

# Aplicação da metalurgia do pó em motores elétricos

Moisés de Mattos Dias<sup>1</sup>, Lirio Schaeffer<sup>2</sup>, Arão de Matos Dias<sup>3</sup>, José Lesina César<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Dr. Eng. Prof. Dpto. Eng. Eletrônica - ICET- Feevale - e-mail: moisesdias@feevale.br; <sup>2</sup> Dr. Ing. Prof. DEMET - UFRGS; <sup>3</sup> Dr. Eng. Prof. Dpto. Eng. Mecânica - ICET- Feevale; <sup>4</sup> Dr. Eng. Prof. Dpto. Eng. Mecânica - ULBRA.

## Resumo

Este trabalho tem por objetivo a aplicação de materiais magnéticos macio sinterizados em núcleos magnéticos do estator e rotor de motores elétricos. Estes materiais, obtidos a partir dos processos da Metalurgia do Pó, possuem como características: alta resistividade elétrica, alta permeabilidade magnética relativa, baixa coercitividade magnética e alta indução de saturação. Os núcleos magnéticos obtidos são maciços e substituem as tradicionais chapas de aço laminado. Esta aplicação é relativamente recente, possuindo raros protótipos citados na literatura. Assim, este estudo relaciona os principais materiais sinterizados utilizados, citando alguns motores já construídos e seu desempenho.

## Palavras-chave

Metalurgia do pó, núcleos magnéticos, motores.

## Abstract

The aim of this work is to verify application of sintered soft magnetic materials in magnetic nuclei of the rotor and stator of electric motors. These materials, obtained starting from powder metallurgy processes, have as characteristics high electric resistivity and high relative magnetic permeability, low magnetic coercivity and high induction of saturation. The magnetic nuclei obtained by PM process are massive, and substitute the traditional sheets of rolled steel. This application is relatively recent and there are not many prototypes cited in the literature. Thus, this study makes a list of the main sintered materials utilized, and some motors built and their performance.

## Key words

Powder metallurgy, magnetic nuclei, motors.

# 1. Introdução

Na sua grande maioria, os núcleos do estator e do rotor dos motores elétricos são construídos com chapas de aço baixo carbono. Alguns motores de maior rendimento são construídos com chapas de aço-silício, com um percentual aproximado de 1 a 3% de silício. O processo total para a confecção destes núcleos consiste basicamente em laminação, corte, um tratamento para isolamento, empacotamento e fixação. Com relação às chapas de aço baixo carbono, o processo para isolamento consiste num tratamento térmico, onde os pacotes de chapas são colocados em fornos durante um certo tempo, havendo então a oxidação da superfície das chapas e, em consequência, a formação de uma camada isolante de óxido de ferro entre as chapas adjacentes [1, 2].

Com relação à construção e aos materiais utilizados, os seguintes fatores determinam o desempenho dos motores elétricos:

- As chapas são construídas a partir de materiais ferromagnéticos (ferro ou aços magnéticos), pois estes são materiais ferromagnéticos de alta permeabilidade magnética. Nos motores elétricos, quanto maior a permeabilidade magnética dos núcleos, menor será o campo magnético nos núcleos, e maior será a intensidade de campo no entreferro. Observa-se que o conjugado eletromagnético (torque) desenvolvido nos motores elétricos é proporcional à densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto, núcleos do estator e do rotor de motores elétricos construídos com materiais de maior permeabilidade magnética resultam em motores com uma melhor performance [1, 2].

- O material magnético dos núcleos dos motores deve possuir elevada indução de saturação, possibilitando então que o motor trabalhe num ponto de fluxo magnético elevado, sempre abaixo do ponto de saturação [1, 2].

- Utiliza-se aço baixo carbono, pois este é um material magnético macio e apresenta baixa coercitividade. A perda por histerese é proporcional à área do ciclo de histerese, que representa matematicamente uma densidade de energia. Portanto, quanto mais estreito o ciclo de histerese, menor a coercitividade e menor a perda por ciclo de histerese [1, 2]. As perdas por histerese  $P_h$  [W/kg] está representada pela equação 01, onde  $f$  é a frequência do campo magnético aplicado [Hz],  $W_{cmp}$  a densidade de energia armazenada no campo, [ $J/m^3$ ] (área do laço de histerese) e  $\rho_m$  a densidade do material dada em  $kg/m^3$  [3].

$$P_h = \frac{fW_{cmp}}{\rho_m} \quad [01]$$

- Sempre que houver a incidência de um fluxo alternado sobre um núcleo magnético, haverá também correntes induzidas (correntes parasitas ou de Foucault) sobre este núcleo. Tanto o estator como o rotor são construídos com chapas laminadas e isoladas, uma vez que esta isolamento entre chapas restringe as correntes induzidas a uma menor área de circulação. As perdas por correntes induzidas ou parasitas em um núcleo maciço são consideravelmente maiores que as perdas em núcleos obtidos a partir de chapas isoladas eletricamente. Quanto menor a espessura das chapas, menor são as correntes parasitas e menor ainda a perda de potência nestes núcleos. A redução das correntes induzidas podem ser obtidas a partir do aumento da resistência elétrica do corpo, ou a partir do aumento da resistividade elétrica do material, uma vez que resistência ou resistividade e corrente elétrica são grandezas físicas inversamente proporcionais. Por este motivo, motores elétricos de alto rendimento são construídos com chapas de aço silício, que possui resistividade elétrica maior que o aço baixo carbono [1, 2, 3]. Devido ao efeito Joule, estas correntes parasitas geram perdas por calor  $P_p$  [W/kg], e está representada na equação 02, onde  $k$  é uma constante de proporcionalidade [adimensional],  $B$  a indução magnética [T],  $x$  a espessura da peça [m],  $f$  a frequência do campo magnético [Hz] e  $\rho_e$  a resistividade elétrica [W.m] [4].

$$P_p = k \frac{B^2 f^2 x^2}{\rho_e}$$

[02]

Em resumo, o material com o qual os núcleos do estator e do rotor são construídos deve apresentar as seguintes propriedades [4]:

- Alta permeabilidade magnética relativa;
- Baixa coercitividade magnética;
- Alta resistividade ou resistência elétrica;
- Alta indução de saturação.

## 2. Ligas Magnéticas Fundidas

Os materiais magnéticos macios mais utilizados na construção de núcleos de motores elétricos são as ligas de aço em geral, com exceção de algumas ligas de aço inoxidável que são paramagnéticas e apresentam a mesma permeabilidade magnética relativa do vácuo [5].

Os três tipos de materiais mais utilizados para núcleos magnéticos, relacionados a seguir, são: Aço baixo carbono, aço-silício não-orientado e aço-silício orientado [15].

- **Aço baixo carbono:** Este tipo de aço, com aproximadamente 0,05% de carbono, foi originalmente utilizado como material para construção de núcleos para transformadores, motores e geradores, mas é limitado hoje principalmente para núcleo de pequenos motores. Aço baixo carbono laminado tem uma permeabilidade magnética relativa máxima de 5.000 a 10.000, e pode ser considerado como ferro com impurezas. Tratamentos para purificação podem levar à uma melhoria da permeabilidade. Apesar da alta permeabilidade magnética, o ferro "puro" não é utilizado comercialmente em função do alto custo e baixa resistividade, o que induz correntes parasitas, aumentando as perdas [15].

- **Aço-Silício não-orientado:** Este tipo de aço foi desenvolvido pelo metalurgista inglês Robert Hadfield, em 1900, e logo tornou-se o material preferido para construção de núcleo de transformadores, motores e geradores. A adição de silício ao ferro modifica profundamente as mudanças de fase. Uma vez que o conteúdo de carbono é muito pequeno, atualmente estas ligas são conhecidas como ferro-silício. A adição de silício ao ferro resulta nos seguintes efeitos sobre as propriedades físicas: a resistividade elétrica aumenta, causando uma redução nas correntes parasitas; a anisotropia cristalina diminui, causando um aumento na permeabilidade, e diminui a indução de saturação. O percentual de silício varia de aproximadamente 1,05 a 3,25% para as ligas não-orientadas e 3,25% para as ligas orientadas, e o percentual de carbono varia 0,03% (não-orientado) a 0,01% (orientado). A permeabilidade magnética relativa, a uma indução de 15 kG (1,5 T), 60 Hz para as ligas não-orientadas, varia de 1.100 (1,05% de Si) até 700 (3,25% de Si), e para as ligas orientadas varia de 16.000 a 23.000. As chapas são obtidas por laminação a quente, até aproximadamente à espessura final; a seguir é realizada uma decapagem para retirar a película de óxido e, após, laminado a frio para a espessura final, melhorando as características mecânicas; finalmente é realizado um recozimento à baixa temperatura [5].

- **Aço-silício com grãos orientados:** Este material foi desenvolvido pelo metalurgista americano Norman Goss em 1933. Ele descobriu que, com uma laminação a frio, com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final à alta temperatura, produz-se chapas com melhores propriedades magnéticas na direção de laminação, que as chapas com laminação a quente. Esta melhora é devido a uma textura magneticamente favorável, produzida por uma recristalização secundária durante o recozimento à alta temperatura [5].

A tabela 1 [6] relaciona algumas ligas fundidas a partir do ferro, com as propriedades físicas de interesse, onde  $\rho_e$  é a densidade,  $B_m$  a indução máxima,  $B_r$  a retentividade,  $H_c$  a coercitividade,  $\mu_r$  a permeabilidade magnética relativa máxima e  $\rho_e$  a resistividade elétrica.

Tabela 1 - Propriedades físicas de algumas ligas fundidas a partir do ferro<sup>6</sup>

Liga	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$B_m$ [T]	$B_m$ [kG]	$B_r$ [T]	$B_r$ [kG]	$H_c$ [A/m]	$H_c$ [Oe]	$\mu_r$ [Ad.]	$\rho_e$ [ $\mu\Omega.m$ ]
ASTM A848 (Ferro)	7,89	1,7	17	1,28	12,8	79,58	1,00	5.000	0,13
ASM-Handbook (Fe-Si)	7,65	-	-	-	-	56,00	0,70	8.000	0,47
Carpenter Tech. (aço-ferrítico)	7,26	1,2	12	0,60	6,0	159,00	2,00	2.000	-
ASM-Handbook (Fe-50%Ni)	8,20	1,6	16	0,80	8,0	3,98	0,05	70.000	-

### 3. Características dos Materiais Magnético Macio Sinterizados

As propriedades físicas dos materiais obtidos por metalurgia do pó, como por exemplo as magnéticas e elétricas, são influenciadas por vários fatores, sendo que aqueles considerados de maior importância no desenvolvimento deste trabalho estão relacionados a seguir:

- Na maioria dos casos, a resistividade de um elemento metálico aumenta quando são adicionadas impurezas, uma vez que estas impurezas provocam distorções no reticulado cristalino. Quanto maior as imperfeições da rede cristalina, maior a resistividade. Por esta razão, as maiores resistividades em metais são obtidas em ligas compostas de dois ou mais metais, nas mesmas proporções, ou em proporções próximas. Nestas condições, há uma interpenetração das redes cristalina dos materiais presentes na liga [7]. Por este motivo, ocorre um aumento da resistividade do ferro sinterizado, quando outros elementos como o Si, P ou Ni são adicionados [8].

- A adição de silício ao ferro, além de aumentar a resistividade elétrica, aumenta também a permeabilidade magnética relativa máxima, diminui a coercitividade. Contudo, diminui também a indução de saturação, conforme mostra a Figura 1 [9].

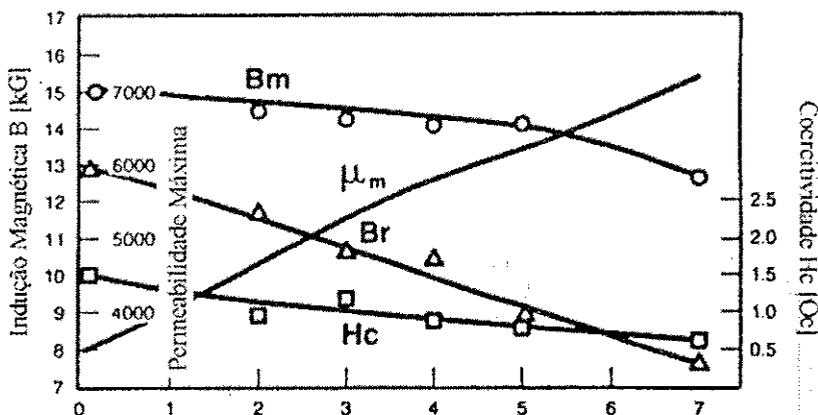


Figura 1 - Propriedades magnéticas da liga Fe-Si em função do conteúdo de silício<sup>99</sup>

A maioria dos materiais metálicos ferrosos sinterizados possuem resistividade elétrica maior do que materiais maciços de mesma composição química, devido principalmente à porosidade e à oxidação superficial das partículas. Portanto, é possível aumentar ainda mais a resistência elétrica total de peças metálicas sinterizadas, compactando com pressão menor, o que aumenta a porosidade do material, diminuindo portanto a densidade. A resistividade das ligas metálicas diminui com o aumento da densidade, independente do tipo de metal [6, 10]. A Figura 2 mostra a variação da resistividade em função da densidade para alguns materiais sinterizados [6].

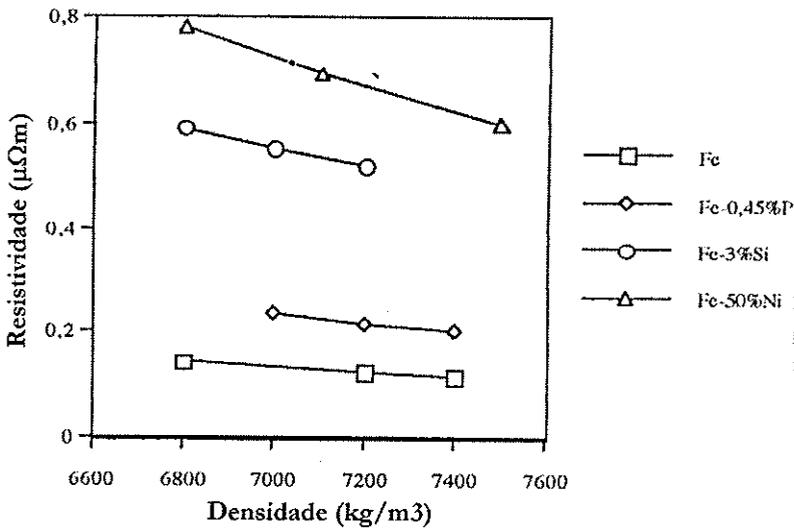


Figura 2 - variação da resistividade em função da densidade<sup>10</sup>

Com o aumento da porosidade, há uma diminuição da permeabilidade magnética, uma diminuição da indução de saturação e um aumento da coercitividade [6, 11, 12]. A Figura 3 mostra a variação da indução de saturação para um certo campo magnético, em função da densidade para o ferro sinterizado [12].

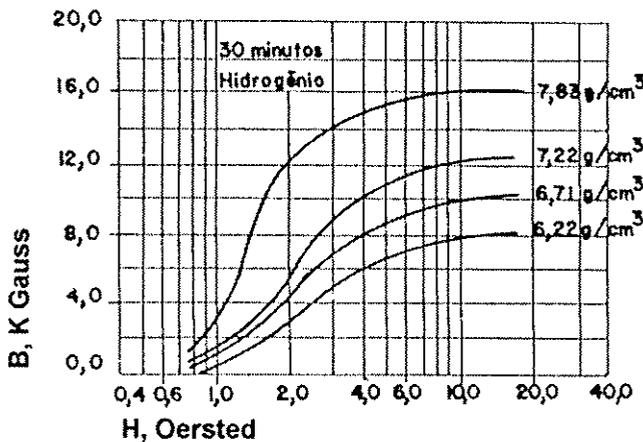


Figura 3 - Variação da indução magnética em função da densidade para o ferro sinterizado<sup>12</sup>.

- A resistividade elétrica para a maioria das ligas metálicas também é função do tamanho de grão. Quanto menor o tamanho de grão, maior a quantidade de contornos de grãos, que também provocam distúrbios na rede cristalina, aumentando a resistividade. Entretanto, a diminuição do tamanho de grão causa um decréscimo da permeabilidade magnética e um aumento da coercitividade [13, 14].

- As impurezas como carbono, nitrogênio e oxigênio também afetam as propriedades magnéticas das ligas de ferro sinterizadas. Quando o objetivo é a obtenção de materiais magnéticos de boas propriedades, é conveniente que os percentuais destas impurezas sejam mantidos nos seguintes níveis [09]:

- carbono: 0,01% máx;
- oxigênio: 0,02% máx;
- nitrogênio: 0,01% max.

• Outro fator que também afeta as propriedades magnéticas dos materiais ferrosos sinterizados é o tamanho de partícula de pó [11]. O aumento da granulometria do pó aumenta a permeabilidade magnética, mas aumenta também a coercitividade. Além disto, outros fatores como tempo, temperatura e atmosfera de sinterização também alteram algumas propriedades físicas [15].

Os materiais sinterizados mais comumente utilizados são os seguintes [6, 16, 17]:

- ferro puro;
- ligas ferro-cobalto;
- ligas ferro-fósforo;
- ligas ferro-silício e ligas ferro-fósforo-silício;
- aços inoxidáveis ferríticos.
- ligas ferro-níquel.

A seguir estão descritas as principais ligas que podem ser utilizadas e suas propriedades físicas de interesse.

**Ferro Puro:** Os materiais sinterizados de ferro puro são caracterizados por altas perdas e propriedades magnéticas médias. Seu uso é aconselhável principalmente para corrente contínua ou circuitos de excitação magnética permanente, com fluxos magnéticos de médio a alto, devido à sua baixa resistividade elétrica. O ferro puro sinterizado de alta densidade possui saturação magnética e permeabilidade altas, e baixa coercitividade, propriedades essenciais para aplicações de corrente contínua [17].

**Ligas ferro-cobalto:** Estas ligas têm como principal característica a sua alta indução máxima. Esta propriedade é interessante quando o volume e o peso dos componentes devem ser minimizados [17].

**Liga ferro-fósforo:** Os materiais sinterizados de ferro-fósforo (com teores de fósforo na faixa de 0,45 a 0,80%) mantêm as vantagens econômicas do ferro puro, adicionando ainda características magnéticas superiores. Basicamente, a força coercitiva é reduzida, enquanto se mantém uma alta indução máxima [17]. Estas ligas são utilizadas principalmente quando se deseja uma boa resposta magnética aliada a boas propriedades mecânicas.

**Ligas ferro-silício:** Estas ligas têm força coercitiva similar às ligas ferro-fósforo, com uma indução máxima ligeiramente maior. Porém, sua resistividade elétrica é bastante superior, diminuindo assim as perdas por correntes parasitas. Estas ligas são aplicadas em circuitos que operam em frequências médias de até 1200 Hz. Induções máximas elevadas podem ser obtidas em peças de alta densidade, porém o custo de produção aumenta devido à alta abrasividade e relativamente baixa compressibilidade do material [6].

**Aços inoxidáveis ferríticos:** Os aços inoxidáveis ferríticos tornaram-se populares em meados da década de 80, quando começaram a ser utilizados em anéis sensores de sistema de freios anti-blocantes (ABS), devido à sua resposta magnética e moderada resistência à corrosão [6]. Além disso, quando sinterizados em vácuo, estes materiais podem exibir um certo grau de ductilidade, essencial na montagem destes componentes.

**Ligas ferro-níquel:** A principal característica que distingue as ligas ferro níquel das demais é a sua alta permeabilidade, que é a maior de todas as citadas anteriormente. Além disso, a indução máxima é baixa e a resistividade elétrica tem um valor intermediário se comparada às demais [16, 17]. Estas propriedades tornam estas ligas atraentes em aplicações mais sofisticadas, que operam em altas frequências e com baixa excitação. O efeito mais significativo do aumento do teor de níquel é uma queda na retentividade e um aumento na coercitividade.<sup>20</sup> Apesar da liga Fe-50%Ni apresentar valores de coercitividade, indução residual e indução máxima menores se comparada à liga Fe-3%Si, ela é mais indicada para aplicações em corrente alternada de alto desempenho, especialmente se for considerado que a permeabilidade máxima deste material é aproximadamente quatro vezes a da liga Fe-3%Si e quase seis vezes do que a do ferro puro [6].

As tabelas 2 e 3 mostram, de autores diferentes, quadros comparativos resumidos das propriedades físicas de interesse das principais ligas magneticamente macias sinterizadas.

Tabela 2 - Quadro comparativo das propriedades físicas das diversas ligas sinterizadas magneticamente macias<sup>18</sup>

Liga	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$B_m$ [T]	$B_m$ [kG]	$B_r$ [T]	$B_r$ [kG]	$H_c$ [A/m]	$H_c$ [Oe]	$\mu_r$ [Ad.]	$\rho_c$ [ $\mu\Omega.m$ ]
ASC100.29 +4%Si	6,8	1,1	11	0,6	6	90	1,13	2.400	0,70
PASC45 +4%Si	6,8	1,2	12	0,6	6	100	1,26	2.200	0,80
ASC100.29 +2%Si	7,3	1,4	14	0,6	6	90	1,13	3.600	0,35
PASC45 +2%Si	7,3	1,4	14	-	-	60	0,75	6.100	0,45
ASC100.29 +3%Si	7,3	1,4	14	-	-	65	0,81	5.000	0,47
PASC45 +2%Si	7,3	1,4	14	1,0	10	60	0,75	6.100	0,45
ASC100.29 +3%Si	7,2	1,3	13	1,1	11	80	1,00	4.300	0,47
ABC100.30 +0,45%P+5%Sn	7,2	1,4	14	0,8	8	80	1,00	4.800	0,40
Fe-50Ni	7,4	1,1	11	1,0	10	25	0,31	13.000	0,50
ABC100.30 +0,45%+8%Sn	7,4	1,3	13			37	0,46	9.700	0,48

Tabela 3 - Quadro comparativo das propriedades físicas das diversas ligas sinterizadas magneticamente macias<sup>18</sup>

Liga	$\rho_s$ [g/cm <sup>3</sup> ]	$B_m$ [T]	$B_m$ [kG]	$B_r$ [T]	$B_r$ [kG]	$H_c$ [A/m]	$H_c$ [Oe]	$\mu_r$ [Ad.]	$\rho_c$ [ $\mu\Omega.m$ ]
Fe	6,8	1,14	11,4	0,96	9,6	131	1,65	2.900	0,14
	7,2	1,36	13,6	1,18	11,8	127	1,60	3.700	0,12
	7,4	1,47	14,7	1,29	12,9	119	1,50	4.700	0,11
Fe- 0,45%P	7,0	1,23	12,3	0,99	9,9	96	1,20		0,23
	7,2	1,34	13,4	1,12	11,2	80	1,00	4.800	0,21
	7,4	1,46	14,6	1,26	12,6	60	0,75		0,20
Fe-0,8%P	7,0	1,27	12,7	1,08	10,8	118	1,48		0,32
	7,2	1,32	13,2	1,13	11,3	119	1,49	-	0,30
	7,4	1,42	14,2	1,15	11,5	69	0,87		0,28
Fe-1,0%P	7,0	1,35	13,5	1,13	11,3	67	0,84		0,40
	7,2	1,38	13,8	1,15	11,5	64	0,80	-	0,38
	7,4	1,47	14,7	1,25	12,5	62	0,78		0,35
Fe-3%Si	6,8	1,17	11,7	0,94	9,4	104	1,30		0,59
	7,0	1,31	13,1	1,09	10,9	92	1,15	4.900	0,55
	7,2	1,39	13,9	1,18	11,8	80	1,00		0,52
Fe-50%Ni	6,8	0,93	9,3	0,71	7,1	21	0,26		0,78
	7,1	1,09	10,9	0,80	8,0	20	0,25	21.000	0,69
	7,5	1,27	12,7	0,94	9,4	19	0,24		0,60
Fe- 81%Ni- 2%Mo	7,8	0,72	7,2	0,48	4,8	6	0,07	77.000	0,60
Fe- 50%Co- 2%V	7,2	1,24	12,4	0,73	7,3	175	2,2		-

## 4. Aplicação de Materiais Magnético Macio Sinterizados em Núcleos Magnéticos e Motores

Materiais sinterizados obtidos a partir de ligas de material magnético macio, com ferro e outros elementos, como por exemplo Ni, Si, P e Co, podem ser utilizados na construção de núcleos magnéticos de dispositivos eletromagnéticos alimentados por corrente alternada (ac). Desta forma, núcleos de estatores e rotores de motores elétricos podem ser construídos em *blocos únicos*, e deverá conferir aos mesmos melhores características de desempenho [19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27].

Materiais magnéticos macios para aplicações em ac são os materiais da família do Fe, como as ligas ferro-silício e ferro-níquel, comumente utilizada na produção de dispositivos elétricos. Devido à natureza isotrópica dos núcleos magnéticos obtidos a partir da M/P, fatores no projeto, como empacotamento ou empilhamento de chapas laminadas, não são apropriadas para a redução das perdas totais. O sucesso da aplicação depende da forma e das dimensões das peças e das propriedades dos materiais. A produção de núcleos com ligas ferro-silício e ferro-níquel por M/P, hoje é um processo industrial no qual as propriedades magnéticas são ajustadas por parâmetros do processo bem definidos, como a pressão de compactação, tempo e temperatura de sinterização. Os processos da M/P permitem o uso de elementos, ligas e sistemas além da esfera dos tradicionais materiais magnéticos macios. Um exemplo é a liga ferro-fósforo onde, com a adição de 0,8% de fósforo resulta em peças isotrópicas as quais, independente do ajuste da forma ou tamanho, é equivalente ao pacote de chapas laminadas de 0,65 mm. A adição de fósforo melhora não somente as propriedades magnéticas macias do ferro mas também àquelas das ligas ferro-silício. A extensão da faixa de materiais disponíveis por M/P inclui, também, ferro-silício-fósforo e ferro-fósforo-estanho, aumentando a flexibilidade de escolha das combinações das propriedades magnéticas e elétricas e custo de produção total [18].

Os núcleos magnéticos de motores, construídos a partir dos processos da M/P em contraste ao método tradicional do empacotamento de chapas laminadas, oferecem vantagens na manufatura, uma vez que os núcleos podem ser construídos a partir de blocos maciços. O processo tradicional de fabricação dos núcleos gera custos elevados, além de uma quantidade excessiva de sobras na estampagem, em torno de 40% [19].

Outra vantagem de um núcleo sinterizado é que este não tem as mesmas restrições no projeto, como o pacote de lâminas. Três graus de liberdade estão disponíveis ao projetista em contraste ao dois graus impostos pelo simples empilhamento de chapas na forma de discos. A sobra, praticamente zero, e o aumento do grau de liberdade do projeto permitem uma redução nos gastos com energia na produção do material usado no dispositivo, permitindo também a otimização do circuito magnético relacionado a uma melhora na performance do dispositivo [19].

Devido às suas baixas perdas por correntes parasitas, estes materiais possuem boas propriedades magnéticas para operações em altas frequências. Considerando uma indução de 1,5 T, em 400 Hz, foram obtidos núcleos com 90 W/kg. Núcleos magnéticos fabricados com estes novos materiais têm demonstrado desempenho comparável quando alimentados com corrente elétrica de 60 Hz, e superior, para correntes com frequências maiores que 60 Hz, quando comparados com o pacote de chapas de aço laminadas a frio (CRML) dos motores (Fig. 4) [19, 23, 24].

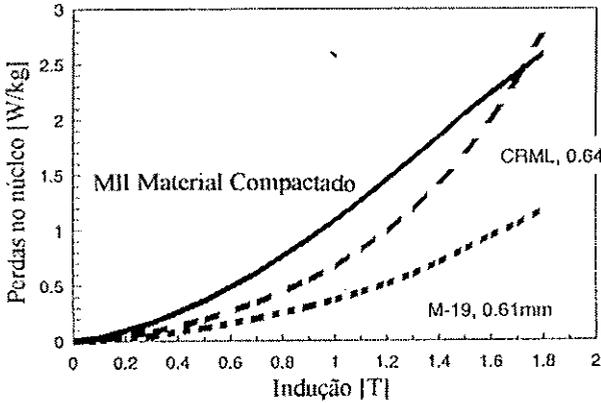


Figura 4 - Uma comparação, em 60 Hz, da perda em núcleos de materiais sinterizados e de chapas laminadas de aço com fósforo, orientadas, de 0,64 mm e o aço M-19 de 0,61 mm<sup>19</sup>.

É possível construir um núcleo magnético maciço sinterizado, que apresente uma dependência quase linear de perda no núcleo com a frequência de magnetização, contrastando com a dependência quase quadrada de perda do núcleo com a frequência, típico nos núcleos de aços laminados. Uma vez que motores com ímãs permanente, de velocidade variável, operam a frequências até 800 Hz, é possível obter-se uma melhor eficiência nestes dispositivos [19]. Salienta-se que o mercado para motores com ímãs permanente, com velocidade variável, está aumentando. Em geral, o núcleo do rotor deste tipo de motor é construído com chapas de aço laminadas, e os ímãs são fixados neste núcleo.

Existem acionamentos de motores com frequências tão altas quanto 800 Hz. Salienta-se que, com o aumento da frequências das correntes de alimentação, as perdas nos núcleos de aço aumentam dramaticamente. Estas perdas elevadas nos núcleos não somente reduzem a eficiência dos motores, como também limitam a sua faixa de operação [19].

Em 1,5 T (15 kG) e níveis de indução mais baixos, a perda no núcleo do material sinterizado é ligeiramente mais elevada que a perda no núcleo de aço de CRML. Considerando níveis de indução mais altos, maior que 1,6 T, onde muitos motores operam, as perdas do núcleo são comparáveis. Em níveis de indução maior do que 1,8 T, onde alguns motores também operam, o material sinterizado apresenta as perdas no núcleo menor. A Figura 5 mostra a perda total no núcleo do material sinterizado a 60 Hz, separadas em perdas por histerese e correntes parasitas. (A perda está composta de todas as perdas: a perda clássica, por corrente induzida, as perdas anômalas, sendo excluída a perda por histerese). As perdas por corrente parasita são uma parte muito pequena das perdas totais, menos que 10% até 1,8 T [19].

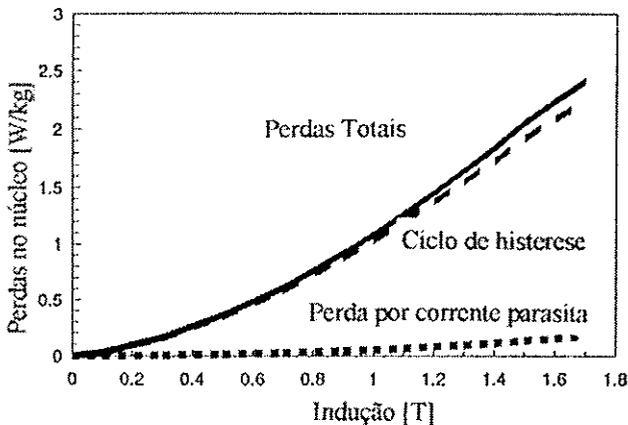


Figura 5 - A perda total nos núcleos, em 60 Hz, de material sinterizado, separado em perdas por histerese e corrente induzidas<sup>19</sup>

As perdas relativamente pequenas por correntes induzidas mantêm as perdas totais baixas para freqüências mais altas. A Figura 6 mostra uma comparação das perdas totais do núcleo, medidas a 1,5 T do material sinterizado para um CRML aço fósforo orientado e um aço-silício M-19 não-orientado. Em ambas comparações, a perda por histerese do material sinterizado é maior, mas as perdas por corrente parasita é menor. A baixas freqüências, o material sinterizado tem as perdas do núcleo mais alta. Em aproximadamente 60 Hz, as perdas do material sinterizado são comparáveis ao ferro-fósforo orientado CRML, sendo muito menores em freqüências mais altas. O aço M-19 tem as perdas mais baixas do núcleo em freqüências menores. Ainda ao redor dos 400 Hz, a perda no núcleo para o material sinterizado é comparável àquela do aço M-19. O material sinterizado possui as mais baixas perdas a freqüências maiores que 400 Hz [19].

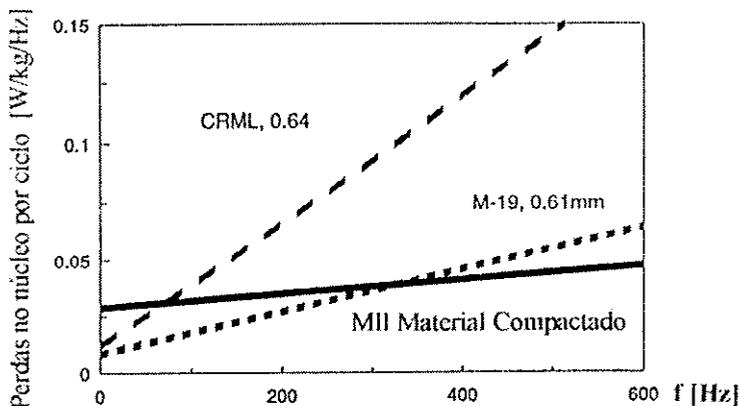


Figura 6 - Comparação das perdas totais do material sinterizado, medidas com uma indução de 1,5 T, com chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e o aço silício M-19 de 0,61 mm 19.

A perda total mais baixa do núcleo com material sinterizado é devido às correntes induzidas mais baixas. As Figuras 7(a-b) mostram o percentual de perdas de correntes induzidas para cada um dos materiais a 60 e 400 Hz, respectivamente. Em ambas as freqüências, o percentual de perdas totais do núcleo devido a perdas por correntes induzidas são menores para o material sinterizado. As baixas perdas por correntes induzidas para este novo material magnético resultou em um bom material para motores elétricos. Na maioria das aplicações, o nível de indução é maior que 1,5 T e a forma da onda de tensão elétrica não é senoidal e tem um conteúdo harmônico elevado. As harmônicas mais altas resultam em perdas por corrente induzidas maiores [19].

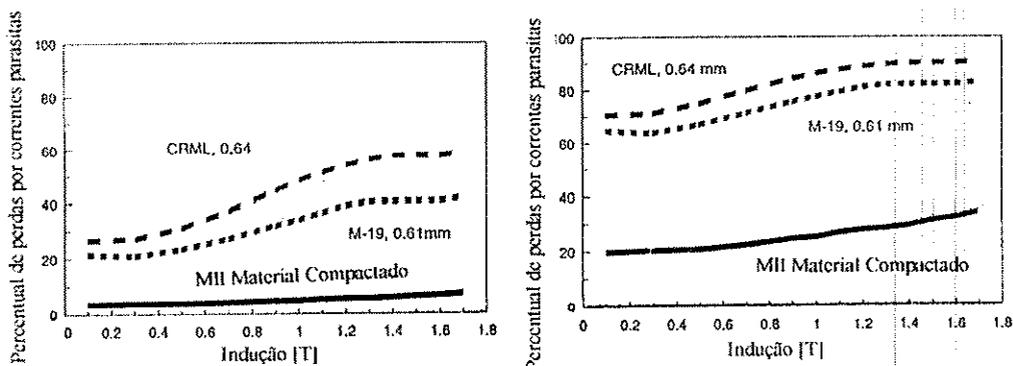


Figura 7 - Percentual das perdas, por correntes induzidas da perda total em núcleos de materiais sinterizados, de chapas de aço laminadas com fósforo, orientadas, de 0,63 mm e do aço silício M-19 de 0,61 mm - (a) 60 Hz - (b) 400 Hz<sup>19</sup>.

De acordo com dados bibliográficos o, autor [19] cita, sem maiores detalhes, a construção de estatores sinterizados para um motor sem escovas de quatro pólos. A tabela 4 compara as propriedades magnéticas do motor de núcleo sinterizado com aqueles de um motor de núcleo laminado padrão (0,64 mm M-19). O torque, em ambos os casos de teste, foi mantido constante. O núcleo sinterizado obteve uma performance melhor que o núcleo convencional. Apresentou um consumo menor de corrente, girou a uma velocidade maior e apresentou um aumento menor de temperatura. Basicamente, a eficiência do núcleo sinterizado foi 10% maior. O material sinterizado utilizado nestes núcleos de motores não foi divulgado. O autor cita que um posterior desenvolvimento do material resultaram em mais de 10% de diminuição em sua perda no núcleo. A partir destes ensaios, são esperados resultados até melhores com novos materiais. Foram produzidos motores universal com o material sinterizado que apresentaram desempenho semelhante e ligeiramente melhor que os núcleos de aço CRML convencionais.

Tabela 4 - Performance de núcleos padrões e núcleos compactados<sup>19</sup>.

Tipo Núcleo	Torque N.m	Amps	Velocidade Rad/s	Rendimento %	Temperatura [°C]
Padrão	0,066	7,1	1649	64,5	49,4
Compactado	0,066	6,6	1768	74,5	27,8

A partir de processos alternativos da metalurgia do pó convencional, é possível melhorar as propriedades físicas de interesse dos materiais utilizados na construção de núcleos de motores [24, 25, 26, 27]. Como exemplo, cita-se a mistura adequada de pó de ligas de ferro com polímeros.

Os núcleos magnéticos também podem ser construídos a partir de compósitos baseados em pó de ferro aglomerado com uma matriz orgânica. Usualmente, sua composição química varia dentro de uma faixa de 97 a 99,5% de pó de ferro, e os restantes são aglomerantes orgânicos, tipo termofixos ou termoplásticos. São obtidos pelos processos da metalurgia do pó e são utilizados como substitutos dos núcleos magnéticos clássicos de chapas de aço laminadas ou pó de ferro sinterizado, como ferro-silício e ferro-níquel. O uso dos compósitos de pó de ferro-aglomerado em núcleos de rotores e estatores de máquinas elétricas cc e ca e núcleos de transformadores oferece certas vantagens como formas variadas, dimensões precisas, perdas reduzidas, alta produtividade e custo vantajoso. A matéria-prima, na forma de pó, é misturada com estearato de zinco num percentual entre 0,5 a 1%, compactada à seco numa pressão de 200 a 800 MPa e polimerizada em condições ambientais ou atmosfera controlada, em temperaturas de 120 a 170 °C em tempos que variam de 15 a 60 minutos. Os valores mínimos das principais características obtidas por estes materiais são densidade de 6,0 g/cm<sup>3</sup>, indução de saturação 0,6 T, retentividade 0,1 T, força coercitiva 3 A/cm e permeabilidade magnética 100 [25].

## Conclusão

Assim, pode-se destacar que algumas pesquisas estão sendo realizadas com objetivo de substituir o tradicional pacote de chapas laminadas por blocos maciços sinterizados. Salienta-se, também, que para baixas frequências (60 Hz) as perdas ainda são maiores nos materiais sinterizados; contudo, para frequências maiores que 400 Hz, os materiais sinterizados apresentam um desempenho melhor que as chapas laminadas. A literatura cita núcleos maciços de motores elétricos construídos a partir de processos da M/P, entretanto, os dados relativos à construção destes núcleos são vagos. Obviamente isto se deve ao fato de que tais procedimentos têm caráter inovador, certamente com registros e pedidos de patentes. É importante salientar também que, em um futuro relativamente próximo, muitos destes núcleos magnéticos de motores (bem como de outros dispositivos eletromagnéticos, como transformadores, reatores, relés, etc) serão construídos a partir dos processos da M/P.

# Referências Bibliográficas

1. REBORA, G. La Construcción de Máquinas Eléctricas. Barcelona, Hoepli - Editorial Científico-Médica, 1969. 999p.
2. RICHARDSON, D.V. Rotating Electric Machinery and Transformer Technology. Virginia-USA, Reston Publishing Company, Inc., 1982. 636p.
3. LANDGRAF, F.J.G., SCOZ, L.C. A separação de perdas elétricas como critério de avaliação de processamento de aços elétricos. Metalurgia & Materiais, maio 1995. p.436-438.
4. DIETRICH, D.W. Magnetically Soft Materials. ASM Handbook, V.2, 1992, p.761-781.
5. CULLITY, B.D. Introduction to Magnetic Materials. Adison. Wesley Publishing Company, Massachusetts, 1967. 514p.
6. LALL, C. Soft Magnetism, Fundamentals of Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, 1992. 139p.
7. VLACK, L.H.V. Princípio de Ciência dos Materiais, S. Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1970. 427p.
8. LUBORSKY, F.E., LIVINGSTON, J.D., CHIN, G.Y. Magnetic Properties of Metals and Alloys. Physical Metallurgy. Amsterdam: Elsevier Science, 1996. [08]
9. LALL, C; BAUM L.W. High Performance Soft Magnetic Components by Powder Metallurgy and Metal Injection Molding, Modern Developments in P/M, v.18, 1998. p.363-389.
10. Z.P. POPOV, T.L. RATCHEV, Y.YANKOV. The influence of Boron Additives on the Magnetic and Electrical Properties of PM Fe-Si-Cr-P Soft Magnetic Material, Advances in Powder Metallurgy, v.5, 1991. p.189-193
11. MOYER, K.H. The Effect of Propriety on the Properties of Iron Compacts. Riverton, N.J. Hoeganes Corporation, 1980.
12. JAMES, B. A., WILLIAMS, G. Review of the Magnetic Properties of Sintered Iron. Powder Metallurgy, v.22, n.2, 1979. p.75-85.
13. LANDGRAF, F.J.G., PLAUT, R.L. Efeito do Tamanho de Grão na Permeabilidade Magnética Máxima da Liga-Ferro 47,5% Níquel, Metalurgia – ABM, v.45, n.380, 1989. p.677-681.
14. Aços Elétricos – Grão não Orientado. Artigo de Circulação Interna da ACESITA, 1993.
15. LALL, C. The Effect Sintering Temperature and Atmosphere on the Soft Magnetic Properties of P/M Materials, Advances in Powder Metallurgy, v.3, 1992.
16. LENEL, F.V. Magnetic Applications. Metals Handbook, v.7, 1984. p.638-641.
17. BAS, J. A., PUIG, J., MOLINS, C.B. Soft Magnetic Materials in P/M: Current Applications and State-of-the-Art. Modern Developments in Powder Metallurgy, Princeton, New Jersey. Metal Powder Industries Federation, v.18, 1988. p.745-756.
18. JANSSON, P. Soft Magnetic Materials for A.C. Applications. Hoeganes A.B., Hoeganes Swed, Powder Metallurgy, v.35, n.1, 1992. p.63-66.
19. KRAUSE, R.F., BULARZIK, J.H., KOKAL, H.R. New Soft Magnetic Material for AC and DC Motor Applications. Magnetics Inc, Burns Harbor, IN, USA. Journal of Materials Engineering and Performance, v.6, n.6, Dec. 1997. p.710-712.
20. ITOH, Y., TAKEDA, Y., KUROISHI, N. AC Magnetic Properties of New Fe—Si Sintered Alloy. Modern Developments in Powder Metallurgy. v. 17. Special Materials, Toronto, Canada, 17-22 June 1984. Metal Powder Industries Federation, 105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540, USA, 1985.p.641-655.
21. FRAYMAN, L.L., RYAN, D.R., RYAN, J.B. Modified P/M Soft Magnetic Materials for Automotive Applications, The International Journal of Powder Metallurgy, v. 34, n.7, 1998. p.31-39.
22. ANISIMOVA, E. A., OLEINIKOV, A. M., SERDYUK, G. G. Powder Materials with Specified Electrical and Magnetic Properties for Heavy and Two-Layer Rotors of Asynchronous Motors. Soviet Powder Metallurgy and Metal Ceramics (English translation of Poroshkovaya Metallurgiya), v.29, n.9, Feb 1991. p.741-744.

23. PERSSON, M., JANSSON, P., JACK, A.G., MECROW, B.C. Soft Magnetic Composite Materials - Use for Electrical Machines. IEE Conference, Publication n.412, 1995. IEE, Stevenage, Engl. p.242-246.
  24. ENESCU, E., SOPTEA, E., GAVRILIU, S., CRISTESCU, E. New Composite Materials Based on Iron for Soft Magnetic Cores. Cercet. Metal. Mater. (Metall. New Mater. Res.), II, (3), p.69-78.
  25. PERSSON, M.; JANSSON, P. Advances in Powder Metallurgy Soft Magnetic Composite Materials for Electrical Machines. IEE Colloquium (Digest), n.234,1995. IEE, Stevenage, Engl. p.4/1-4/6.
  26. JACK, A.G. Impact of New Materials on the Design of Electrical Machines. IEE Colloquium (Digest) n 234 1995. IEE, Stevenage, Engl. p.1/1-1/5.
- JACK, A.G., MECROW, B.C., MADDISON, C.P., WAHAB, N.A. Claw Pole Armature Permanent Magnet Machines Exploiting Soft Iron. IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, IEMDC,1997. IEEE, Piscataway, NJ, USA, 97TH8282. p.MA1 5.1-5.3.