

Diminuição das Perdas Magnéticas em Materiais Magnéticos Macios (SMC) composto por partícula de ferro com fina camada de revestimento de fosfato e sua eficiência em motores elétricos quando aplicado a um campo magnético de baixa frequência.

Reduction of Magnetic Losses in Soft Magnetic Materials (SMC) composed of an iron particle with a thin layer of phosphate coating and its efficiency in electric motors when applied to a low frequency magnetic field.

DOI:10.34115/basrv5n2-017

Recebimento dos originais: 03/02/2021

Aceitação para publicação: 25/03/2021

Jaime André Back

Mestre em Sistemas e Processos industriais – UNISC

Doutorando em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - UFRGS

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale - Porto Alegre / RS

E-mail: jaime.back@gmail.com @ufrgs.br

Lírio Schaeffer

Prof. Dr. Ing em Engenharia Mecânica - Rheinisch-Westfälischen Technischen

Hochschule/Aachen/Alemanha

Instituição de atuação atual: Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais -
PPGE3M

Av. Bento Gonçalves, 9500 - Campus do Vale - Porto Alegre / RS

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o estudo das rotas de preparação de um compósito magnético macio (SMC), suas propriedades eletromagnéticas e eficiência quando aplicado a motores de indução (campos magnéticos de baixa frequência), como alternativa aos aços elétricos tradicionais. Assim, diferentes SMCs (como pó de ferro puro e pó de ferro ASC 100.29, ambos com revestimento e isolamento das partículas com ácido fosfórico) foram estudados em comparação com SMCs comercializados, como Somaloy® 700 3P. Além disso, metodologias de deposição da camada isolante, como deposição física, pulverização e processo Sol-Gel, também foram estudadas. Inicialmente, foram preparadas amostras comercial em pó e amostras com fina camada de fosfato. As partes sinterizadas desses SMCs foram então preparadas e, posteriormente, seus parâmetros eletromagnéticos foram adquiridos. A partir desses dados, foi feita uma análise do fluxo magnético nos motores construídos por esses materiais, na qual foi observado que a amostra do material compósito tinha propriedades compatíveis com os aços convencionais. Observou-se também que, com o aprimoramento das rotas de preparação do SMC, elas podem ser utilizadas no desenvolvimento de novas topologias de motores,

para as mais diversas aplicações, sem perda de eficiência, principalmente no que se refere a aplicações magnéticas de baixa frequência.

Palavras-chaves: Compósito Magnético Macio, Pó de Ferro Revestido, Máquinas Elétricas, Camadas Finas Isolantes. Partículas de Ferro Recobertas por Ácido Fosfórico.

ABSTRACT

This work presents the study of the preparation routes of a soft magnetic composite (SMC), its electromagnetic properties and efficiency when applied to induction motors (low frequency magnetic fields), as an alternative to traditional electric steels. Thus, different SMCs (such as pure iron powder and ASC 100.29 iron powder, both with phosphoric acid coating and particle isolation) were studied in comparison with commercially available SMCs, such as Somaloy® 700 3P. In addition, methodologies for depositing the insulating layer, such as physical deposition, spraying and the Sol-Gel process, were also studied. Initially, commercial powder samples and samples with a thin layer of phosphate were prepared. The sintered parts of these SMCs were then prepared and, subsequently, their electromagnetic parameters were acquired. From these data, an analysis of the magnetic flux in the engines built by these materials was made, in which it was observed that the sample of the composite material had properties compatible with conventional steels. It was also observed that, with the improvement of the SMC preparation routes, they can be used in the development of new engine topologies, for the most diverse applications, without loss of efficiency, mainly with regard to low frequency magnetic applications. .

Keywords: Soft Magnetic Composite, Coated Iron Powder, Electrical Machines, Insulating Thin-Layers, Iron Particles Coated Phosphoric Acid.

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos magnéticos macios (SMC – Soft Magnetic Composites) são desenvolvidos para aplicações eletromagnéticas e produzidos com base em técnicas tradicionais de metalurgia do pó (M/P) (SUNDAY; TAHERI, 2017; TONTINI, 2017; ZHOU et al., 2020). São utilizados em áreas da elétrica, eletrônica e principalmente na conversão de energia, fornecendo rotas de produção sustentáveis, reduzindo o consumo de material, permitindo a fabricação de peças em formato único e já acabado (CHEN et al., 2019; NIKAS, 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

O conceito de SMC é baseado no recobrimento das partículas magnéticas com uma camada superficial, da ordem de nanômetros, eletricamente isolante e, subsequentemente, unidas em uma forma de matriz tridimensional de um compacto acabado. Desta forma, propriedades magnéticas 3D são adquiridas devido à natureza isotrópica deste material, oferecendo assim liberdade na criação de conceitos de projetos

(flexibilidade de design), em aplicação únicas e inovadoras (LEI et al., 2019; LUO et al., 2019; XIA et al., 2019).

Os produtos SMC apresentam melhor desempenho magnético para aplicações de médias e altas frequências, em oposição aos aços laminados e ferrites mais tradicionais, surgindo como alternativa no desenvolvimento de equipamentos mais eficientes energeticamente, com tendência a miniaturização e diminuição de peso e aumento de potência (SILVEYRA et al., 2018; SUN et al., 2019; SUNDAY; HANEJKOB; TAHERIA, 2017; ZHOU YE; BJORN SKARMAN, 2012). Citam-se, por exemplo, dispositivos transformadores de tensão/corrente em fontes chaveadas, dispositivos de armazenamento de energia (indutores), nas telecomunicações, nos motores elétricos de corrente contínua (CC), entre outros.

Entretanto, para melhores desempenhos dos SMCs (aumento de permeabilidade e diminuição de perda por corrente parasita), é necessário um isolamento elétrico apropriado entre as partículas magnéticas, estando diretamente relacionado ao tipo do revestimento, camada de revestimento uniforme, estrutura partícula-revestimento, e processo de preparação adequados (HU et al., 2020; SUNDAY; HANEJKOB; TAHERIA, 2017). Em relação às partículas, estas podem ser de diferentes tipos de materiais, como ferro puro (Fe 99,98%), ou ligas como de ferro-silício (FeSi), ferro-nitrogênio (FeN), ferro-níquel (FeNi), ferro-carbono (FeC), ferro-boro (FeB), ferro-fósforo (FeP) e semelhantes (MAEDA et al., 2010).

Da mesma forma, diferentes tipos de recobrimentos podem ser aplicados sobre a partículas magnéticas para formar a camada isolante, sendo divididas em camadas orgânicas e inorgânicas, metálicas e não metálicas. Camadas isolantes tratadas com ácido fosfórico (H₃PO₄) são descritas nos trabalhos (CHEN et al., 2020, 2019; ISHIZAKI et al., 2017; MAEDA et al., 2010; XIA et al., 2019; ZHOU YE; BJORN SKARMAN, 2012), bem como a adição de algum tipo de óxido na solução (um isolante de óxido pode ser usado, além de fosfato de ferro, fosfato de manganês, fosfato de zinco, fosfato de cálcio, fosfato de alumínio, óxido de silício, óxido de alumínio), tal como óxido de titânio, ou óxido de zircônio (SOARES; ALVES, 2021).

O processo de fabricação dessas máquinas elétricas é, portanto, mais caro se comparado ao processo de fundição, por exemplo, processo que resultaria em núcleos maciços, uma vez que novas perspectivas indicam que ligas de materiais magnéticos macios, obtidos a partir de pó de ferro base, misturados com outros elementos, podem apresentar propriedades superiores às obtidas em chapas de aço laminado. Os materiais

magnéticos moles, produzidos pela Metalurgia do Pó, são alvo de diversos estudos e aplicações, em eletrônica e principalmente em motores elétricos, devido à grande parcela de energia elétrica que consomem.

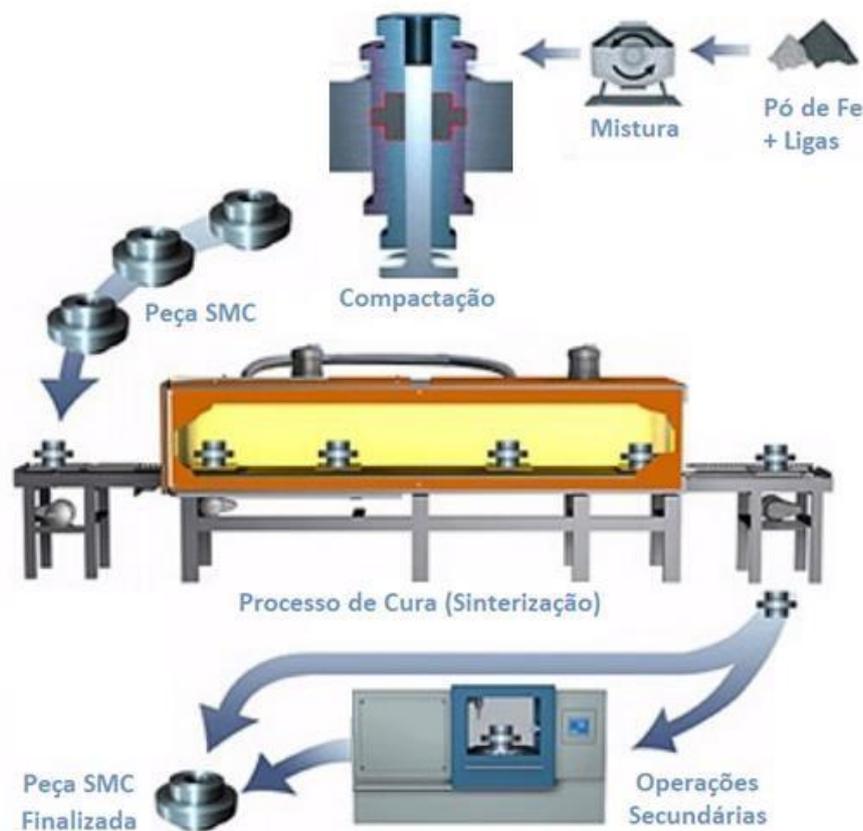
2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O PROCESSO DE M/P

Diferente de outros processos metalúrgicos, a metalurgia do pó não apresenta fase líquida ou apresenta somente presença parcial desta durante o processo. É uma técnica de fabricação que permite que se produzam peças em formatos definitivos ou praticamente definitivos, muitas vezes sem necessidade posterior de outros tipos de acabamento, como usinagem por exemplo. Os componentes obtidos a partir deste processo possuem características estruturais e físicas dificilmente alcançados em qualquer outro processo.

Na M/P, os pós depois de serem misturados, são compactados em matrizes onde adquirem a forma da cavidade da matriz. Após, são colocados em fornos para sinterização onde adquirem consistência e resistência mecânica. Salienta-se que, pós de diferentes naturezas químicas podem ser obtidos, desde que sejam misturados homogeneamente.

Figura 1 – Representação do processo de M/P.



Fonte: Adaptado de Sunday & Taheri (2017).

Os métodos de processamento para formar SMCs muitas vezes seguem técnicas convencionais de metalurgia de pó, como moagem ou mistura de pó de metal potencialmente com elementos de liga, compactação, cura e operações secundárias, como representado na Figura 1. A moagem de vários pós elementares permite o desenvolvimento de materiais de núcleo mecanicamente ligados, frequentemente recozidos para controlar o tamanho do grão e aumentar a permeabilidade magnética (SUNDAY; TAHERI, 2017).

Partículas revestidas são compactadas para formar a forma desejada e obter altas densidades verdes, necessárias para a máxima permeabilidade e indução de saturação. Mesmo pequenas quantidades de trabalho a frio aumentam a coercividade de um material, induzindo deslocamentos e aumentando a micro-tensão. Portanto, os materiais SMC à base de ferro devem ser curados entre 520 e 770 °C para aliviar adequadamente a tensão e os deslocamentos causados pela compactação.

2.2 COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MACIOS

O pó de composto magnético macio (SMC) consiste em partículas ferromagnéticas que são recobertas com uma fina camada de superfície eletricamente isolante. Este tipo de composto é usado principalmente para aplicações eletromagnéticas. Eles são tipicamente fabricados a partir de técnicas normais de M/P sob compactação da mistura de pó para a forma compacta desejada seguida por tratamento térmico em baixas temperaturas (DANNINGER; DE ORO CALDERON; GIERL-MAYER, 2017).

- Assim, a preparação de um compacto acabado SMC inclui as seguintes partes: Pó de ferro de alta pureza, produzido por atomização de água, é preferido como material de base devido às suas propriedades magnéticas (por exemplo, permeabilidade magnética e indução) e propriedades mecânicas adequadas (por exemplo, maior força verde devido ao bloqueio mecânico entre as partículas de forma irregular)
- Revestimento das partículas de ferro com uma camada eletricamente isolante garantindo uma boa adesão e cobertura entre a superfície das partículas e a camada;

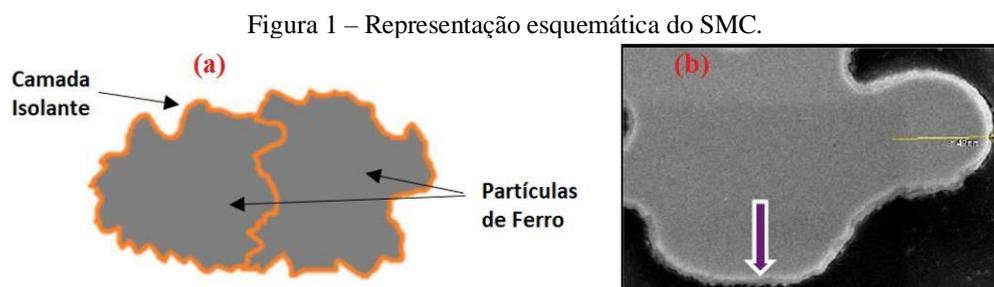
O princípio da atomização da água é desintegrar uma corrente de fusão em queda livre, fornecida a partir de um bocal no funil, por jatos de água. O fundido desintegrado

solidifica imediatamente e a superfície oxida. O pó é coletado, seco e, depois reduzido com hidrogênio.

2.3 CARACTERÍSTICAS DA CAMADA ISOLANTE

O revestimento isolante que separa individualmente as partículas de pó de ferro em um produto SMC é a característica fundamental desta tecnologia. Sua espessura, cobertura e resistência sob as diferentes operações de processamento são aspectos fundamentais para as propriedades de uma peça magnética. O revestimento isolante tem como principal finalidade aumentar a resistividade e/ou atuação elétrica entre as partículas do material ferromagnético usado no SMC (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Na maioria dos casos, como material ferromagnético (núcleo da partícula de SMC) utiliza-se o ferro puro, ou pó de ferro baixa liga, com distribuição de tamanho de partículas variados, produzidos por meio de técnicas tradicionais de atomização.

A ilustração da Figura 2.a apresenta uma partícula de ferro sendo recoberta por particulados de fosfato de estrôncio e óxido bórico. Já na Figura 2.b é possível observar o surgimento de uma fina camada de dióxido de silício recobrindo a partícula de ferro (ISHIZAKI et al., 2017). A utilização nano-filmes de sílica ou sílica coloidal sobre camadas isolantes compostas por fosfato de estrôncio e óxido bórico, de forma a conseguir camadas isolantes em partículas de ferro em pó com mais alta resistividade elétrica.



Fonte: Adaptado de Persson et al (2004).

2.4 FORMAS DE OBTENÇÃO DA CAMADA ISOLANTE

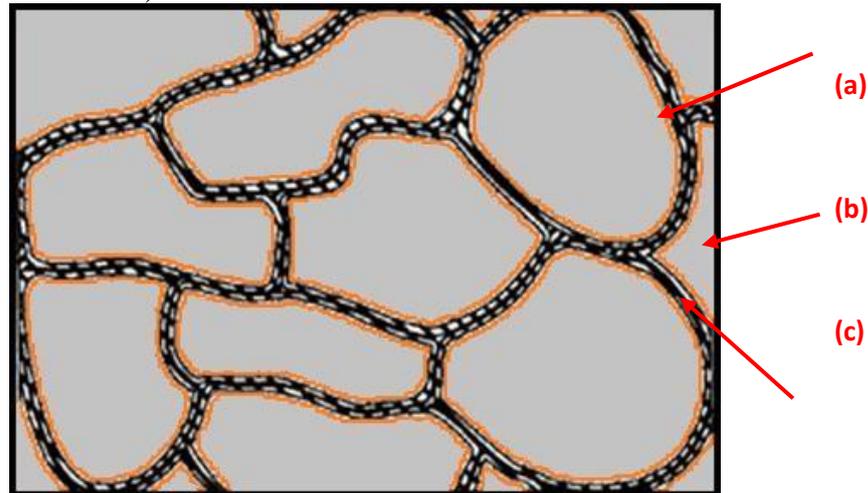
O revestimento isolante que separa individualmente as partículas de pó de ferro em um produto SMC é a característica fundamental desta tecnologia. Sua espessura, cobertura e resistência sob as diferentes operações de processamento são aspectos fundamentais para as propriedades de uma peça magnética. O revestimento isolante tem

como principal finalidade aumentar a resistividade e/ou atuação elétrica entre as partículas do material ferroso usado no SMC (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

Os revestimentos orgânicos e inorgânicos são utilizados para isolar o material do núcleo, de forma que as perdas por correntes parasitas possam ser reduzidas; no entanto, a quantidade de isolamento não magnético precisa ser minimizada e o volume ferromagnético maximizado a fim de maximizar a densidade e a permeabilidade magnética. Os polímeros orgânicos criam uma matriz incorporada, enquanto os materiais inorgânicos formam um encapsulamento em torno de cada partícula.

- **Revestimentos orgânicos:** As partículas do núcleo são providas de uma primeira camada isolante inorgânica (FIGURA 3.b), que é de preferência baseada no fósforo. Esta primeira camada de revestimento pode ser conseguida tratando um pó à base de ferro com ácido fosfórico dissolvido em água ou em solventes orgânicos. A um solvente à base de água, agentes inibidores de corrosão e surfactantes são opcionalmente adicionados. O tratamento de fosfatação pode ser repetido. O revestimento isolante à base de fósforo inorgânico das partículas de núcleo à base de ferro é preferencialmente realizado sem qualquer adição tal como a de dopantes, inibidores de corrosão ou surfactantes;
- **Revestimentos inorgânicos:** Pelo menos uma camada orgânico-metálica está localizada fora da primeira camada baseada em fósforo (FIGURA 3.c). O composto orgânico-metálico tem um carácter alcalino e também pode incluir propriedades de acoplamento, isto é, um chamado agente de acoplamento que será acoplado à primeira camada inorgânica do pó à base de ferro. A substância deve neutralizar ácidos e subprodutos ácidos em excesso da primeira camada. Se forem utilizados agentes de acoplamento escolhidos no grupo constituído por alcoxi-silanos, titatos, aluminatos ou zirconatos, então a substância será hidrolisada e parcialmente polimerizada (alguns dos grupos alcoxi serão hidrolisados com a formação subsequente de álcool).

Figura 3 – Ilustração do SMC moldado por M/P. (a) partícula de ferro; (b) fina camada de fosfato (revestimento orgânico); e (c) dióxido de silano recobrendo primeira camada da partícula metálica (revestimento orgânico-metalúrgico).



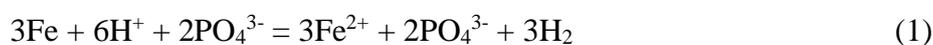
Fonte: Adaptado de Maeda et al (2010).

2.5 O PROCESSO DE FOSFATIZAÇÃO

A fosfatização é um tratamento de conversão de metal bem conhecido, especialmente na indústria automotiva. É usado para fornecer ao material uma fina camada de um revestimento de fosfato que confere à superfície propriedades anti-corrosão e de resistência ao desgaste. Além disso, foi demonstrado que tal revestimento fornece isolamento se usado em pó de ferro, melhorando significativamente suas propriedades, composição, homogeneidade entre outros.

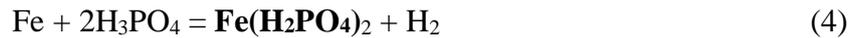
De acordo com Kopeliovich (2013), os principais componentes de uma solução de fosfatização convencional são água ou acetona como solvente principal, ácido fosfórico (H₃PO₄), íons (tipicamente cátions) de metais bivalentes como Zn²⁺, Fe²⁺, Mn²⁺ e um acelerador (geralmente é um reagente oxidante, como nitrato, nitrito ou peróxido).

Quando um material metálico, por exemplo o ferro, é imerso em uma solução de fosfato, os íons de ferro são fornecidos pelo substrato de dissolução e uma reação química de topo ocorre na superfície. Aí a dissolução do ferro é iniciada nos microânodos presentes no substrato pelo ácido fosfórico livre presente no banho. A evolução do hidrogênio ocorre nos sítios microcatódicos (KOPELIOVICH, 2013) de acordo com as seguintes equações:





À medida que essas reações prosseguem, o pH é reduzido localmente na superfície. Em seguida, a superfície do metal torna-se primeiro coberta por uma fina camada de fosfato ferroso primário que é solúvel em água ou acetona, e em seguida, um fosfato ferroso secundário e terciário insolúvel mais espesso dado pelas reações abaixo:



Considerando a eq. (4) como fosfato ferroso primário (solúvel), a eq. (5) fosfato ferroso secundário (insolúvel) e a eq. (6) fosfato ferroso terciário (insolúvel).

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 O PROCESSO DE RECOBRIMENTO

A perda por corrente parasita (*eddy currents*) pode ser minimizada com o revestimento isolante de cada partícula fornecendo caminhos de correntes parasitas muito pequenos dentro de uma partícula e uma resistividade relativamente alta do material a granel. As pequenas distâncias não magnéticas entre cada partícula agem como lacunas de ar e diminuem a permeabilidade do material a granel.

Figura 4 – Diagrama esquemático da perda de corrente parasita reduzida pela camada de revestimento de isolamento efetivamente integrada



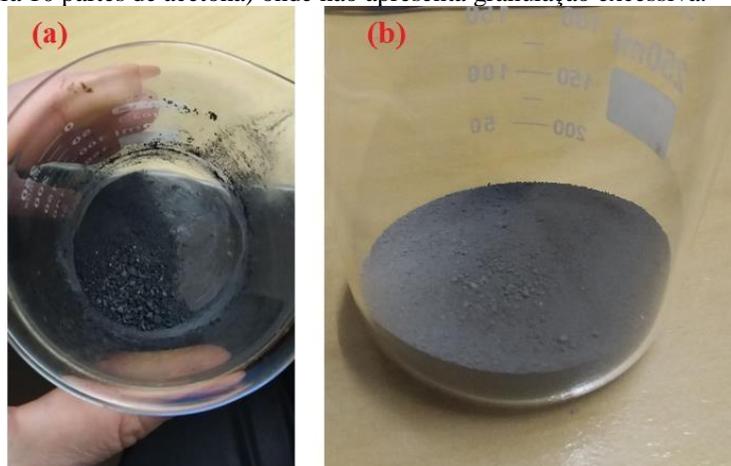
Fonte: do Autor (2021).

Quando se utiliza o método de fosfatização para fornecer revestimentos isolantes, deve-se buscar uma espessura de camada mais adequada às aplicações eletromagnéticas. Por exemplo, usando concentrações de ácido fosfórico que proporcionam propriedades

de isolamento elétrico melhorado, porém a resistividade pode ser aumentada até certo ponto.

A quantidade de ácido fosfórico dissolvido no solvente deve corresponder à espessura de revestimento desejada nas partículas de pó revestidas, conforme definido abaixo. Verificou-se que uma concentração adequada de ácido fosfórico em acetona está entre 30 ml a 100 ml de ácido fosfórico por litro de acetona. A quantidade adequada de solução (acetona + ácido fosfórico) a ser adicionada é de 50 a 150 ml para 1000 gramas de pó de ferro.

Figura 2 – Primeiros experimentos com fostatização. Amostras de Fe fosfatizadas. (a) Ferro granulado devido a fosfatização muito espessa, sem diluição em acetona. (b) Fosfato diluído em acetona (1 parte de ácido fosfórico para 10 partes de acetona) onde não apresenta granulação excessiva.



Fonte: do Autor (2021).

Consequentemente, pode-se usar apenas ácido fosfórico em um solvente em tais concentrações e tempos de tratamento a fim de obter a relação entre o tamanho das partículas, a espessura da camada e sua homogeneidade. A seguir o pó é seco a 80 °C por 30 minutos.

3.2 CARACTERIZAÇÃO ELETROMAGNÉTICA DO SMC

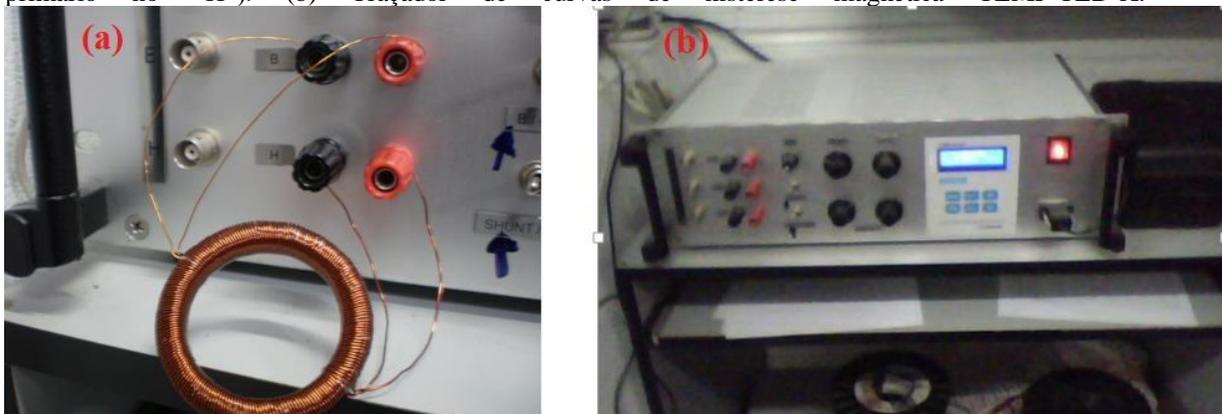
A caracterização desses materiais pode ser feita por meio de corpos de prova, que proporcionaram as análises das propriedades físicas e magnéticas de cada material comparando estas com resultados existentes em literatura.

Para o ensaio de histerese faz-se necessário a preparação da amostra, na bobinagem (enrolamento de fios de cobre) de espiras primárias e secundárias no anel, conhecidas como Anel de Roland, de acordo com a norma (ASTM A773/A 773M-01, 2001). O procedimento consiste em: enrolamento das espiras secundárias AWG 26 e a

seguir novo isolamento, seguido do enrolamento das espiras primárias AWG 23 (anel mostrado na Figura 6.a). Durante os testes da curva de magnetização do material, também conhecido como teste DC, foram utilizadas correntes de excitação de 5A com frequência de 0,05 Hz. Já para obtenção da curva e histerese, foram utilizadas frequências na faixa de 10 Hz a 100 Hz.

Para a obtenção da curva de histerese e magnetização, tendo como base a norma ASTM A773/A 773M-01 foram confeccionados os anéis de Rowland e em seguida feito os testes com o equipamento apresentado na Figura 6.b. Para todas as amostras, utilizou-se durante o ensaio corrente de 5A, frequência de 0,05Hz, 10Hz e 100Hz.

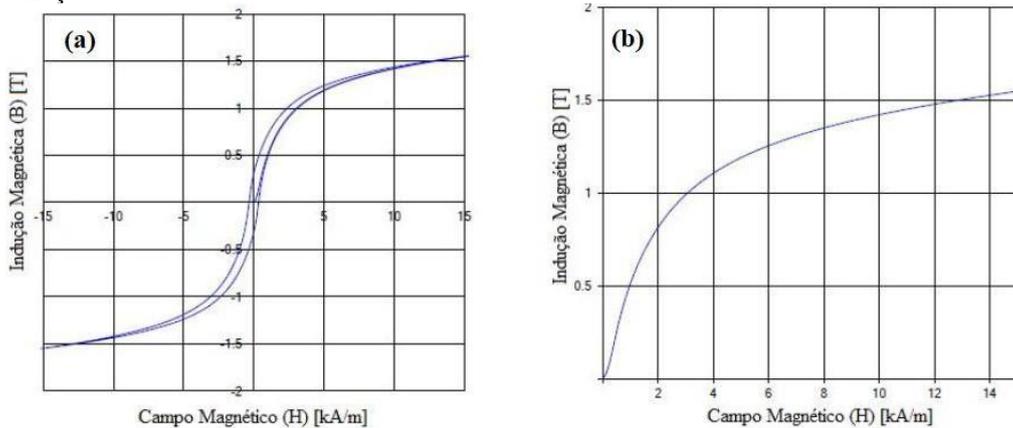
Figura 6 – (a) Conexão do corpo de prova ao equipamento e esquema de ligação (secundário no “B” e o primário no “H”). (b) Traçador de curvas de histerese magnética TLMP-TLD-X.



Fonte: do Autor (2021).

As curvas de histerese obtidas foram típicas de materiais magnéticos macios, sendo que destas curvas é possível retirar-se propriedades magnéticas importantes como a indução de saturação, magnetismo remanente e força coercitiva. A indução de saturação ou indução máxima, pode ser visualizada a partir dos valores de campo onde a indução tende a permanecer constante ou com declividade quase nula. A Figura 7 (a) apresenta os resultados das perdas em baixas frequência (ou curva de histerese) e a Figura 7 (b) mostra as curvas obtidas ao teste estático ou CC (0,05 Hz).

Figura 7 – Parâmetros magnéticos CC do Somaloy 700 3P. (a) curva de histerese e (b) curva de magnetização



Fonte: do Autor (2021).

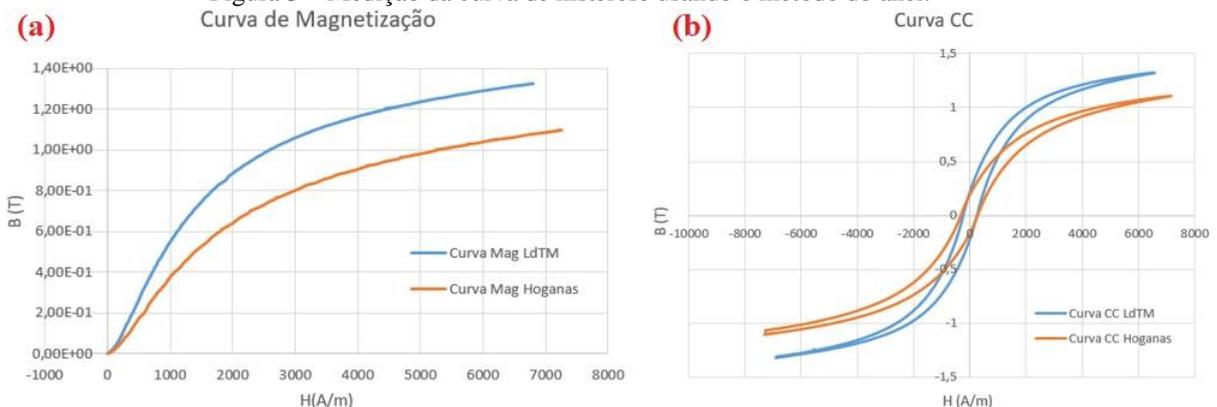
4 RESULTADOS E DISCUSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DE SMC FOSFATIZADO

A caracterização desses materiais pode ser feita por meio de corpos de prova, os quais proporcionaram a análise das propriedades físicas e magnéticas de cada material, comparando-as com resultados existentes na literatura.

A Figura 3 mostra as curvas de magnetização e lições de histerese para as amostras produzidas. A linha azul é o material comercial Somaloy 700 3P (Hoganas) e a linha vermelha é o pó fosfatado. É possível notar uma diminuição tanto no B_{max} (densidade máxima do fluxo magnético), mostrado na Figura 3.a, onde temos um $B_{max} = 1,38$ Tesla para o material Somaloy e 1,14 Tesla para o material fosfatizado.

Figura 3 – Medição da curva de histerese usando o método do anel.



Fonte: do Autor (2021).

Em relação às perdas por histerese, mostradas na Figura 8.b, a região total das perdas por histerese permanece praticamente a mesma na frequência de 10 Hz, e o SMC

fosfatizado apresenta aumentos significativos nas perdas para frequências acima de 50 Hz, devido principalmente à espessura do fosfato camada.

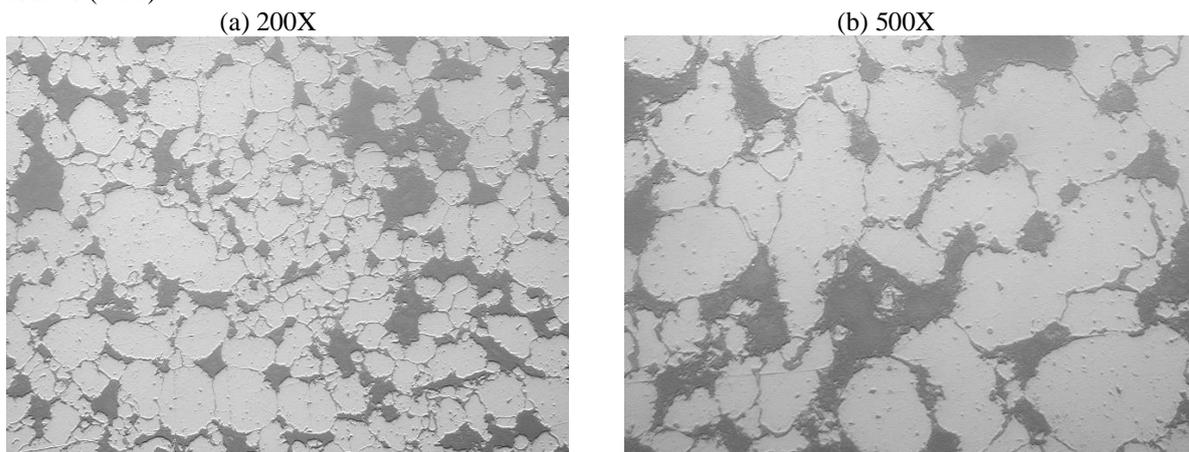
4.2 ANÁLISE DA MICROESTRUTURA DAS AMOSTRAS

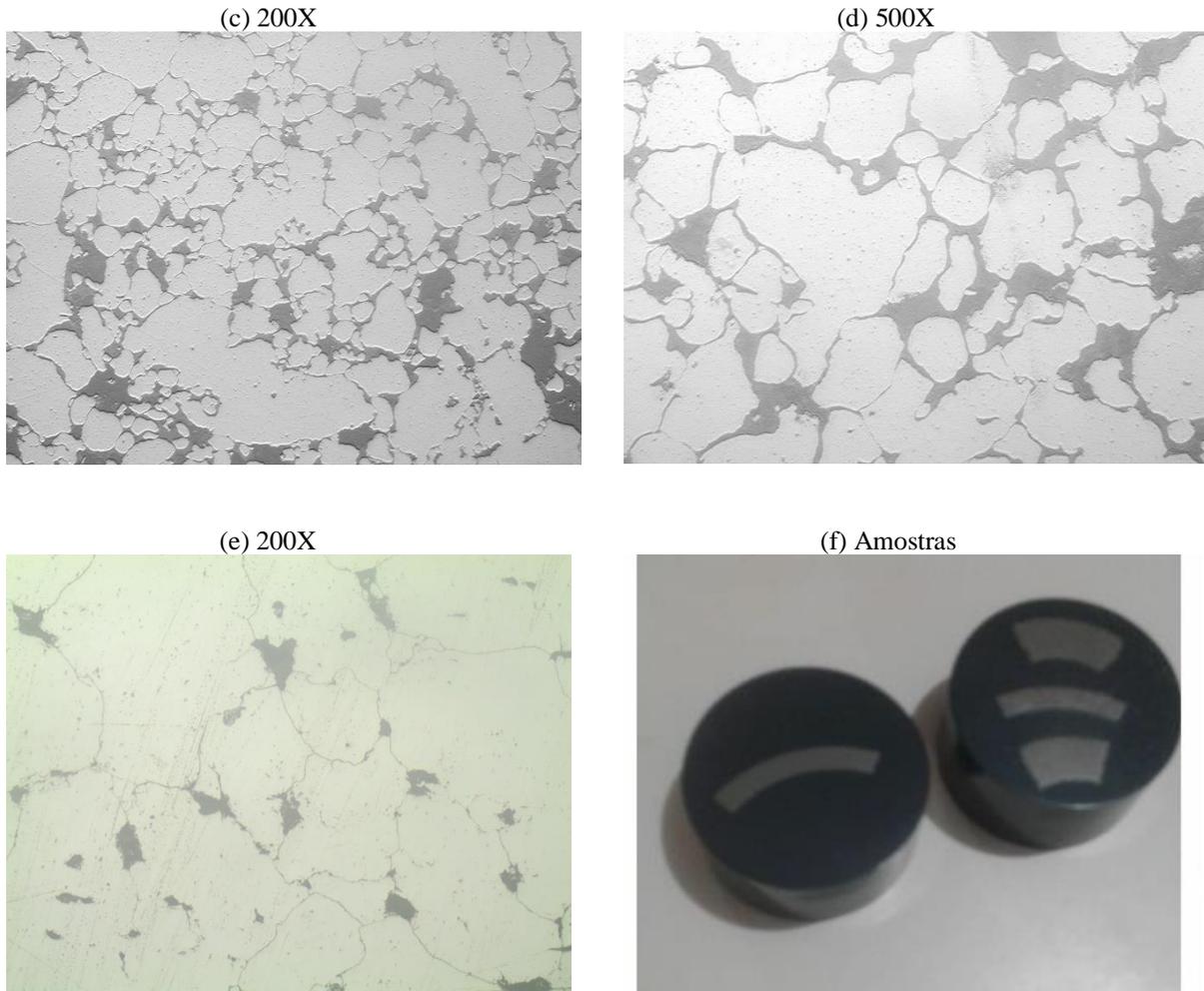
Duas amostras foram preparadas pelo método de fosfatização, utilizando o método de imersão do pó de ferro em uma solução líquida de acetona + ácido fosfórico. Quantidades iguais de pó de ferro foram imersas em diferentes concentrações de fosfato, por 5 minutos, e depois secas a 85 °C por 45 minutos.

Micrografias SEM de pós de ferro após o processo de revestimento químico com ácido fosfórico são mostradas na Figura 9. A Figura 9 (a) e (b) representam amostras com uma mistura de 1/10 de ácido fosfórico. A Figura 9 (c) e (d) representam amostras com 1/20 partes de mistura de fosfato. A Figura 9 (e) representa o material comercial Somaloy utilizado como referência nos resultados esperados. Por fim a Figura 9 (f) corresponde as amostras em baquelite utilizadas na análise metalográfica.

Pelas micrografias foi possível observar a diminuição da espessura da camada de fosfato que recobre a partícula de ferro. Esta diminuição é importante porque aumenta a permeabilidade magnética do SMC, aumentando assim sua densidade de fluxo magnético. Porém, o material ainda apresenta maior resistência elétrica do que o pó da Somaloy.

Figura 9 – Amostras com dosagem 1/10 partes de fosfato (a e b). Amostras com dosagem 1/20 partes de fosfato (c e d)





Fonte: do Autor (2021).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foram analisadas as propriedades eletromagnéticas dos materiais SMC, tanto comerciais quanto desenvolvidos pelo autor, criando assim uma rota para o desenvolvimento de pós de ferro recobertas e isoladas eletricamente para serem utilizadas em testes de motores de indução trifásicos. Através do desenvolvimento deste trabalho é possível analisar as características dos compósitos magnéticos moles, tanto experimentalmente quanto por simulação, da liga Somaloy 700 3P, da empresa Höganäs AB, e de amostras SMC do próprio autor.

A análise da fase de amostragem do material foi utilizada para levantamento das propriedades físicas e magnéticas, onde foi possível compará-las com valores obtidos na literatura, seja com trabalhos anteriores ou com o fabricante do material. Posteriormente, esses parâmetros foram inseridos em um ambiente de simulação e foi observado o

comportamento eletromagnético do material, além da comparação desta liga com motores convencionais montados a partir de placas laminadas.

Os resultados encontrados mostram um desempenho inferior da liga Somaloy 700 3P, em comparação com as chapas laminadas, porém sua utilização em um projeto 3D que aumenta a intensidade do campo magnético resultará em um aumento considerável no fluxo magnético (B), ultrapassando assim o laminado aço. Já os SMCs fosfatizados apresentam menor magnetização de saturação, devido ao aumento excessivo da camada isolante, o que interfere no desempenho dos motores elétricos.

Conclui-se desta forma a necessidade de novas rotas químicas para melhorar o processo de deposição do fosfato, fazendo com que sua camada isolante seja o mais fina possível. Também espera-se conseguir conciliar uma segunda camada isolante, de preferência inorgânica, ou metal-orgânica, sobre o fosfato, de forma a diminuir ainda mais as perdas por corrente parasita, e em contra-partida aumentar a permeabilidade magnética destes SMC.

REFERÊNCIAS

ASTM A773/A 773M-01. ASTM A773/A 773M-01 - Standard Test Method for Direct Current Magnetic Properties of Low Coercivity Magnetic Materials Using Hysteresigraphs, 2001.

CHEN, Y. et al. Enhanced magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with phosphate-polyimide insulating layer. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 813, p. 152205, 2020.

CHEN, Z. et al. Phosphate coatings evolution study and effects of ultrasonic on soft magnetic properties of FeSiAl by aqueous phosphoric acid solution passivation. *Journal of Alloys and Compounds*, v. 783, p. 434–440, 30 abr. 2019.

DANNINGER, H.; DE ORO CALDERON, R.; GIERL-MAYER, C. *Powder Metallurgy and Sintered Materials*, 2017. (Nota técnica).

HU, W. et al. Prepared novel Fe soft magnetic composites coated with ZnO by Zn(CH₃COO)₂ pyrolysis. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 505, p. 166744, 1 jul. 2020.

ISHIZAKI, T. et al. Improving powder magnetic core properties via application of thin, insulating silica-nanosheet layers on iron powder particles. *Nanomaterials*, v. 7, n. 1, 1 jan. 2017.

KOPELIOVICH, D. Phosphate coating. Disponível em: <http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=phosphate_coating>.

LEI, J. et al. Effects of heat treatment and lubricant on magnetic properties of iron-based soft magnetic composites with Al₂O₃ insulating layer by one-pot synthesis method. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 472, n. July 2018, p. 7–13, 2019.

LUO, Z. et al. Controllable SiO₂ insulating layer and magnetic properties for intergranular insulating Fe-6.5wt.%Si/SiO₂ composites. *Advanced Powder Technology*, v. 30, n. 3, p. 538–543, 2019.

MAEDA, T. et al. METHOD OF PRODUCING SOFT MAGNETIC MATERIAL SOFT MAGNETIC POWDER, AND DUST CORE United States Patent, 2010.

NIKAS, D. Characterization of electrically insulating coatings for soft magnetic composite materials by means of surface sensitive analytical techniques. [s.l.] Chalmers University of Technology, 2013.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs) *Journal of Materials Processing Technology* Elsevier, , 6 jul. 2007.

SILVEYRA, J. M. et al. Soft magnetic materials for a sustainable and electrified world *Science American Association for the Advancement of Science*, , 26 out. 2018. Disponível em: <<http://science.sciencemag.org/>>. Acesso em: 20 out. 2020

SUN, H. et al. Magnetic properties of iron-based soft magnetic composites prepared by utilizing polyimide insulating layer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 486, p. 165287, 15 set. 2019.

SUNDAY, K. J.; HANEJKOB, F. G.; TAHERIA, M. L. Magnetic and microstructural properties of Fe₃O₄-coated Fe powder soft magnetic composites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*,

v. 423, p. 164–170, 1 fev. 2017.

SUNDAY, K. J.; TAHERI, M. L. Soft magnetic composites: recent advancements in the technology. *Metal Powder Report*, v. 72, n. 6, p. 425–429, 1 nov. 2017.

TONTINI, G. ESTUDO DE COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MOLES DE FERRO RECOBERTO POR SUSPENSÃO DE NANOPARTÍCULAS DE ALUMINA EM VIDRO LÍQUIDO. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, 2017.

XIA, C. et al. The magnetic properties and microstructure of phosphated amorphous FeSiCr/silane soft magnetic composite. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 474, p. 424–433, 15 mar. 2019.

ZHOU, B. et al. Fe-based amorphous soft magnetic composites with SiO₂ insulation coatings: A study on coatings thickness, microstructure and magnetic properties. *Ceramics International*, v. 46, n. 9, p. 13449–13459, 15 jun. 2020.

ZHOU YE, L.; BJORN SKARMAN, H. SOFT MAGNETIC POWDER United States Patent, 2012.

SOARES, L.G.; ALVES, A. K. Photocatalytic properties of TiO₂ and TiO₂/WO₃ films applied as semiconductors in heterogeneous photocatalysis. *Brazilian Applied Science Review*. 2021