

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

N. A. Castro¹, D. Rodrigues², F. J. G. Landgraf², T. Yonamine², M.L. Henrique¹
Av. Prof. Almeida Prado, 532, Cidade Universitária, São Paulo/SP, CEP 05508-901
nicolau@ipt.br

¹Estagiário do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do ESP – Divisão de Metalurgia

²Pesquisador do IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do ESP - Divisão de Metalurgia

Resumo:

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.

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

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 representa esquematicamente partículas de ferro microencapsuladas.

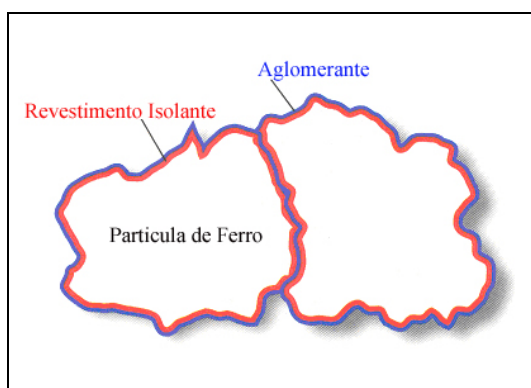


Figura 1: Desenho esquemático de um pó de ferro microencapsulado¹.

Os pós de ferro microencapsulados foram desenvolvidos para fabricação de núcleos de motores elétricos (figura 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.

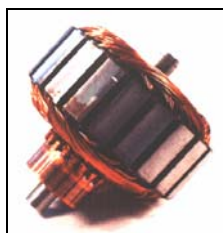


Figura 2: Núcleo de motor elétrico produzido por pó de ferro microencapsulado¹

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:

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

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

A figura 3 ilustra a separação das perdas magnéticas em um material ferromagnético.

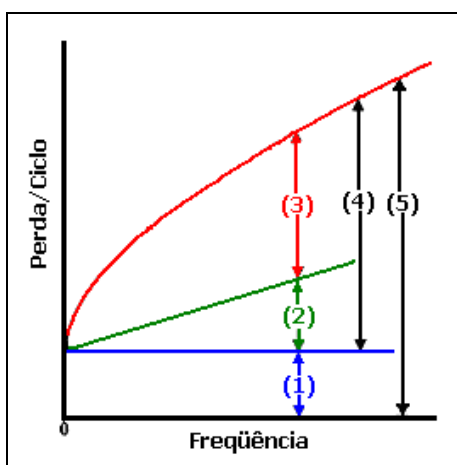


Figura 3: separação de perdas magnéticas².

Onde:

- 1 – Perda por histerese;
- 2 – Perda por corrente parasita;
- 3 – Perda anômala;
- 5 – Perda por corrente parasita aparente (2+3);
- 4 – Perda total (1+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 frequência do campo magnetizante, resultando em maiores perdas, quanto maior for a frequência 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 frequência, altas frequências favorecem os materiais microencapsulados, em termos de perdas magnéticas totais. A figura 4 representa o comportamento das perdas magnéticas com a frequência.

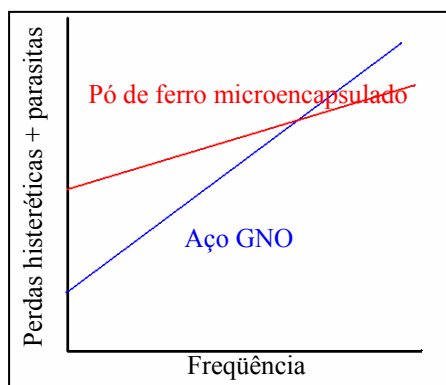


Figura 4: Comportamento dos materiais em função da frequência.

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 anômalas, são definidas como a diferença entre as perdas totais e a soma das perdas histeréticas e parasitas.

2. 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 5.

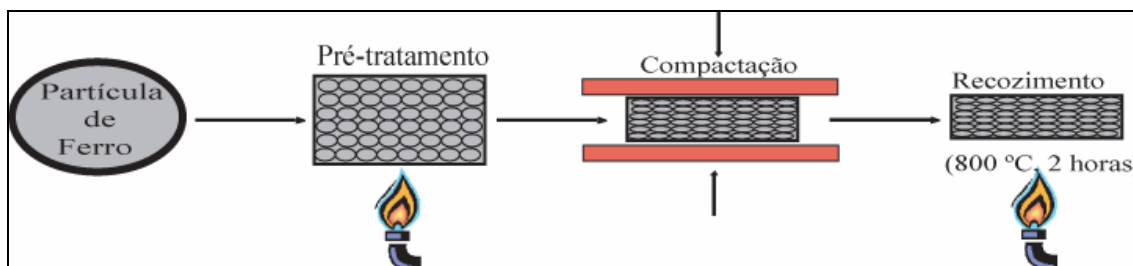


Figura 5: Procedimento experimental.

2.1 Pré-tratamento:

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

2.2 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.

2.3 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.

2.4 Medidas de Perdas Histeréticas:

Os valores das perdas histeréticas foram determinados 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 frequência 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 frequência, as perdas parasitas e anômalas deixam de ser desprezíveis e as perdas histeréticas permanecem constantes, portanto adotou-se frequência de 5 mHz.

2.5 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 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. Resultados Obtidos:

3.1 Análise Microestrutural:

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

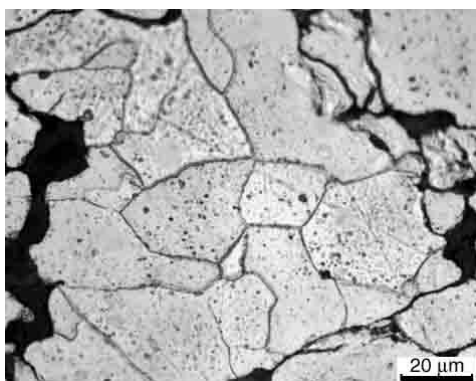


Figura 6: Imagem da amostra 2 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.

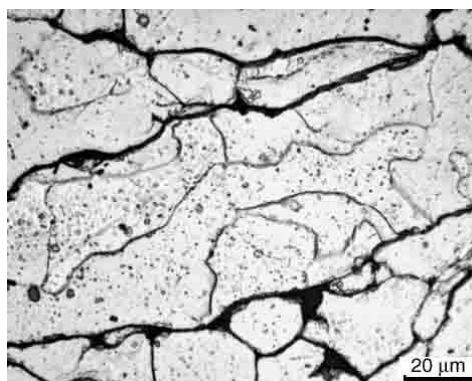


Figura 7: Imagem da amostra 5 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.

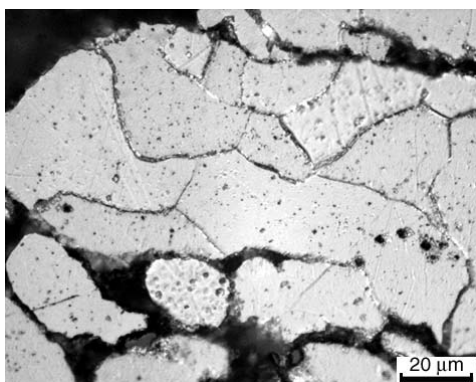


Figura 8: Imagem da amostra 6 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.

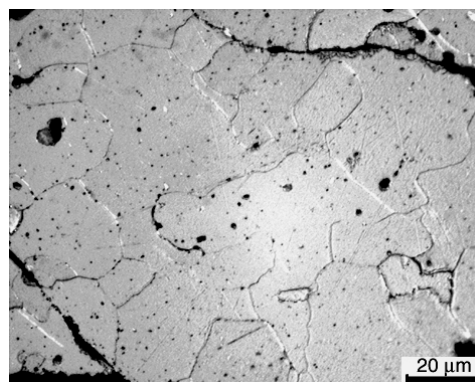


Figura 9: Imagem da amostra 7 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.

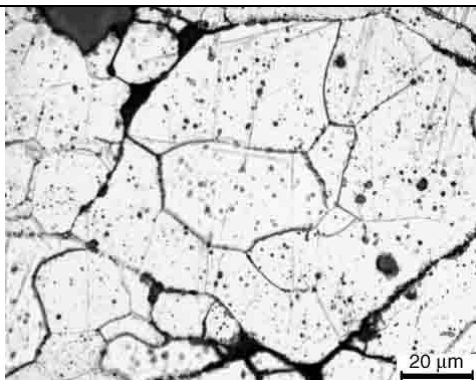


Figura 10: Imagem da amostra 8 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar contornos de grão.

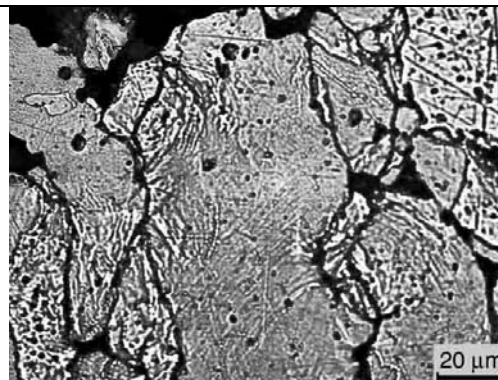


Figura 11: Imagem da amostra 5 analisada em microscópio óptico. Ataque químico com nital 4% para revelar bandas de cisalhamento intragranular.

A análise microestrutural permitiu concluir que o tamanho médio de grãos antes de qualquer tratamento é de aproximadamente 20 μm , como se pode observar na figura 6. Após os pré-tratamentos a 700 e 800°C (ver figuras 7 e 8), não houve aumento do tamanho de grão. Para as amostras sem recozimento é possível observar bandas de cisalhamento intragranular (ver figura 11), indicando que o material está encruado. Após o recozimento a 800° C, também não houve aumento

do tamanho de grão nem por recristalização nem por crescimento de grão, como mostram as figuras 9 e 10. Não foram mais observadas bandas de cisalhamento intragranular, indicando que houve alívio de tensões e redução da densidade de defeitos microestruturais após o recozimento.

3.2 Análise de Perdas Histeréticas:

Foram medidas as energias dissipadas a 5 mHz de frequência 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

Tabela 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).

4. 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.

Referências bibliográficas

- (1) Mats Persson, *SMC Update, Vol1. No. 1, April 1997.*
- (2) CULLITY, B. D. Soft Magnetic Materials. **Electrical Steel, p. 495-525** 1972
- (3) Höganäs AB, Soft Magnetic Composites from Höganäs Metal Powder, 1999.

Abstract:

The 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 microestrutural defects. The increase of the grain size and the reduction of the microestrutural defects are very important to decrease the hysteretic loss. Magnetic losses were measured in as-pressed and in annealed samples.