, 1999, pg 2.
- (6) Jansson, Patricia - Höganäs AB, Advances in SMC Based in Iron Powder, 1998, pg3.
- (7) Höganäs AB - Soft Magnetic Composites from Höganäs Metal Powder – Somaloy 500, 1999, pg 3.
- (8) Höganäs AB - Soft Magnetic Composites from Höganäs Metal Powder – Somaloy 550, 1999, pg 2.