

## **Estudo das propriedades magnéticas de motores de fluxo axial (YASA) produzidos por metalurgia do pó**

### **Study of the magnetic properties of axial flow engines (YASA) produced from powder metallurgy**

DOI:10.34115/basrv6n6-007

Recebimento dos originais: 24/10/2022

Aceitação para publicação: 24/11/2022

#### **Jeferson Camilotti Gaio**

Mestre em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Instituição: Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES)

Endereço: Av. Avelino Talini, 171, Universitário Lajeado - RS

E-mail: engenheirogaio@gmail.com

#### **Cleberton Londero Cezar**

Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA)

Instituição: Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES)

Endereço: Av. Roraima, Nº 1000, Cidade Universitária, Camobi, Santa Maria - RS

E-mail: eng.cleberton@gmail.com

#### **Lírio Schaeffer**

Doutor em Engenharia Mecânica pela Rheinisch - Westfalischen Technischen Hochschule, Aachen - Alemanha

Instituição: Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

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

E-mail: schaeffer@ufrgs.br

### **RESUMO**

Este trabalho desenvolveu a construção de geometrias modeladas através de Elementos Finitos (FEM) ante a construção dos núcleos do estator de um motor do tipo fluxo axial, este tipo de máquina que, compõe-se de materiais ferromagnéticos, produzidos a partir da metalurgia do pó. O núcleo, comumente construído de chapas laminadas, norteia a possibilidade dos materiais SMC's (Soft Magnetic Composites) como alternativa ao laminado de grão não-orientado. Desta forma, o modelo computacional vem a levantar os comportamentos e geometria da máquina. Foi utilizado o software ANSYS ELETRONICS, de maneira a efetuar a simulação e, validar os parâmetros apurados das caracterizações, visando futura aplicação a uma máquina elétrica de fluxo axial do tipo YASA (Yokeless and Segmented Armature). Como resultados, desenvolveram-se núcleos e, demais geometrias visando-se a validação do uso da tecnologia e confirmação de parâmetros tridimensionais, a partir das caracterizações, o qual auxiliará na composição total do estator da máquina elétrica, tem-se que, para região de 7500 A/m as variações de B ficaram entre 1,5 e 1,42 T, para Somaloy® 1P, 1,55 e 1,25 T, para Somaloy® 3P, e, 1,42 e 1,35 T para Somaloy® 5P.

**Palavras-chave:** materiais magnéticos macios, metalurgia do pó, máquinas elétricas de fluxo axial.

**ABSTRACT**

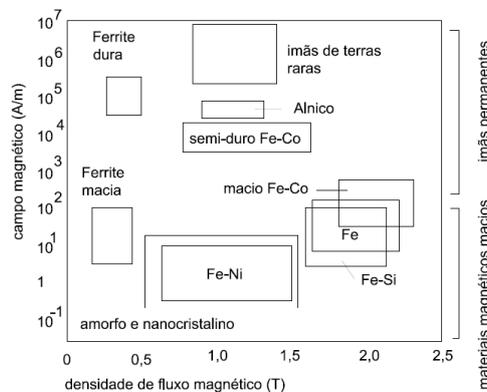
This work developed the construction of geometries modeled through Finite Elements (FEM) against the construction of the stator cores of an axial flow motor, this type of machine that is composed of ferromagnetic materials, produced from powder metallurgy. The core, commonly constructed of laminated sheets, guides the possibility of SMC's (Soft Magnetic Composites) materials as an alternative to non-oriented grain laminate. In this way, the computational model comes to raise the behaviors and geometry of the machine. The software ANSYS ELETRONICS was used in order to perform the simulation and validate the parameters of the characterizations, aiming at future application to a YASA (Yokeless and Segmented Armature). As a result, cores and other geometries were developed aiming at the validation of the use of the technology and confirmation of three-dimensional parameters, from the characterizations, which will help in the total composition of the stator of the electrical machine, we have that, for the region of 7500 A/m the variations of B were between 1.5 and 1.42 T, for Somaloy® 1P, 1.55 and 1.25 T, for Somaloy® 3P, and, 1.42 and 1.35 T for Somaloy® 5P.

**Keywords:** soft magnetic materials, powder metallurgy, axial flux electrical machines.

**1 INTRODUÇÃO**

Materiais magnéticos representam um grande impulsionador de pesquisas, com propriedades notórias e, de uma visão de infinidade ante as grandes possibilidades de aplicação, esses materiais atraem a atenção de físico-químicos e engenheiros no geral. Os conhecidos materiais SMC (Soft Magnetic Composites), são nomeados, dado à correlação entre suas características de baixa dureza ante aos aços comuns e, facilidade de reversão à sua magnetização, (Figura 1), eles possuem a capacidade de concentrar o fluxo magnético em diferentes partes do projeto (GAVRILA; IONITA, 2002; ZHOU et al., 2020).

Figura 1 – Classificação dos materiais magnéticos



Fonte: Adaptado de (GAVRILA; IONITA, 2002)

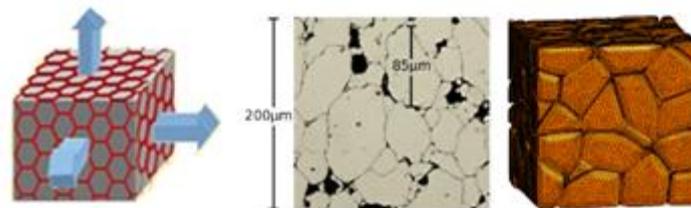
Desde as últimas décadas, compósitos SMC estão em estudo, devido suas características distintas, em que, frente às de aço elétricos, podem-se elucidar as “melhorias de suas propriedades magnéticas isotrópicas”, alta resistividade elétrica, potencial redução do “tamanho” em projeto, etc. (ISHIZAKI et al., 2016). Ante a permeabilidade relativamente baixa, a utilização do SMC em máquinas elétricas, apresenta indicação restrita a altas frequências, apesar disso, a melhoria contínua na qualidade do material impulsiona a variedade no uso do mesmo (LIPO et al., 2004).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 COMPÓSITO MACIO (SMC)

Para os (Guo et al., 2003) SMC's possuem magnéto-igualdade de comportamento em todas as direções (Figura 2). Deve-se atestar atenção que, para altas frequências o máximo da intensidade do campo magnético e, os máximos da densidade de fluxo não ocorrem ao mesmo tempo, se comparado ao laminado elétrico (BOEHM; HAHN, 2012; VESA e RASILO, 2021).

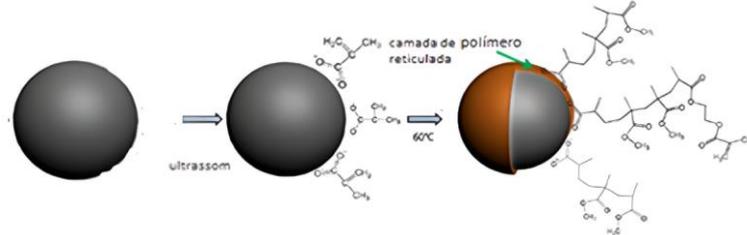
Figura 2 – Comportamento tridimensional do particulado SMC para com fluxo magnético, com referência direta á metalografia e modelo tridimensional;



Fonte: Adaptado de (RONCHI, 2015; UENO, 2016) e (VESA e RASILO, 2021)

Logo, este material se “adapta” para qualquer requisito de uma aplicação magnética específica (KHAN et al., 2006). Na transição de um meio para outro (Figura 3), os campos eletromagnéticos sofrem descontinuidades e, conseqüentemente, não são diferenciáveis, no entanto, é possível derivar as condições de transmissão de campos (DAUTRAY; LIONS, 87).

Figura 3 – (Esquemático) exemplo de encapsulamento do granulado férrico no processo carbonila com indicação de camadas protetoras e indicações térmicas de processo de fabricação;



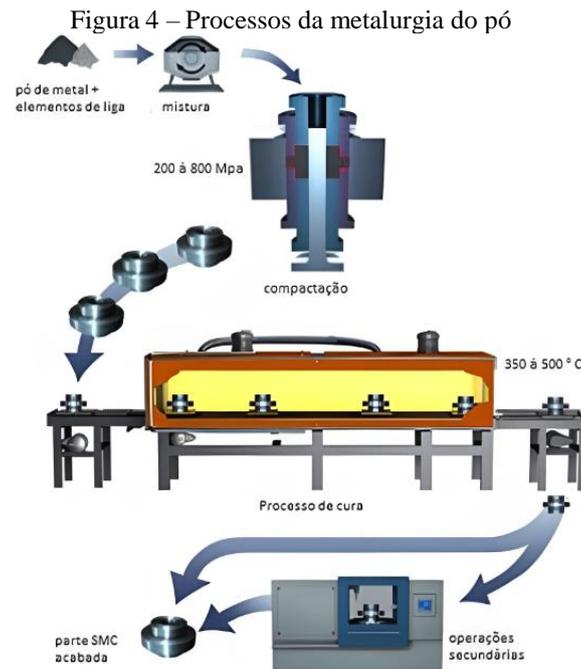
Fonte: Adaptado de (RONCHI, 2015; UENO, 2016) e (VESA e RASILO, 2021)

A influência da camada isolante é vista em altas frequências onde o que norteia o ideal comportamento e, a eficiência é atendida no tratamento das correntes parasitas para as perdas totais no núcleo (NEAMU et. al, 2012). Para geometrias de núcleo de máquinas, não se há apenas campos alternados, mas também rotativos, os quais comparecem com mecanismos de perda, a permeabilidade do SMC ainda é menor do que aço eletromagnético convencional, neste particulado de pó de ferro eletricamente isolado, tem-se baixa perda isotropia magnética e, térmica, como circunstante (LIU et al., 2016). O material SMC junto com o processo da metalurgia do pó (M/P) oferecem vantagens de maneira a permitir a formação de complexos magnéticos microestruturais (KHAN et al., 2006; WU et al., 2020). Em comparação com os aços elétricos os SMC's têm-se as seguintes vantagens, tornando-os adequados para topologias especiais (SCHOPPA; DELARBRE, 2014):

- Alta densidade de potência para condução de fluxo 3-D;
- Redução de perdas em frequências altas;
- Formas complexas e, de boa formabilidade, que podem ser compactadas sem deteriorar as propriedades magnéticas;
- Melhora do comportamento magnetizante;
- Melhora na polarização de saturação;
- Melhora da resistência mecânica por meio de compactação e cura, bem como na adição de lubrificantes

## 2.2 METALURGIA DO PÓ (M/P)

A Metalurgia do Pó (M/P), se objetiva na confecção dos processos com uso de pó metálico, bem como sua transformação através de etapas, tais como compactação e sinterização, (Figura 4), por exemplo, resultando em projetos de elevada precisão dimensional (KORDECKI et al., 1982; SUNDAY; TAHERI, 2017).



Fonte: Adaptado de (SUNDAY; TAHERI, 2017)

Distingue-se este, dos processos metalúrgicos convencionais, com as seguintes indicações (PIETSCH 2005):

- Produção, normalmente, sem necessidade de pós-ajustes/operações;
- Peças com características geométricas desafiadoras de se obter, comparado a outros processos metalúrgicos;
- Possibilidade de produção em larga escala;
- Sinterização abaixo da temperatura de recristalização da liga considerada; Ainda, no que tange às desvantagens, é conveniente destacar (MORO, 2007):
- Técnica onerosa, ante ao custo inicial do ferramental, forçando alta produtividade, dado o viés da capacidade;
- Limitações de tamanho e forma, de maneira à sempre haver necessidade de viabilizar a extração da matriz do processo final de compactação;
- Para casos de aplicações de alta solicitação mecânica, deve-se eliminar a porosidade

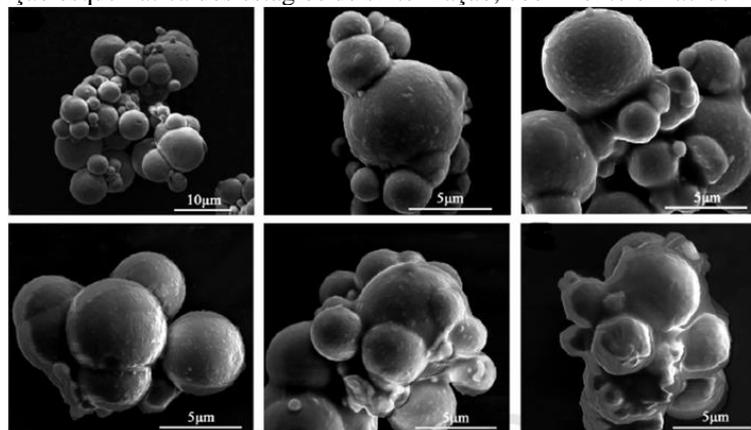
Para o processamento em (M/P), segue-se com a mistura dos pós, e, tão logo, parte-se na compactação nas matrizes onde adquirem o formato desejado. Após, tem-se a necessidade da sinterização, onde, adquire o projeto, as qualidades de resistência mecânica (COLTON, 2009).

### 2.3 PROCESSO DE SINTERIZAÇÃO PARA METALURGIA DO PÓ M/P

Os compósitos metálicos, não estão comumente em equilíbrio químico expostos na atmosfera ambiente, ou seja, a sinterização nestas condições resulta em altas “energias de processo”, devido à relação de grandes superfícies de contato entre grãos e, desenvolvendo assim, alta reatividade química no processo. A sinterização, ainda fica condicionada das fases presentes, cujos sistemas podem constituir além do estado sólido, estado ativado, fase líquida persistente/transitório e, ainda, reativa (GERMAN, 2013).

No geral, ao tratamento térmico de um pó, a uma temperatura abaixo do ponto de fusão do principal constituinte, objetivando aumento da ligação entre partículas dá-se a determinação de sinterização (ISO 3252). Conforme (Figura 5), inicialmente, no pressionado (verde), as partículas se encontram numa condição de “contatos de pressão”, passando-se para contatos de interpartículas metálicas onde são formados regiões de pescoço e, passam a crescer, nestas interpartículas a porosidade ainda estará interconectada, embora ainda abertas, no estágio posterior, um “encolhimento” rápido ocorre e, os poros são fechados (DLAPKA et al., 2010; LI et al., 2020).

Figura 5 – Descrição esquemática dos estágios de sinterização, cobrimento em ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ );



Fonte: (Li et al., 2020)

Para com o produto final, o intuito norteador é a eliminação de defeitos, entre os quais, a superfície é o fator dominante, ou seja, este sistema dito “disperso” minimiza sua “energia de processo”, principalmente atuando na redução de sua superfície. Esta é uma razão pela qual os pós-metálicos de “grão grosso” podem ser sinterizados, pois possuem alta “energia de superfície”, enquanto que, para cerâmicos serão necessários pós-finos, em contrapartida em polímeros, necessita-se acondicionamento de pressão externa (SCHATT; WIETERS, 1997; LI et al., 2020). No caso da formação de ligas, a direção

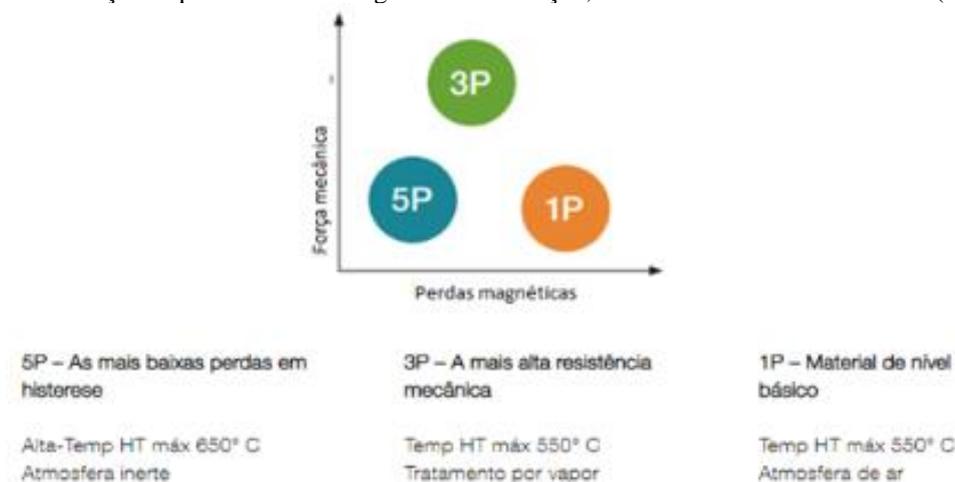
das forças inter-grão e, especialmente a entropia de mistura, são muito superiores aos efeitos da energia superficial, portanto, há a formação de novos poros durante a difusão mútua (“efeito Kirkendall”) (SAVITSKIJ, 1993).

Para Tontini et al. (2019), nano partículas de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) dispersas em silicato de sódio (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) permitem aquecimento na etapa de tratamento térmico até 600 °C, aliviando o estresse, mantendo-se a resistividade elétrica alta e consequente baixo nível de perdas dinâmicas.

## 2.4 SOMALOY®

Desde 1990, a empresa Högånäs tem desenvolvido o SMC Somaloy®, que se resume num composto magnético isotrópico para aplicações eletromagnéticas, baseado em partículas de ferro revestido com camadas organo/inorgânicas. A fabricação de componentes a partir deste é baseada no processo de metalurgia do pó (M/P), e, cada produto (Figura 6) possui propriedades que possuem relação direta com seu desempenho ideal em suas componente e aplicação.

Figura 6 – Descrição esquemática dos estágios de sinterização, cobrimento em ácido fosfórico (H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>);



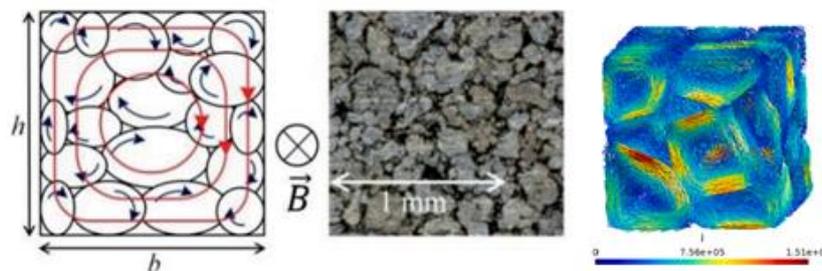
Fonte: (Högånäs, 2020)

Máquinas de fluxo axial feitas com Somaloy® possuem características em ser compactas, econômicas e oferecerem alto desempenho, dados conceitos dos ideais designs, ainda, a alta potência e densidade de torque destes, adjunto a visão de processos simplificados e automatizados com baixo investimento a longo prazo. Ainda, o tratamento térmico para Somaloy 700 1P, segundo fabricante, é feito utilizando ar como atmosfera (temperatura fixa em 530 °C, por 30 minutos), para Somaloy 700 3P, em que, é realizado em duas etapas, variando diretamente com a densidade do material.

Inicialmente com a atmosfera de ar, e, posteriormente, utilizando-se atmosfera de nitrogênio segue-se e, para Somaloy 700 5P, (HÖGANÄS, 2020).

A indução magnética do SMC, possui proporção direta com a densidade do compósito, assim, a indução de saturação de altas densidades tange valores próximos ao laminado de grão não orientado, ainda, referente às perdas, temos as dadas por ciclos de histerese e, correntes parasitas (Figura 7). Numa comparação direta, o SMC possui perdas maiores no ciclo de histerese e, perdas menores, referente às correntes de Foucault, comparada à metodologia hoje empregada (LANDGRAF 2002).

Figura 7 – Correntes parasitas em SMC (esquerda), detalhe de SMC (centro) e, efeito simulado (direita);



Fonte: (DOERING et al., 2015; VESA e RASILO, 2021)

## 2.5 ELEMENTOS FINITOS APLICADOS Á MÁQUINAS ELÉTRICAS

Durante o processo computacional para a coleta dos comportamentos de materiais SMC, nota-se que estes não podem ser medidos diretamente in loco, entretanto desempenham um papel importante na modelagem, evidenciando características de resistividade e permeabilidade ante magnetizar as partículas do material específico, todavia, os cálculos precisam parer com as medições de perdas dependentes de frequência e permeabilidade efetiva (VESA e RASILO, 2021). Assim, tem-se a análise em elementos finitos em funções de base nodal, de borda, faceta e volume, com quais os espaços discretos associados serão representados, ficam anexos à interpretação geométrica destas funções que, são feita então, com uso de tetraedros no intuito de discretizar o modelo. Assim, é passível de amostra, que o escalar e campos de vetores, introduzidos nas formulações, possam ser expressos por meio de funções. As propriedades dos espaços discretos são apresentados com base no conceito de incidência, este, permite operadores discretos, que são os equivalentes vetoriais no domínio contínuo, a serem introduzidos no modelo finito (BASTOS; SADOWSKI, 2005).

A partir do ponto a ser resolvido, seja de ordem eletrostático, eletrocinético ou magnetostático, há de se buscar dois campos vetoriais definidos por uma divergência, em

condições rotacionais e, de contorno. Procura-se assim, um campo vetorial que cumpra apenas uma derivada parcial e, a condição de contorno associada, o campo assim obtido é o campo admissível. Para ser a solução do problema, esse deve gerar, através da lei de comportamento, um segundo campo, que, deve cumprir com a próxima sucessiva equação e a conseqüente condição limite (BASTOS; SADOWSKI, 2005). Durante a estima das propriedades magnéticas de SMC, tem-se que, são apurados por modelos semi-analíticos de homogeneização, tanto o comportamento magnético quanto o nível de perdas, para frequências mais altas, com comportamento magnético não linear, assim, modelos numéricos são necessários, e, uma melhoria dos modelos no futuro seria a se considerar a aleatoriedade nos tamanhos e formas de inclusão (CORCOLLE et al., 2021).

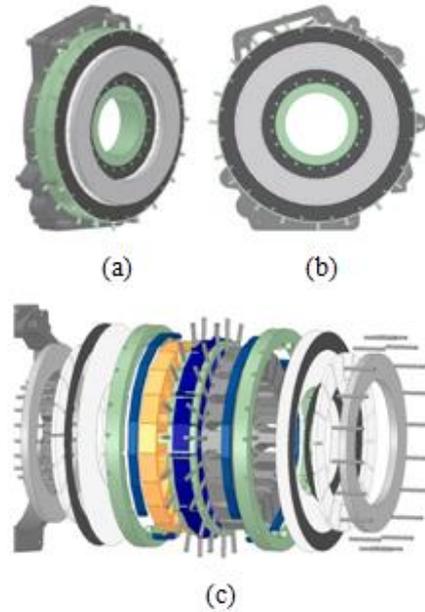
Todavia, embora novas tipologias de fluxo axial tenham muitas vantagens, tal como alta densidade de torque, comprimento axial mais curto e, alta eficiência, sua construção ainda é um desafio, pois, dada à alta força axial entre estator e rotores, que, pode aumentar ainda mais pelas tolerâncias de fabricação e montagem a serem simuladas nos modelamentos matemáticos, além de, análises quanto estresse, deformação, qualidades térmicas e modais (ZHANG et al., 2015).

### **3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

#### **3.1 ANÁLISE EM ELEMENTOS FINITOS DOS POLOS DA MÁQUINA**

A máquina final com detalhes de montagem para visualização das características de duplo rotor vinculada ao estator interno, com seus núcleos dispostos radialmente segue na imagem abaixo.

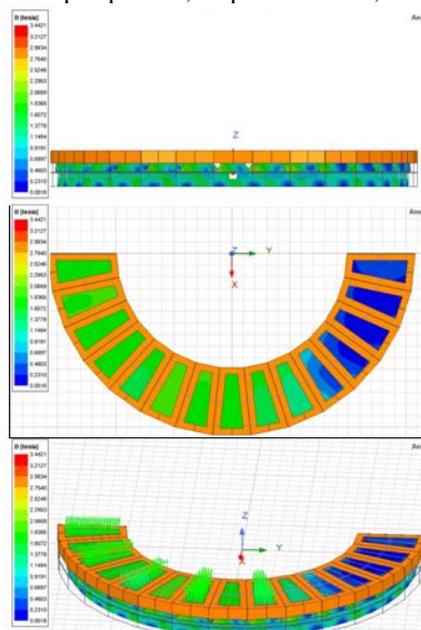
Figura 8 – Detalhamento das partes da máquina, (a) vista perfil, (b) vista lateral e, (c) montagem;



Fonte: do Autor (2022)

Ferramentas de elementos finitos realizam o convergimento das estruturas ditas “ótimas” atreladas as geometrias limites para com as dimensões de partes de rotor e estator. Ainda, partiu-se com as seguintes simulações, sendo o modelo disponibilizado pelo LMEAE-UFRGS, que comprovam refino das estruturas construídas com a disposição dos caminhos de fluxo magnético para o modelo matemático final (Figuras 9 a 11).

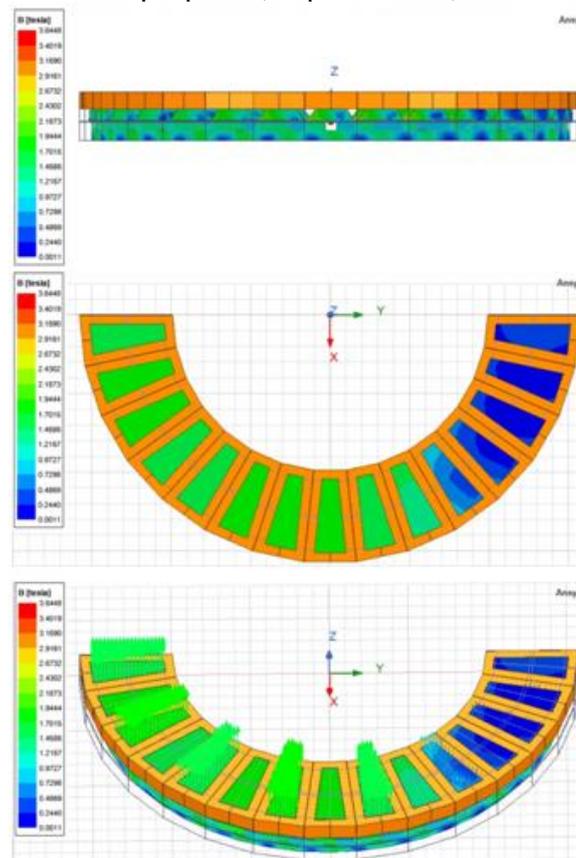
Figura 9 – Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 1P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;



Fonte: do Autor (2022).

Acima se segue simulada a máquina com material Somaloy® 700 1P, e, tem-se que o fluxo máximo que se aproxima de 2,29 T. Ainda visualiza-se a divisão das fases da máquina com a variação na concatenação do fluxo pela geometria dos edentamentos.

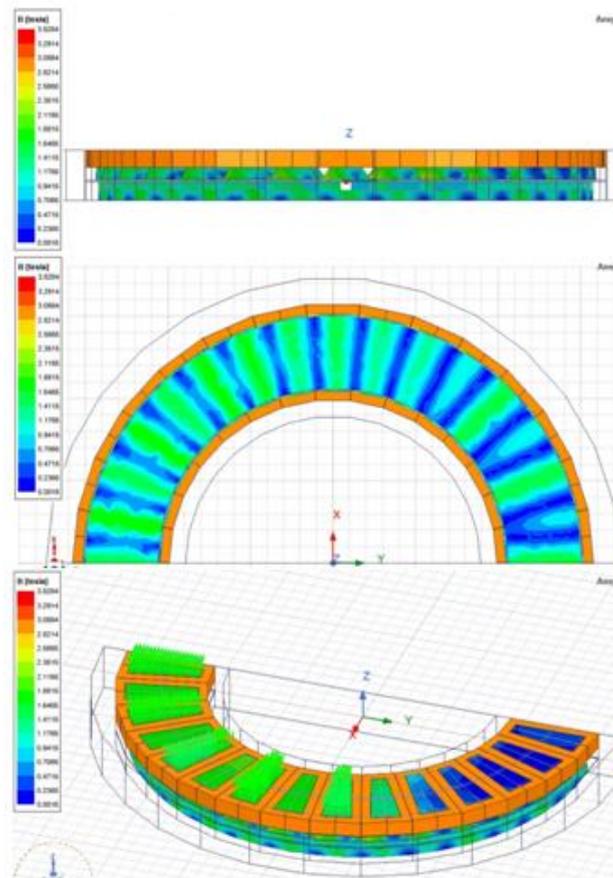
Figura 10 – Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 3P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;



Fonte: do Autor (2022).

Acima se segue simulada a máquina com material Somaloy® 700 3P, e, tem-se que o fluxo máximo que se aproxima de 2,43 T. Ainda visualiza-se a divisão das fases da máquina com a variação na concatenação do fluxo pela geometria dos edentamentos.

Figura 11 – Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 5P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;



Fonte: do Autor (2022).

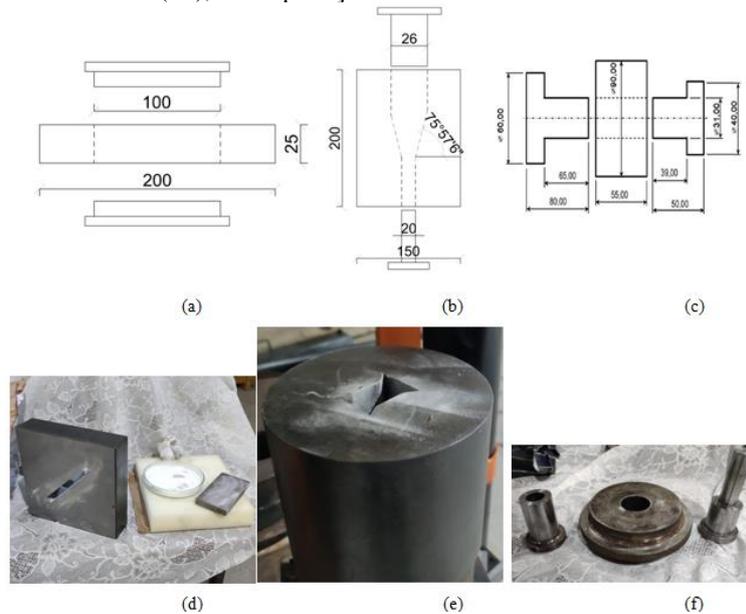
Acima se segue simulada a máquina com material Somaloy® 700 5P, e, tem-se que o fluxo máximo que se aproxima de 2,35 T. Ainda visualiza-se a divisão das fases da máquina com a variação na concatenação do fluxo pela geometria dos edentamentos.

Logo, a análise fomenta a rota de material a qual se deseja como característica principal ao desempenho de projeto, além de dispor os caminhos de fluxo em determinado instante de tempo.

### 3.2 DESENVOLVIMENTO DAS COMPACTAÇÕES E RESULTADOS DE MICROSCOPIA

A escolha do aço do ferramental partiu dentre as possibilidades disponibilizadas pelo PPGE3M-UFRGS (Aço tipo H13) para concepção destes ferramentais, daos seu uso como material comum para o fim, dada ainda as matrizes do caracterizador e pólo, respectivamente, tem-se na (Figura 12) ambos os projetos, caracterizador e pólo. Para a avaliação das propriedades do compósito se fez necessária à confecção de corpos de prova, onde serão avaliadas características magnéticas do material.

Figura 12 – Projeto e executadas das matrizes, amostrador (a/d), pólo do estator (b/e), e, anel de Rowland (c/f), com aplicação de estearato de zinco.



Fonte: do Autor (2022).

A matriz (Figura 12a) é utilizada para o levantamento da curva de histerese e magnetização do material, fornecendo valores de indução de saturação, permeabilidade magnética e coercitividade, enquanto a matriz (Figura 12b) tornar-se-á o objeto pretendido deste trabalho e, a matriz (Figura 12c) será a caracterizadora para loop de histerese. Após processo de compactação (peça verde) e, subsequente tratamento térmico (peça curada/sinterizada) segue-se com as análises de metalografia visando o atendimento pleno para a futura construção da máquina elétrica.

As Figuras 13 até 16 apresentam as metalografias das ligas estudadas e sua conformação de grãos. Conforme pode ser observado nas microestruturas, há-se uma densificação e total ausência de vazio (ar), confirmando os resultados da caracterização magnética que possuem dependência direta no distanciamento intergrão. A liga Somaloy® 700 3P apresentou formação de contorno de grão grosseiro, possivelmente pelo gradiente de compactação, dado que a matriz utilizada para a confecção foi de simples ação. O que se pode analisar além de fatores de forma e acomodação, são os produtos da cura com o ensaio EDS na amostra embutida (Figura 13). Como pode ser observado as maiores composições estão entre ferro e carbonato de cálcio, tal que, para todas as amostras, quanto á legenda das imagens, C é o composto  $\text{CaCO}_3$ , O é o composto  $\text{SiO}_2$ , P é P e, Fe é o composto Fe.

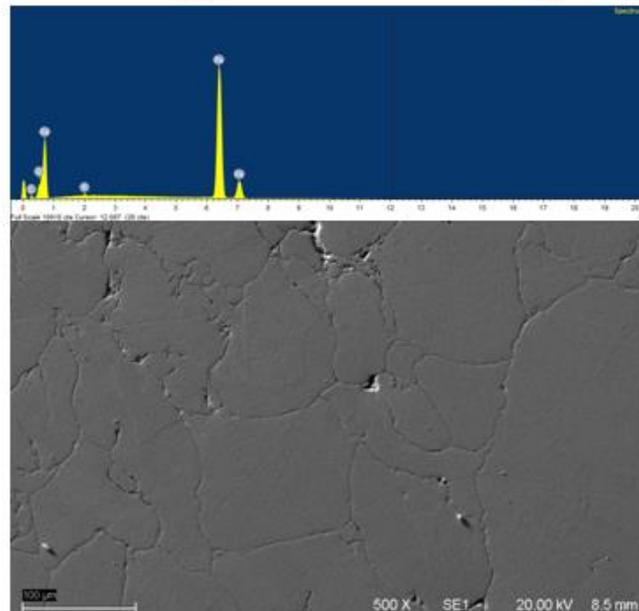
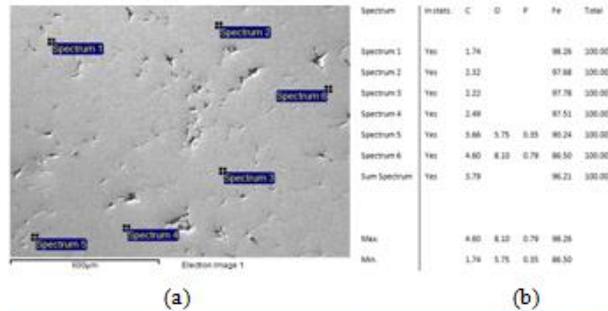
Figura 13 – (a) Polo e, (b) frações embutidas para análise de Somaloy® 5P, 3P e, 1P respectivamente em sentido horário (amostras embutidas, lixadas e polidas com pasta diamantada).



Fonte: do Autor (2022).

A seguir seguem-se resultados de microscopia de varredura dos materiais avaliados:

Figura 14 – Análise metalográfica (Somaloy® 700 1P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c).

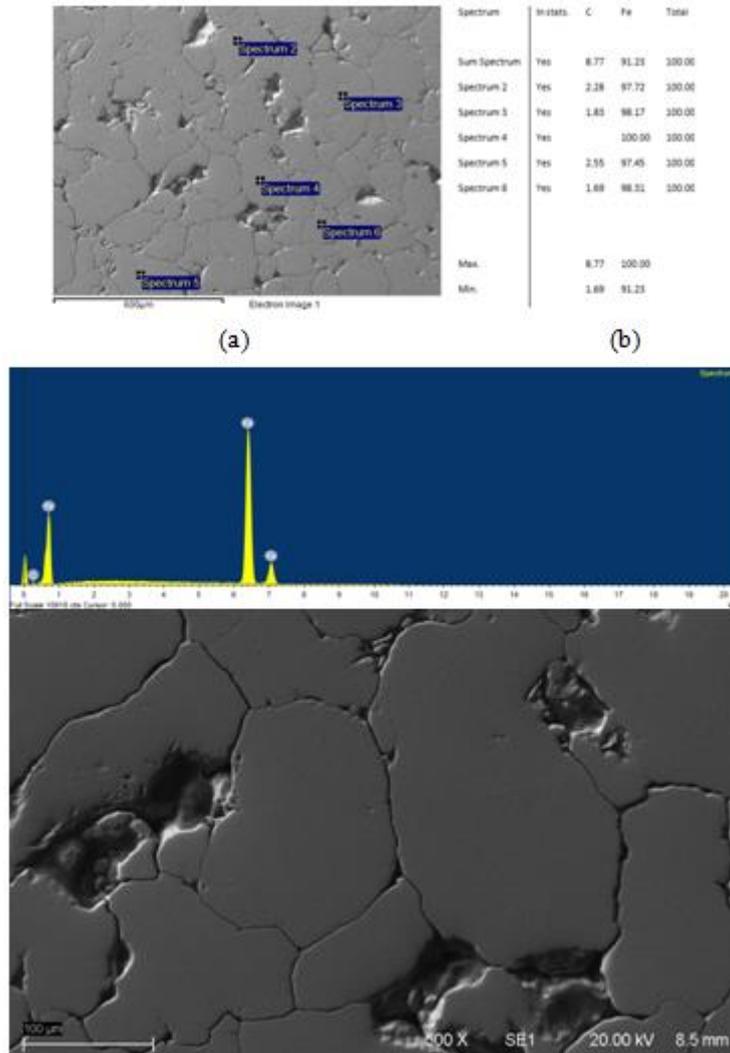


Fonte: do Autor (2022).

Acima se segue a vista em microscópio do material Somaloy® 700 1P, e, tem-se sua organização entre grãos, assim como composição resumida dos produtos de cura térmica. Como pode ser observado as maiores composições se são entre ferro e

carbonato de cálcio, tal que, para todas as amostras C é o composto  $\text{CaCO}_3$ , O é o composto  $\text{SiO}_2$ , P é P e, Fe é o elemento Fe.

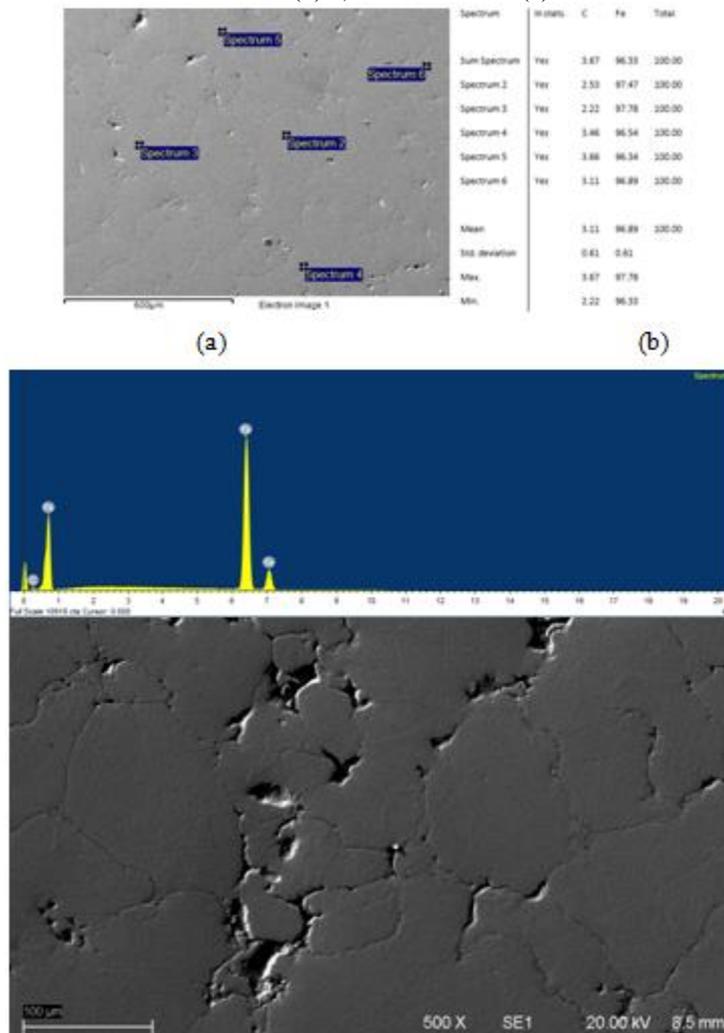
Figura 15 – Análise metalográfica (Somaloy® 700 3P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c).



Fonte: do Autor (2022).

Acima se segue a vista em microscópio do material Somaloy® 700 3P, e, tem-se sua organização entre grãos, assim como composição resumida dos produtos de cura térmica. Como pode ser observado as maiores composições se são entre ferro e carbonato de cálcio, tal que, para todas as amostras C é o composto  $\text{CaCO}_3$ , O é o composto  $\text{SiO}_2$ , P é P e, Fe é o elemento Fe.

Figura 16 – Análise metalográfica (Somaloy® 700 5P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c).



Fonte: do Autor (2022).

Acima se segue a vista em microscópio do material Somaloy® 700 5P, e, tem-se sua organização entre grãos, assim como composição resumida dos produtos de cura térmica. Como pode ser observado as maiores composições se são entre ferro e carbonato de cálcio, tal que, para todas as amostras C é o composto  $\text{CaCO}_3$ , O é o composto  $\text{SiO}_2$ , P é P e, Fe é o elemento Fe.

Aos resultados que se compunham teve-se a disposição dos produtos de cura no que procede ao entregrão, logo são visuais que os grãos não se tocam, garantindo a mitigação dos efeitos parasitários clássicos e, tornando-se a garantia que o processo teve êxito no que tange á produção das geometrias em metalurgia do pó, pois, atreladas ás características da ideal acomodação do material, é visual a não disposição de “pontes” entre os grãos que compunha a característica de vazios, extremamente prejudicial ao desempenho em aplicações de máquinas. Ainda, revelam-se pistas para rotas ante a

produção de pesquisa em novos pós-análogos dados materiais encontrados via EDS, possibilitando-se aumento no desempenho/tecnologia na produção de materiais para aplicações mais específicas.

### 3.3 ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

As amostras em forma de anel possuem um enrolamento primário e um secundário para acoplamento no equipamento, assim a intensidade de campo  $H$  foi calculada a partir da corrente no enrolamento primário, e, o enrolamento secundário foi conectado ao medidor para aferição da densidade de fluxo  $B$ . A velocidade de medição foi controlada para que a variação da densidade de fluxo  $B$  permanecesse quase constante. Na determinação das curvas caracterizadoras, os seguintes fatores foram observados para com o desempenho de máquinas elétricas ante os materiais imputados:

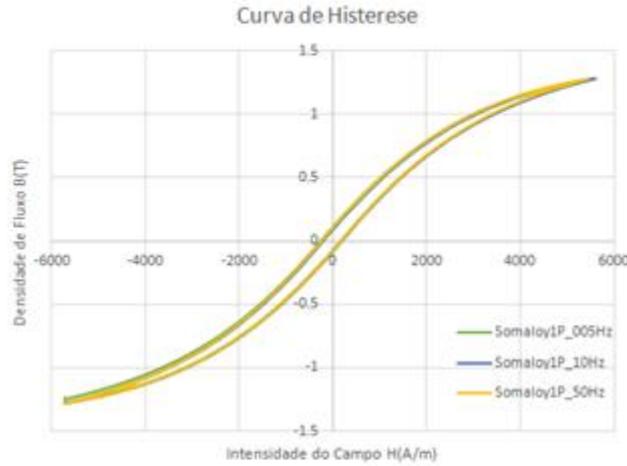
- Elevada Permeabilidade Magnética: Em um motor elétrico, o torque desenvolvido na ponta de eixo é proporcional ao fluxo magnético de entreferro, logo, as amostras cunham a desempenham o maior campo magnético possível;
- Elevada Indução de Saturação: Quanto maior a indução de saturação das amostras, maior será o fluxo de entreferro da máquina;
- Baixas Coercitividade e Retentividade: Visualmente, o ideal, é o loop de histerese se aproximar de uma reta, ou seja, as amostras possuíram baixas energias remanentes e consequentes menores perdas;
- Elevada Resistividade Elétrica: a tensão de alimentação da máquina induz correntes no núcleo, as conhecidas correntes parasitas, por este motivo, para atenuar os efeitos das correntes parasitas aplicaram-se ao estudo as ligas de metal macio que apresentam alta resistividade.

## 4 RESULTADOS E DISCUSÕES

### 4.1 ANÁLISE DO LOOP DE HISTERESE

Assim, as propriedades magnéticas são analisadas a partir da curva de histerese, em que se tem o campo magnético  $H$  aplicado a um material com indução magnética  $B$  resultante conforme se segue:

Figura 17 – Loop de histerese (Somaloy® 700 1P).

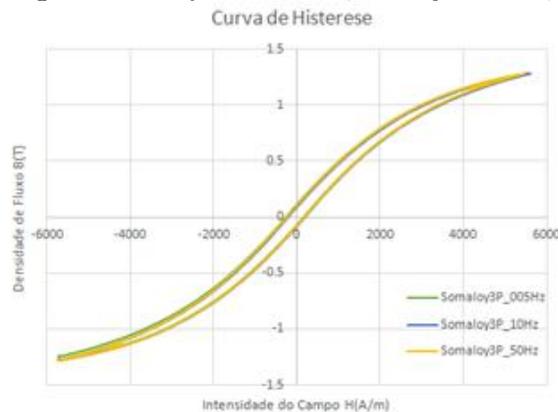


Somaloy1P_005Hz	Somaloy1P_10Hz	Somaloy1P_50Hz
Ensaio de Histerese #2022-07-26 14:51:44#	Ensaio de Histerese #2022-07-26 14:50:09#	Ensaio de Histerese #2022-07-26 14:54:05#
Densidade de espiras no primario: 1165	Densidade de espiras no primario: 1165	Densidade de espiras no primario: 1165
Numero de espiras no secundario: 193	Numero de espiras no secundario: 193	Numero de espiras no secundario: 193
Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025
Densidade (kg/m3): 7639	Densidade (kg/m3): 7639	Densidade (kg/m3): 7639
Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5
Escala do fluximetro: 0.03	Escala do fluximetro: 0.03	Escala do fluximetro: 0.03
Frequencia: 0.05	Frequencia: 10	Frequencia: 60
Numero total de pontos: 1326	Numero total de pontos: 510	Numero total de pontos: 509
Numero de pontos p/ perdas: 1326	Numero de pontos p/ perdas: 493	Numero de pontos p/ perdas: 405
Perdas: 899.5604 J/m3	Perdas: 790.3494 J/m3	Perdas: 820.186 J/m3

Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se o loop de histerese para Somaloy® 700 1P para frequências de 0,05, 10 e 50 hz, ao qual se vê comportamento análogo e, nível de perdas na faixa média de 800J/m<sup>3</sup>.

Figura 18 – Loop de histerese (Somaloy® 700 3P).

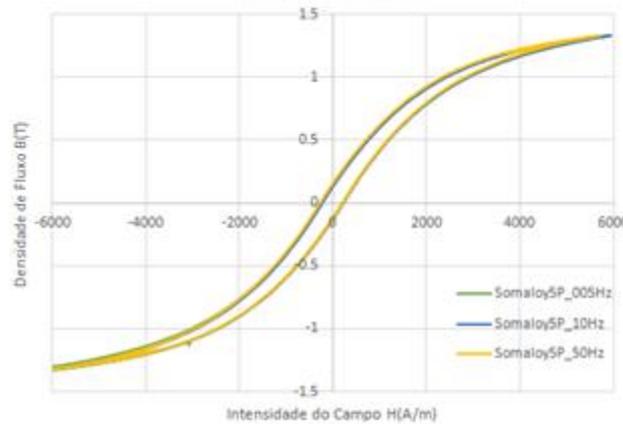


Somaloy3P_005Hz	Somaloy3P_10Hz	Somaloy3P_30Hz
Somaloy 3P 2807 Ensaio de Histerese #2022-07-27 10:52:24#	Somaloy 3P 2807 Ensaio de Histerese #2022-07-27 10:53:59#	Somaloy 3P 2807 Ensaio de Histerese #2022-07-27 10:55:38#
Densidade de espiras no primario: 1165	Densidade de espiras no primario: 1165	Densidade de espiras no primario: 1165
Numero de espiras no secundario: 234	Numero de espiras no secundario: 224	Numero de espiras no secundario: 224
Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025
Densidade (kg/m3): 7630	Densidade (kg/m3): 7630	Densidade (kg/m3): 7630
Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5
Escala do fluximetro: 0.0300003	Escala do fluximetro: 0.0300003	Escala do fluximetro: 0.0300003
Frequencia: 0.05	Frequencia: 10	Frequencia: 50
Numero total de pontos: 1320	Numero total de pontos: 509	Numero total de pontos: 510
Numero de pontos p/ perdas: 1320	Numero de pontos p/ perdas: 493	Numero de pontos p/ perdas: 415
Perdas: 1228.363 J/m3	Perdas: 1480.968 J/m3	Perdas: 3291.594 J/m3

Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se o loop de histerese para Somaloy® 700 3P para frequências de 0,05, 10 e 50 Hz, ao qual se vê comportamento análogo e, nível de perdas na faixa média de 1500J/m<sup>3</sup>.

Figura 19 – Loop de histerese (Somaloy® 700 5P).  
Curva de Histerese



Somaloy5P_005Hz	Somaloy5P_10Hz	Somaloy5P_50Hz
Ensaio de Histerese	Ensaio de Histerese	Ensaio de Histerese
#2022-07-26 15:14:01#	#2022-07-26 15:16:23#	#2022-07-26 15:17:39#
Densidade de espiras no primario: 1247	Densidade de espiras no primario: 1247	Densidade de espiras no primario: 1247
Numero de espiras no secundario: 180	Numero de espiras no secundario: 180	Numero de espiras no secundario: 180
Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025	Secao Transversal: 0.000025
Densidade (kg/m3): 7638	Densidade (kg/m3): 7638	Densidade (kg/m3): 7638
Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5	Escala de corrente: 5
Escala do fluximetro: 0.03	Escala do fluximetro: 0.03	Escala do fluximetro: 0.03
Frequencia: 0.05	Frequencia: 10	Frequencia: 50
Numero total de pontos: 1327	Numero total de pontos: 509	Numero total de pontos: 510
Numero de pontos p/ perdas: 1327	Numero de pontos p/ perdas: 494	Numero de pontos p/ perdas: 405
Perdas: 1271.417 J/m3	Perdas: 1147.903 J/m3	Perdas: 1213.779 J/m3

Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se o loop de histerese para Somaloy® 700 5P para frequências de 0,05, 10 e 50 Hz, ao qual se vê comportamento análogo e, nível de perdas na faixa média de 1200J/m<sup>3</sup>.

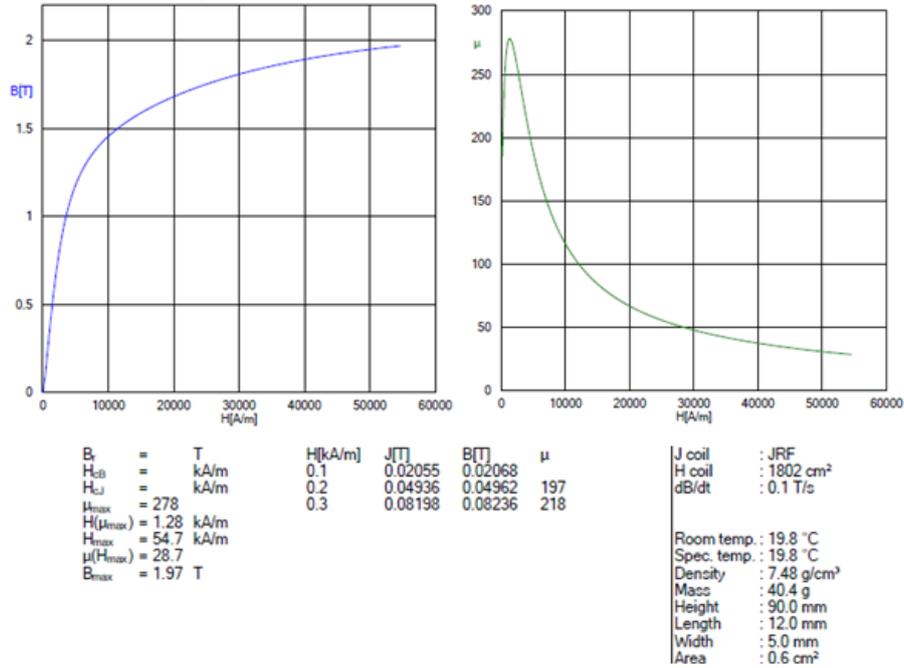
Lendo-se as curvas, que possuem comportamento análogo, mas, ainda assim desempenhos distintos tem-se que o ponto em que a curva corta o eixo de  $B$ , no quadrante superior esquerdo, que, representa a indução magnética residual, é o valor que permanece no produto mesmo após a retirada da bobina, e, o ponto em que a curva corta o eixo de  $H$  é a força coercitiva  $H_c$  e, representa o ponto  $p/$  perdas.

#### 4.2 ANÁLISE DAS CURVAS DE MAGNETIZAÇÃO INICIAL E PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Lendo-se as curvas, que possuem comportamento análogo, mas, ainda assim desempenhos distintos tem-se que o ponto em que a curva corta o eixo de  $B$ , no quadrante superior esquerdo, que, representa a indução magnética residual, é o valor que permanece

no produto mesmo após a retirada da bobina, e, o ponto em que a curva corta o eixo de H é a força coercitiva  $H_c$  e, representa o campo magnético necessário para desmagnetizar. Ainda, seguem-se as caracterizações de magnetização e definições de permeabilidade para as geometrias (Figuras 20 a 22):

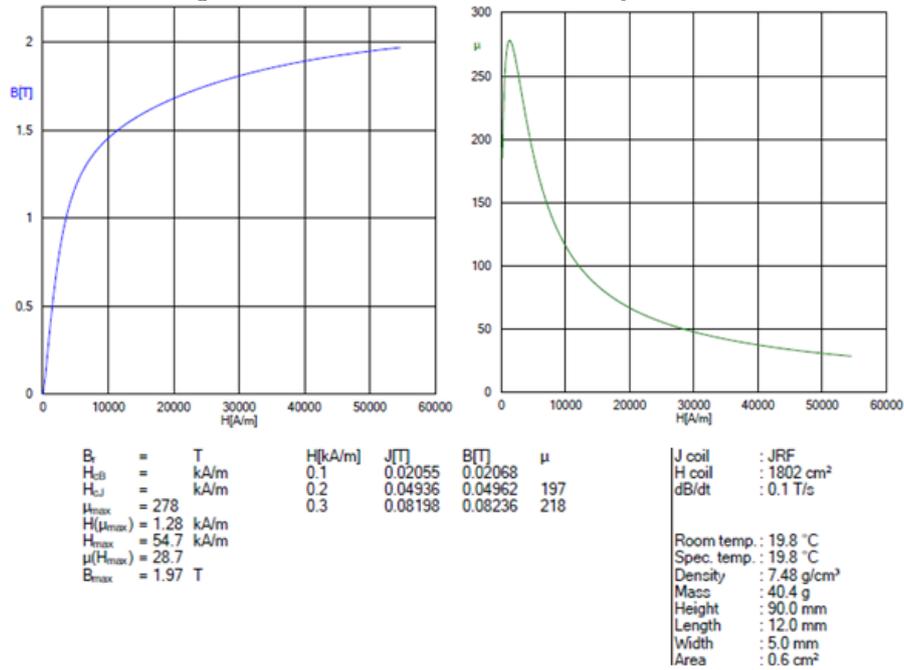
Figura 20 – Dados caracterizados Somaloy® 700 1P;



Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se a curva de magnetização inicial e curva de permeabilidade para Somaloy® 700 1P, sendo a permeabilidade máxima ficou em 278 e,  $B_{max}$ . ficou em 1,97T para o devido processo de fabricação o qual seguiu-se manual do fabricante.

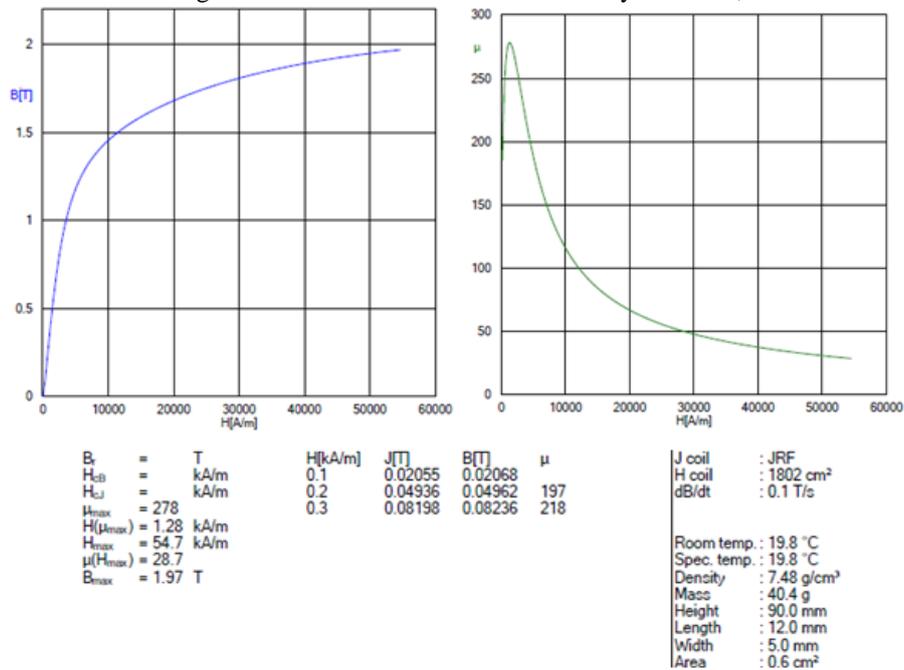
Figura 21 – Dados caracterizados Somaloy® 700 3P;



Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se a curva de magnetização inicial e curva de permeabilidade para Somaloy® 700 1P, sendo a permeabilidade máxima ficou em 278 e, Bmax. ficou em 1,97T para o devido processo de fabricação o qual seguiu-se manual do fabricante.

Figura 22 – Dados caracterizados Somaloy® 700 5P;



Fonte: do Autor (2022).

Acima, tem-se a curva de magnetização inicial e curva de permeabilidade para Somaloy® 700 5P, sendo a permeabilidade máxima ficou em 376 e, Bmax. ficou em 2,00T para o devido processo de fabricação o qual seguiu-se manual do fabricante.

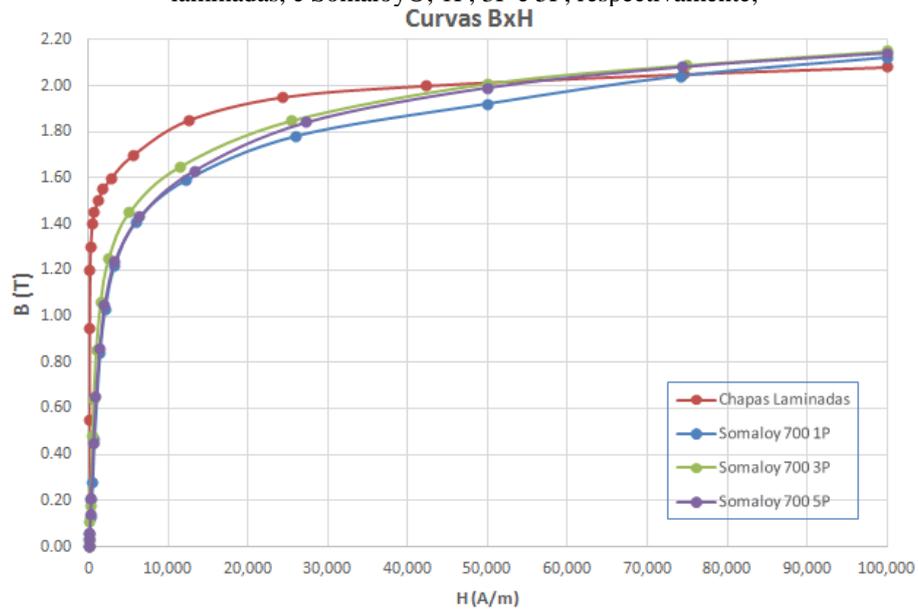
Assim, obtiveram-se resultados análogos ao manual para Somaloy® 700 5P e 1P, enquanto, para 3P, devido á limitações de aplicação da camada oxidante, valores insatisfatórios foram atingidos, cabe de se indicar que as três ligas poderiam compor a máquina, cada qual com suas vantagens e limitações de desempenho, todavia o valor pico de permeabilidade foi encontrado no material 5P. Quanto à liga 3P, a oxidação é parte fundamental para finalização do processo, pois, garante que todo lubrificante se esvaia da geometria, garantindo-se as características ótimas de desempenho mecânico/magnético para tal.

É importante indicar que, antes da medição, as amostras são desmagnetizada, assim, durante o ensaio, um campo magnético AC com amplitude decrescente é gerado, e, o curso de medição é iniciado com a curva de magnetização inicial, seguindo-se para a medição que passa por todo o loop de histerese.

#### 4.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao que se segue, avaliam-se os comportamentos das ligas Somaloy® ante ao composto laminado de grão não orientado comercialmente utilizado (Figura 23), tão logo, tem-se a disposição visual em que, a rota laminada é a comumente mais eficiente, quando da possibilidade em seu uso. Entretanto, atenta-se ao seu limitado uso para geometrias axiais e sua limitação ao fluxo bi dimensional “apenas”, limitação esta vencida pelas ligas macias, dada isotropia comportamental, acarretando em maior liberdade me projeto e desings mais eficientes e compactos.

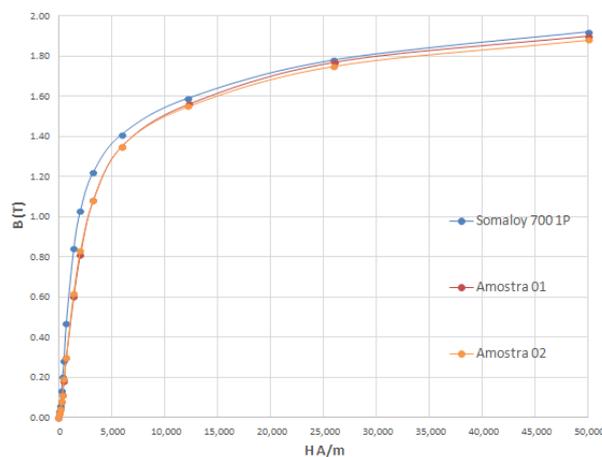
Figura 23 – Desempenho aferido a partir do manual e comparativo entre si dos materiais (Chapas laminadas, e Somaloy®, 1P, 3P e 5P, respectivamente;



Fonte: do Autor (2022).

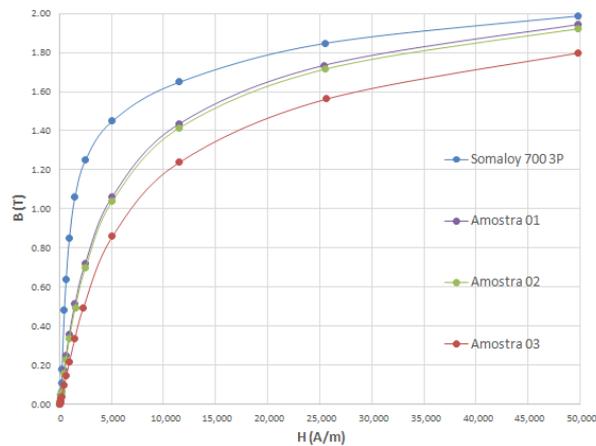
Ao que se segue, têm-se os desempenhos de amostras quanto sua magnetização inicial para com as ligas 1P, 3P e 5P frente ao conferido em manual:

Figura 24 – Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 1P;



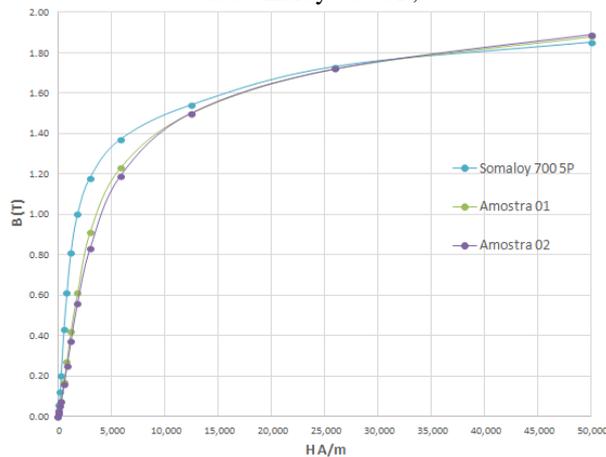
Fonte: do Autor (2022).

Figura 25 – Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 3P;



Fonte: do Autor (2022).

Figura 26 – Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 5P;



Fonte: do Autor (2022).

Assim, os dados evidenciam o comportamento de proximidade se comparado ao composto de chapas de aço silício, dado este ponto, e, é característica de alta produção proferida pelo método de batelada de metalurgia do pó, ao paralelo do processo de eletroerosão, a substituição do processo torna assim, atraente ao emprego em geometrias como a estudada neste trabalho, ainda, como ponto para ter-se um motor competitivo em termos de produção fabril.

Nestes resultados apresentaram-se ainda informações consistentes a respeito da viabilidade do uso de núcleos maciços em máquinas de fluxo axial, uma vez que os dados elétricos e magnéticos foram análogos a estudos anteriores, (PAULETI, 2012), (FERNANDEZ, 2015) e (RONCHI, 2015), a qual se avaliou que, para frequências superiores a 400Hz, os desempenhos dos núcleos em M/P são análogos as chapas laminadas de silício, visto os demasiados/onerosos processos acessórios para o qual usual núcleo laminado e resinado pede.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi analisada a substituição dos núcleos do estator, comumente em chapas laminadas de fluxo unidimensional, pela possibilidade da isotropia tridimensional de comportamento magnético validada pelas análises metalográficas dos núcleos em SMC. Assim, após a compactação e sinterização dos corpos para caracterização, efetuaram-se testes de curvas de histerese e magnetização dos corpos de prova, que refletem o comportamento dos núcleos.

Constatou-se que se os resultados executados se aproximaram da condição do manual, se comparada aos valores referência, sendo que, para 1P, na região de 7500 A/m as variações de B ficaram em 96,66%, para 3P, 83,80%, e, para 5P, 86,20% para o comparativo final dos valores para uso na máquina, assim, os resultados encontrados no desenvolvimento de materiais magnéticos sinterizados forneceram dados consistentes que indicam a possibilidade da aplicação destes núcleos na máquina elétrica preterida pelo LMEAE-UFRGS. Ainda, cabe indicar que, somente os ensaios comparativos entre motores (construídos completos) empregando os núcleos de cada pó poderão fornecer dados que concomitam a conclusão para a utilização final do processo da (M/P) nos núcleos de máquinas elétricas em escala industrial de execução em serie do modelo de fluxo axial.

Ainda, analisando-se a metalografia, tem-se a plena “esfericidade”, ou seja, não visualização de cantos vivos e acomodação ótima dos grãos oriundas do processo de atomização que, garantem a isotropia do material para aplicação em concatenação de fluxo magnético, dado que a compactação não desvirtua a geometria inicial do mesmo, visto que as camadas dos layers atendem plenamente a que foram projetadas na formação e liga entre grãos ativados no processo térmico.

## REFERÊNCIAS

AB, Höganäs. Soft Magnetic Composites. Disponível em: <[www.hoganas.com/](http://www.hoganas.com/)>. Acesso em: 19 fev. 2020.

APPINO, Carlo. Classical eddy current losses in Soft Magnetic Composites. *Journal of Applied Physics*, [s. l.], v. 113, n. Maio, 2014.

BA, Xin et al. An Equivalent Circuit Model for Predicting the Core Loss in a Claw-Pole Permanent Magnet Motor With Soft Magnetic Composite Core. *Ieee Transactions On Magnetics*, [s.l.], v. 54, n. 11, p.1-6, nov. 2018.

BARBOZA, Juliano Soares. Caracterização de Compósitos Magnéticos Macios Desenvolvidos Através da Metalurgia do Pó Aplicados a Núcleos de Máquinas Elétricas. Dissertação. PPGE3M: UFRGS, 2009.

BAS, J.a; CALERO, J.a; DOUGAN, M.j. Sintered soft magnetic materials. Properties and applications. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [s.l.], v. 254-255, p.391-398, jan. 2003.

BASTOS, J. P. A.; SADOWSKI, N.. ELECTROMAGNETIC MODELING BY FINITE ELEMENT METHODS. Florianópolis: Marcel Dekker, Inc., 2003. 497 p.

BOEHM, Andreas; HAHN, Ingo. Comparison of soft magnetic composites (SMCs) and electrical steel. 2nd International Electric Drives Production Conference (edpc), [s.l.], p.1-6, out. 2012.

BIRČÁKOVÁ, Zuzana et al. Preparation and characterization of iron-based soft magnetic composites with resin bonded nano-ferrite insulation. *Journal of Alloys and Compounds*, [s. l.], v. 828, p. 154416, 2020.

CALLISTER JR., W. D. Fundamentos da ciência e engenharia de materiais. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2002.

BRANDBURY, S. Powder Metallurgy Equipment Manual. New Jersey, ISBN, 199p. 1986.

CARUSO, Frank et al. Magnetic Core-Shell Particles: Preparation of Magnetite Multilayers on Polymer Latex Microspheres. *Advanced Materials*, [s.l.], v. 11, n. 11, p.950-953, ago. 1999.

CORCOLLE R., REN X., DANIEL R. Effective properties and eddy current losses of soft magnetic composites. *Journal of Applied Physics*, 129, 015103, jan. 2021.

CHEBAK, A.; VIAROUGE, P.; CROS, J.. Analytical Computation of the Full Load Magnetic Losses in the Soft Magnetic Composite Stator of High-Speed Slotless Permanent Magnet Machines. *Ieee Transactions On Magnetics*, [s.l.], v. 45, n. 3, p.952-955, mar. 2009.

CHIAVERINI, V. Metalurgia do Pó. 3ª ed. Édile Serviços Gráficos e Editora Ltda, São Paulo (Brasil). 352p. 1992.

CULLITY, B. D. e GRAHAM, C. D. Introduction to Magnetic Materials. 2nd. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2009.

DAUTRAY R. ; J.-L. LIONS, Analyse mathématique et calcul numérique pour les sciences et les techniques, Modèles Physiques, Vol. 1, Masson, Paris, 1987.

DANNINGER, H., CALDERON, R. O., MAYER, C. G., Powder metallurgy and sintered materials, Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, pp. 2–51, Weinheim 2017.

DIAS, M. M.; MARTINS, R.M. ; AQUIM, P. M. ; BITTENCOURT, S. D. ; PAULETTI, P. ; SCHAEFFER, L. . Aplicação de Materiais Magnéticos Macios Sinterizados em Máquinas Elétricas Rotativas Síncronas. Revista Tecnologia e Tendências, v. 10, p. 1-29, 2015.

DLAPKA, M., STROBL, S., DANNINGER, H., GIERL, C. Austenite grain size in sinter hardened powder metallurgy steels. Practical Metallography, 47 (12), 686–699, 2010.

ERNST, E., SCHODER, C., ARNHOLD, V., WAHLING, R., BEISS, P. Friction measurements during powder compaction. International Journal of Powder Metallurgy, 23 (2), 1–8, 1991.

FERNANDEZ, F. Desenvolvimento de um estator por metalurgia do pó a ser utilizado em um motor universal. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

GAVRILA, H.; IONITA, V. Crystalline and amorphous soft magnetic materials and their applications – Status of art and chalanges. Journal of Optoelectronics and Advanced Materials v. 4, n. 2, p. 173 – 192, jun. 2002.

GERMAN, R.M., History of sintering–empirical phase. Powder Metallurgy, 56 (2), 117–123, 2013.

GRINDER Olle. Plenary presentation on “Evolution of the European Powertrain–a Focus on PEV and PHEV”, Euro PM 2009.

GOLTZ, E. C. Estudo da máquina elétrica de fluxo axial com duplo rotor e armadura segmentada. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2021.

GUO, Youguang; ZHU, Jian Guo; LIN, Zhi Wei. Measurement and modeling of core losses of soft magnetic composites under 3-D magnetic excitations in rotating motors. Ieee Transactions On Magnetics, v. 41, n. 10, p.3925-3927, out. 2005.

GUO, You Guang; ZHU, Jian Guo. Applications of soft magnetic composite materials in electrical machines. Australian Journal Of Electrical And Electronics Engineering, [s.l.], v. 3, n. 1, p.37-46, jan. 2006.

GUO, Youguang; ZHU, Jian Guo; WATTERSON, P.a.. Comparative study of 3-D flux electrical machines with soft magnetic composite cores. Ieee Transactions On Industry Applications, [s.l.], v. 39, n. 6, p.1696-1703, nov. 2003.

GUO, Y.g.; ZHU, J.g.; ZHONG, J.j.. Measurement and modelling of magnetic properties of soft magnetic composite material under 2D vector magnetisations. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [s.l.], v. 302, n. 1, p.14-19, jul. 2006.

GUO, Y.g. et al. Development of a permanent magnet claw pole motor with soft magnetic composite core. *Australian Journal Of Electrical And Electronics Engineering*, [s.l.], v. 2, n. 1, p.21-30, jan. 2005.

GUO, Youguang; ZHU, Jian Guo; ZHONG, Jinjiang. Measurement and Modeling of Rotational Core Losses of Soft Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Review. *Ieee Transactions On Magnetics*, [s.l.], v. 44, n. 2, p.279-291, fev. 2008.

GUO, Y.g. et al. Development of a permanent magnet claw pole motor with soft magnetic composite core. *Australian Journal Of Electrical And Electronics Engineering*, [s.l.], v. 2, n. 1, p.21-30, jan. 2005.

HEMMATI, I.; HOSSEINI, H.r. Madaah; KIANVASH, A.. The correlations between processing parameters and magnetic properties of an iron–resin soft magnetic composite. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [s.l.], v. 305, n. 1, p.147-151, out. 2006.

IANCU V., Soft Magnetic Composites Used for the Iron Core of the Electrical Machines. Technical University of Cluj-Napoca, 400020 Cluj-Napoca, 15 Daicoviciu, Romania. p. 1-4.

ISHIKAWA Takeo, SHIGEYOSHI Sato, SYUNSUKE Takeguchi, AKIRA Matsuo. Design of a DC Motor Made of Soft Magnetic Composite Core by the Experimental Design Method. *Ieee Transactions On Magnetics*, [s.l.], v. 48, n. 11, p.3132-3135, nov. 2012.

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, 2016.

ISO 3252. Powder Metallurgy — Vocabulary, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 1999.

ISO 4490. Metallic powders – Determination of flow rate by means of a calibrated funnel (Hall flowmeter), International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2014.

ISO 3923-1. Metallic powders – Determination of apparent density – Part 1: Funnel method, International Standards Organization, Geneva, Switzerland, 2008.

JILES, D. Introduction to Magnetism and Magnetic Materials. London: Chapman and Hall, 440p. 1991.

KAYSSER, W.A. and WEISE, W. Powder Metallurgy and Sintered Materials, in Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co KGaA, Weinheim, 2000.

KHAN, M.; DOSIEK, L.; PILLAY, P.. Design and Analysis of a PM Wind Generator with a Soft Magnetic Composite Core. 2006 Ieee International Symposium On Industrial Electronics, [s.l.], p.2522-2528, jul. 2006.

KHAN, M.a.; CHEN, Y.; PILLAY, P.. Application of soft magnetic composites to PM wind generator design. 2006 Ieee Power Engineering Society General Meeting, [s.l.], p.1-4, 2006.

KORDECKI, A.; WEGLIŃSKI, B.; KACZMAR, J.. Properties and Applications of Soft Magnetic Powder Composites. Powder Metallurgy, [s.l.], v. 25, n. 4, p.201-208, jan. 1982.

LANDGRAF, F. J. G. et al. Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. Aços: perspectivas para os próximos, Journal of Magnetism and Magnetic Materials v. 10, p. 109-128, 2002.

LAXMINARAYANA T. A. et al. Study of AC magnetic properties and core losses of Fe/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-epoxy resin soft magnetic composite. 20th International Conference on Magnetism. Volume 75, p.1396–1403, 2015.

LI, Kaili, CHENG Danni, YU Hongya, LIU Zhongwu. Process optimization and magnetic properties of soft magnetic composite cores based on phosphated and mixed resin coated Fe powders. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 501, p.166455-166485, mai. 2020.

LI, Yongjian; LIU, Yafeng; LIU, Fugui. Magnetic Anisotropic Properties Measurement and Analysis of the Soft Magnetic Composite Materials. Ieee Transactions On Applied Superconductivity, [s.l.], v. 24, n. 5, p.1-4, out. 2014.

LI, Y., et al.,. Rotational Core Loss of Silicon Steel Laminations Based on Three-Dimensional Magnetic Properties Measurement. p.1-5, no. 4, art. 8201205. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016.

LI, Yongjian et al. Magnetic Properties Measurement of Soft Magnetic Composite Materials Over Wide Range of Excitation Frequency. Ieee Transactions On Industry Applications, [s.l.], v. 48, n. 1, p.88-97, jan. 2012.

LIEW, G.s. et al. Analysis of a Segmented Brushless PM Machine Utilising Soft Magnetic Composites. Iecon 2007 - 33rd Annual Conference Of The Ieee Industrial Electronics Society, [s.l.], p.1268-1274, 2007.

LIN, G.q. et al. Influence of demagnetizing field on the permeability of soft magnetic composites. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 305, n. 2, p.291-295, out. 2006.

LIN, Z.w.; ZHU, J.g.. Three-dimensional magnetic properties of soft magnetic composite materials. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 312, n. 1, p.158-163, maio 2007.

LIN, Zhi Wei et al. Magnetic properties of soft magnetic composites under three-dimensional excitations. International Journal Of Applied Electromagnetics And Mechanics, [s.l.], v. 25, n. 1-4, p.237-241, 10 maio 2007.

LIN, Z. W. et al. Three-dimensional hysteresis of soft magnetic composite. Journal Of Applied Physics, [s.l.], v. 99, n. 8, p.1-4, 15 abr. 2006.

LIU, Chengcheng; LIU, Qainyu; WANG, Shaopeng; WANG, Youhua; LEI, Gang; GUO, Youguang; ZHU, Jianguo. A novel flux switching claw pole machine with soft magnetic composite cores. *International Journal Of Applied Electromagnetics And Mechanics*, [S.L.], v. 67, n. 2, p. 183-203, 5 out. 2021.

LIU, Chengcheng et al. Comparative Study of Small Electrical Machines With Soft Magnetic Composite Cores. *Transactions On Industrial Electronics*, [s.l.], v. 64, n. 2, p.1049-1060, fev. 2017.

LOUREIRO, L. T. d. R., Um estudo sobre a máquina torus, Porto Alegre - Brasil: Tese doutorado, PPGE3M - UFRGS, 2008.

LUNA, Wilberth Harold Deza. Desenvolvimento de Ímãs de Nd-Fe-B Aplicados em Máquinas Elétricas (Motores). Tese. PPGE3M: UFRGS, 2012.

MALOBERTI, Olivier et al. 3-D-2-D Dynamic Magnetic Modeling of an Axial Flux Permanent Magnet Motor With Soft Magnetic Composites for Hybrid Electric Vehicles. *Ieee Transactions On Magnetics*, [s.l.], v. 50, n. 6, p.1-11, jun. 2014.

MEUNIER, Gerard. *The Finite Element Method for Electromagnetic Modeling*. Wiley-ISTE; 1 edition,. 832 p. , Nov. 2008.

MORO, N.; AURAS, A. P. *Metalurgia do Pó e o futuro da indústria*. Florianópolis: Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, Curso Técnico de Mecânica Industrial. 28 p, 2007.

NEAMŃU, B.v. et al. AC magnetic properties of the soft magnetic composites based on Supermalloy nanocrystalline powder prepared by mechanical alloying. *Materials Science And Engineering: B*, [s.l.], v. 177, n. 9, p.661-665, mai. 2012.

OSÓRIO J. O. M., Análise da máquina torus sob frenagem eletrodinâmica, Porto Alegre - Brasil: Dissertação de Mestrado, PPGE3M - UFRGS, 2011.

PAULETI, P. *Construção e Análise do Desempenho de um Motor de Indução Trifásico com Núcleo Produzido via Metalurgia Do Pó*. 79 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

PARK, Bong Jun; KIM, Min Su; CHOI, Hyoung Jin. Fabrication and magnetorheological property of core/shell structured magnetic composite particle encapsulated with cross-linked poly(methyl methacrylate). *Materials Letters*, [s.l.], v. 63, n. 24-25, p.2178-2180, out. 2009.

PÉRIGO, E. A. et al. Past, present, and future of soft magnetic composites. *Applied Physics Reviews*, [s.l.], v. 5, n. 3, p.0313010-0313013, set. 2018.

PIETSCH Wolfgang, *Agglomeration in Industry*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN 3-527-30582-3, 2005.

POPLAVKO, Y.M. *Electronic materials: principles and applied science*. Amsterdam: Elsevier, 718 p. 2018.

RONCHI, F. Construção e análise do emprego de um motor de corrente contínua utilizando materiais magnéticos macios a partir da metalurgia do pó. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalurgia e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RONGHAI QU; LIPO, T. A. Dual-rotor, radial-flux, toroidally wound, permanentmagnet machines. IEEE Transactions on Industry Applications, [s. l.], v. 39, n. 6, p. 1665–1673, 2003.

SCHATT, W., WIETERS, K.-P., and Kieback, B. Powder Metallurgy Processing and Materials, European Powder Metallurgy Association, Shrewsbury, U.K, 1997.

SCHOPPA, Andreas et al. Magnetic properties of soft magnetic powder composites at higher frequencies in comparison with electrical steels. 2013 3rd International Electric Drives Production Conference, [s.l.], p.1-5, out. 2013.

SCHOPPA, Andreas; DELARBRE, Patrice. Soft Magnetic Powder Composites and Potential Applications in Modern Electric Machines and Devices. Ieee Transactions On Magnetics, [s.l.], v. 50, n. 4, p.1-4, abr. 2014.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K.. Different annealing treatments for improvement of magnetic and electrical properties of soft magnetic composites. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 317, n. 1-2, p.61-67, out. 2007.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K.. Soft magnetic composite materials (SMCs). Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 189, n. 1-3, p.1-12, Elsevier BV, jul. 2007.

SHOKROLLAHI, H.; JANGHORBAN, K.. Effect of warm compaction on the magnetic and electrical properties of Fe-based soft magnetic composites. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 313, n. 1, p.182-186, jun. 2007.

SMOLKA, K.; GMYREK, Z.. Dynamics of the line-start reluctance motor with SMC rotor. 2017 18th International Symposium On Electromagnetic Fields In Mechatronics, Electrical And Electronic Engineering (isef) Book Of Abstracts, [s.l.], p.1-2, set. 2017.

SUNDAY, Katie Jo; TAHERI, Mitra L.. Soft magnetic composites: recent advancements in the technology. Metal Powder Report, [s.l.], v. 72, n. 6, p.425-429, nov. 2017.

TONTINI, G.; EVANGELISTA L.L.; RAMOS A.I.F.; ELIAS R.A.; HAMMESA G.; BATISTELA N.J.; BINDER C.; KLEIN; DRAGO A.N. V. Study of soft magnetic composites of iron coated with nanoparticles dispersion in liquid glass. Journal Of Magnetism And Magnetic Materials, [s.l.], v. 487, p.165351-165357, out. 2019.

UENO, T. et al. Practical and Potential Applications of Soft Magnetic Powder Cores with Superior Magnetic Properties. SEI TECHNICAL REVIEW, n. 82, p. 9, 2016.

UMANS, S. D. Máquinas Elétricas. [S. l.: s. n.], 2019.

VESA, J. e RASILO, P. Permeability and resistivity estimations of SMC material particles from eddy current simulations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, Volume 524, 15 April 2021.

VIAROUGE, P. et al. New Structures of Brush and Brushless DC Motors using Soft Magnetic Composites for Automotive Applications. *Technical Paper Series*, [s.l.], p.1-8, 5 mar. 2001.

VIJAYAKUMAR, K.; KARTHIKEYAN, R.; ARUMUGAM, R.. Influence of Soft Magnetic Composite Material on the Electromagnetic Torque Characteristics of Switched Reluctance Motor. 2008 Joint International Conference On Power System Technology And Power India Conference, [s.l.], p.1-6, out. 2008.

WANG, Tsih C.. The possibility of a D.C. machine without moving contact – re-evaluation. *Journal Of The Chinese Institute Of Engineers*, [s.l.], v. 15, n. 4, p.399-404, jun. 1992.

WASEKURA, Masaki et al. A transient core loss calculation algorithm for soft magnetic composite material. 2013. *Energy Conversion Congress And Exposition*, [s.l.], p.3719-3726, set. 2013.

WATANABE, R.. Powder Processing of Functionally Gradient Materials. *Mrs Bulletin*, [s.l.], v.20, n.01, p.32-34, Cambridge University Press (CUP), jan.1995.

WILLEMS, Robin et al. A transient core loss calculation algorithm for soft magnetic composite material. *Mathematical and Computational Applications*, [s.l.], Appl. 2021, 26, 23., 2021.

WOOLMER, T. J.; MCCULLOCH, M. D. Analysis of the yokeless and segmented armature machine. In: *IEEE INTERNATIONAL ELECTRIC MACHINES & DRIVES CONFERENCE, 2007, Antalya. Proceedings [...]* Antalya: IEEE, 2007. p. 704–708.

WU, Yue et al. Chemical coating of crystalline-Fe/amorphous-Fe core-shell structured composites and their enhanced soft magnetic properties. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, [s. l.], v. 494, n. July 2019, p. 165774, 2020.

WOJCIECHOWSKI, Rafal M. et al. Analysis of high speed permanent magnet motor with powder core material. *Compel - The International Journal For Computation And Mathematics In Electrical And Electronic Engineering*, [s.l.], v. 31, n. 5, p.1528-1540, 7 set. 2012.

WULF, Marc de et al. Magnetic properties and loss separation in iron powder soft magnetic composite materials. *Journal Of Applied Physics*, [s.l.], v. 91, n. 10, p.7845-7853, 2002.

XU, Weijie et al. Modeling and Measurement of Magnetic Hysteresis of Soft Magnetic Composite Materials Under Different Magnetizations. *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, [s.l.], v. 64, n. 3, p.2459-2467, mar. 2017.

ZHANG, Fengge et al. Study on a New Type of Permanent Magnet Claw Pole Motor with Outer Rotor. 2008 Joint International Conference On Power System Technology And Ieee Power India Conference, [s.l.], p.1-5, out. 2008.

ZHANG, Bo; SEIDLER, Thorsten; DIERKEN, Richard; DOPPELBAUER, Martin. Development of a Yokeless and Segmented Armature Axial Flux Machine. *Ieee Transactions On Industrial Electronics*, [S.L.], p. 1-1, 2015.

ZHONG, J.j. et al. Characteristics of soft magnetic composite material under rotating magnetic fluxes. Mitsubishi Electric Research Laboratories, *IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, mai. 2021.

ZHOU, L. et al. High-Torque Direct-Drive Machine with Combined Axial- and Radial-flux Out-runner Vernier Permanent Magnet Motor. *Journal Of Magnetism And Magnetic Materials*, [s.l.], v. 299, n. 1, p.29-34, abr. 2006.

ZHOU, Bang et al. Fe-based amorphous soft magnetic composites with SiO<sub>2</sub> insulation coatings: A study on coatings thickness, microstructure and magnetic properties. *Ceramics International*, [s. l.], v. 46, n. 9, p. 13449–13459, 2020.

ZHU, Jian Guo; GUO, Youguang. Study with magnetic property measurement of soft magnetic composite material and its application in electrical machines. *Conference Record Of The 2004 Ieee Industry Applications Conference, 2004. 39th Ias Annual Meeting.*, [s.l.], p.373-381, 2004.