

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia

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

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICO/MECÂNICAS DE NÚCLEOS PARA
USO EM POLOS DE MOTORES DE FLUXO AXIAL PRODUZIDOS A PARTIR DA
METALURGIA DO PÓ**

Porto Alegre

2022

JEFERSON CAMILOTTI GAIO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICO/MECÂNICAS DE NÚCLEOS PARA
USO EM POLOS DE MOTORES DE FLUXO AXIAL PRODUZIDOS A PARTIR DA
METALURGIA DO PÓ**

Trabalho realizado no Laboratório de Transformação Mecânica da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação

ORIENTADOR: Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer

Porto Alegre

2022

JEFERSON CAMILOTTI GAIO

**ESTUDO DAS PROPRIEDADES MAGNÉTICO/MECÂNICAS DE NÚCLEOS PARA
USO EM POLOS DE MOTORES DE FLUXO AXIAL PRODUZIDOS A PARTIR DA
METALURGIA DO PÓ**

Orientador: _____

Prof. Dr. Ing. Lírio Schaeffer, UFRGS

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

JORGE LUIS BRAZ MEDEIROS

Data: 15/09/2022 11:36:25-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Jorge Luis Braz Medeiros, FURG

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



Documento assinado digitalmente

VINICIUS MARTINS

Data: 15/09/2022 12:26:57-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Vinicius Martins, IFSul

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

Paulo R Eckert

Prof. Dr. Paulo Roberto Eckert, UFRGS

Doutor em Engenharia Elétrica (Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFRGS, Brasil)

Coordenador do PPGE3M: _____

Prof. Dr. Afonso Reguly

Porto Alegre, (Agosto 2022).

“... É necessário abrir os olhos e perceber as coisas boas dentro de nós, onde os sentimentos não precisam de motivos nem os desejos de razão...”.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. -Ing. LÍRIO Schaeffer por sua confiança e orientação no desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Ao Laboratório de Transformação Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – LdTM, e, ao Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamentos e Energia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - LMEAE, coordenado pelo Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, pelo fornecimento da estrutura e equipamentos utilizados na execução deste projeto, assim como a pelo auxílio nos ensaios com a máquina.

Ao revisor deste trabalho, o Prof. Dr. Eng. Jaime A. Back, pelas interessantes e pontuais observações, além de suporte inestimável e companheirismo nessa jornada.

Ao Prof. Dr. Paulo Eckert, pelas valiosas contribuições técnicas ante máquinas de fluxo axial e métodos de elementos finitos aplicados a campos.

Ao M.Sc. Eng. Andrisson R. Teixeira, pelas valiosas contribuições técnicas ante construção de matrizes de compactação e tratamento térmico.

A empresa Höganäs, pela disponibilização do material base, essencial na realização deste projeto.

Ao GDER, Grupo de Desenvolvimento em Energias Renováveis, com agradecimento especial ao MSc. Eng. Monir Goethel Borba pela dedicação e parceria nas atividades desenvolvidas.

A empresa Hoganas, pela disponibilização do material base e indicações técnicas ao seu uso na tipologia abordada.

Aos meus familiares, por terem dado todo apoio necessário em qualquer situação e sem os quais não estaria na posição que me encontro hoje.

Aos funcionários de LDTM que auxiliaram.

A todos que, de alguma forma, colaboraram no desenvolvimento deste trabalho, os sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Motivação	18
1.2	Objetivo Geral	19
1.3	Objetivos Específicos.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	21
2.1	Compósito macio (<i>SMC</i>)	21
2.2	Metalurgia do pó (M/P).....	23
2.2.1	Obtenção e mistura das matérias prima	24
2.2.2	Compactação dos pós	26
2.2.3	Processo de Sinterização para M/P.....	28
2.2.4	Somaloy®	29
2.3	Magnetismo	32
2.3.1	Propriedades físico/magnéticas.....	34
2.3.2	Campo Magnético (H).....	36
2.3.3	Histerese e perdas.....	39
2.3.4	Núcleos de máquinas de fluxo axial.....	42
2.4	Elementos finitos aplicados em máquinas elétricas.....	44
	2.4.1Máquina elétrica de fluxo axial com duplo rotor e armadura segmentada (YASA).....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	46
3.1	Estudo de geometria e concepção inicial (rota viabilizadora).....	46
3.1.1	Modelo matemático e geometria final	49
3.1.2	Montagem e detalhamentos da máquina elétrica.....	50
3.2	Ferramental/Prensagem/Caracterização.....	51
3.2.1	Desenvolvimento das matrizes	51
3.2.2	Prensagem das geometrias (EKA-PKL40).....	52
3.2.3	Compactação (Geometrias de caracterização/Núcleo do estator)	52
3.2.4	Caracterização eletromagnética (REMAGRAPH®C-500 e TCH).....	54

3.2.5 Metalografia e análise microscópica (Zeiss EVOMA10)	56
4 ANÁLISE EXPERIMENTAL.....	57
4.1 Análise elementos finitos	58
4.2 Análise metalográfica	60
4.3 Análise de propriedades magnéticas (TCH)	65
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	71
5.1 Comparativo entre modelos de chapas com materiais SMC	71
6 CONCLUSÕES.....	74
7 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	75
REFERENCIAL BILIOGRÁFICO.....	76

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação dos materiais magnéticos;	16
Figura 2: Fluxograma das atividades;	20
Figura 3: Comportamento tridimensional do particulado SMC para com fluxo magnético, com referência direta á metalografia e modelo tridimensional;	21
Figura 4: (Esquemático) exemplo de encapsulamento do granulado férrico no processo carbonila com indicação de camadas protetoras e indicações térmicas de processo de fabricação;	22
Figura 5: Processos da metalurgia do pó;	23
Figura 6: Arranjo de um hidro-atomizador;	24
Figura 7: Regiões do SMC, (a) região do grão individual, (b) microrregião no grão e, (c) conglomerado global;	25
Figura 8: Compactação uniaxial de pó de metal;	26
Figura 9: Particionamento de diferentes tecnologias de (M/P);	27
Figura 10: Descrição esquemática dos estágios de sinterização, cobrimento em ácido fosfórico (H₃PO₄) com diferentes vistas e escalas para acompanhamento da formação das regiões de pescoço e garantia da separação entre grãos;	29
Figura 11: Somaloy® 1P= Linha de base, Somaloy® 3P=Resistência mecânica e permeabilidade, Somaloy® 5P+ Menor perda;	30
Figura 12: Curva de magnetização Somaloy®;	31
Figura 13: Tratamento térmico para o Somaloy® 700 1P (a), Somaloy® 700 3P (b) e, Somaloy® 700 5P (c);	32
Figura 14: Uma carga em movimento e a intensidade do campo magnético que se gera;	32
Figura 15: Estágios de magnetização de uma amostra com o alinhamento do campo; ...33	
Figura 16: Orientação dos dipolos magnéticos com campo magnético externo aplicado e temperatura ambiente;	34
Figura 17: Momento magnético associado com: (a) um elétron em órbita e (b) um elétron em rotação;	35
Figura 18: Magnetização de saturação “Ms” versus valores de coercividade;	36

Figura 19: Domínios magnéticos, ou de Weiss (a), detalhe específico de grão conduto (b);	36
Figura 20: Campo magnético H a partir de corrente elétrica I;.....	37
Figura 21: Correntes parasitas nos grãos (individual) e efeito global em SMC (imagem á esquerda), detalhe em metalografia de SMC (imagem ao centro) e, efeito simulado (FEM) de região tridimensional com efeito pericular (imagem á direita);.....	38
Figura 22: Comparativo de perdas em relação á frequência (f);.....	39
Figura 23: Curva típica de histerese (a) SMC's (materiais moles), (b) demais ferromagnéticos (materiais duros);.....	40
Figura 24: (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado;.....	41
Figura 25: Partes da máquina de fluxo axial;.....	42
Figura 26: Topologias máquinas de fluxo axial tipo Norte – Norte á esquerda e, tipo Norte – Sul á direita;.....	43
Figura 27: Distribuições de malha (esquerda) e, densidade de fluxo resultante do cálculo (direita);.....	44
Figura 28: Geometria (diâmetro aprox. 40 cm) (a), e, detalhe do estator de núcleos bobinados (b), respectivamente;.....	46
Figura 29: Modelo competitivo Fórmula SAE;.....	47
Figura 30: Núcleo laminado desmontado extraído do processo eletro-erosão, em (a) vista de topo, em (b) vista em perspectiva;.....	47
Figura 31: Detalhes da maquina e central de comando respectivamente que executam a usinagem (a e d) e, produto final do processo (b e c);.....	48
Figura 32: Geometria 3-D, rotor+estator e enrolamentos pertinentes da máquina elétrica (esquerda), núcleo montado (chapas laminadas) em suporte polimérico (direita);	49
Figura 33: Detalhamento do pólo (estator): (a) Vista frontal, (b) Vista lateral e (c) Vista superior, medidas em milímetros;.....	49
Figura 34: máquina elétrica (1/4) com aplicação das malhas para refino de cálculo;.....	50
Figura 35: Detalhamento das partes da máquina, (a) vista perfil, (b) vista lateral e, (c) montagem;.....	50
Figura 36: 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;.....	51
Figura 37: Detalhe do processo de compactação (EKA-PKL40);.....	52

Figura 38: Detalhe de compactação, (a) barra caracterizadora, (b) pólo da máquina elétrica e, (c) anel de Rowland;	53
Figura 39: Detalhes do processo de caracterização magnética (REMAGRAPH® C - 500) - processo com amostra fixada (a), equipamento de aferimento em detalhe (b) e, detalhe dos fixadores (c);	54
Figura 40: Traçador de Curvas de Histerese Magnética;	55
Figura 41: Medição do <i>loop</i> histerese, tal que: N1 espiras, produz um campo magnético ao redor do núcleo, já N2 espiras, é usado para captar o fluxo magnético resultante; ...	55
Figura 42: Microscópio Zeiss EVO MA10;	56
Figura 43: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 1P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;	58
Figura 44: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 3P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;	59
Figura 45: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 5P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;	60
Figura 46: (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);	61
Figura 47: Análise metalográfica (Somaloy® 700 1P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);	62
Figura 48: Análise metalográfica (Somaloy® 700 3P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);	63
Figura 49: Análise metalográfica (Somaloy® 700 5P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);	64
Figura 50: Loop de histerese (Somaloy® 700 1P);	66
Figura 51: Loop de histerese (Somaloy® 700 3P);	67
Figura 52: Loop de histerese (Somaloy® 700 5P);	67
Figura 53: Dados caracterizados Somaloy® 700 1P;	68
Figura 54: Dados caracterizados Somaloy® 700 3P;	69
Figura 55: Dados caracterizados Somaloy® 700 5P;	70
Figura 56: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo entre si dos materiais (Chapas laminadas, e Somaloy®, 1P, 3P e 5P, respectivamente;	71
Figura 57: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 1P;	72

Figura 58: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 3P;	72
Figura 59: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 5P;	73

LISTA DE SIGLAS/ ABREVIATURAS

Am – Amostra

CA – Corrente alternada

CC – Corrente contínua

f.e.m. – Força eletro motriz

GDER – Grupo de Energias Renováveis

LdTM – Laboratório de Transformação Mecânica

M/P – Metalurgia do Pó

Ne – N° de espiras de uma bobina

PE – Potência Elétrica

PM – Potência Mecânica

rpm – Rotações por minuto

St – Amostra sinterizada

TCH – Traçador de Curva de Histerese

Vcc – Fonte de tensão de corrente contínua

LISTA DE SIMBOLOS

A	– Área da superfície para compressão.....	[mm ²]
B	– Indução magnética.....	[G] ou [T]
B_m	– Indução de Saturação.....	[T]
B_r	– Retentividade magnética ou magnetização remanente.....	[T]
$Desp$	– Densidade de espiras.....	N/C
d_{ext}	– Diâmetro externo.....	[mm]
D_f	– Diâmetro final.....	[mm]
D_i	– Diâmetro inicial.....	[mm]
d_{int}	– Diâmetro interno.....	[mm]
D_m	– Densidade do material.....	[kg/m ³]
F	– Força.....	[N]
f	– Frequência.....	[Hz]
F_i	– Força perpendicular ao campo magnético.....	[N]
H	– Campo magnético.....	[Oe] ou [A/m]
H_c	– Coercitividade máxima ou força coercitiva.....	[A/m]
H_f	– Altura final.....	[mm]
H_i	– Altura inicial.....	[mm]
I	– Corrente elétrica.....	[A]
J	– Densidade de corrente.....	[A/m ²]
L	– Comprimento do condutor.....	[m]
l	– Comprimento.....	[mm]
N_p	– Número de espiras no enrolamento primário.....	N/C
p	– Número de polos da máquina.....	N/C
Ph	– Perdas por histerese.....	[W/kg]
R	– Resistência elétrica.....	[Ω]
T	– Temperatura.....	[°C]
V	– Tensão elétrica.....	[V]
v	– Velocidade.....	[m/s]
P	– Potência.....	[W]

Símbolos Gregos:

μ – permeabilidade magnética do meio.....	[H/m]
μ_0 – permeabilidade magnética no vácuo.....	[H/m]
μ_r – permeabilidade relativa.....	[B/($\mu_0 H$)]
Φ – fluxo magnético total.....	[Wb]
ρ – Resistividade elétrica da barra.....	[$\Omega.m$]

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*) a ser utilizada no carro da equipe de competição da Fórmula SAE elétrica da UFRGS (equipe E-Power). 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-chaves: 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) axial flow electric machine to be used in the competition team's car. of the electric Formula SAE of UFRGS (E-Power team). 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 assim nomeados, dado à correlação entre suas características de baixa dureza ante aos aços comuns e, facilidade de reversão á 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).

Fonte: Adaptado de (GAVRILA; IONITA, 2002);

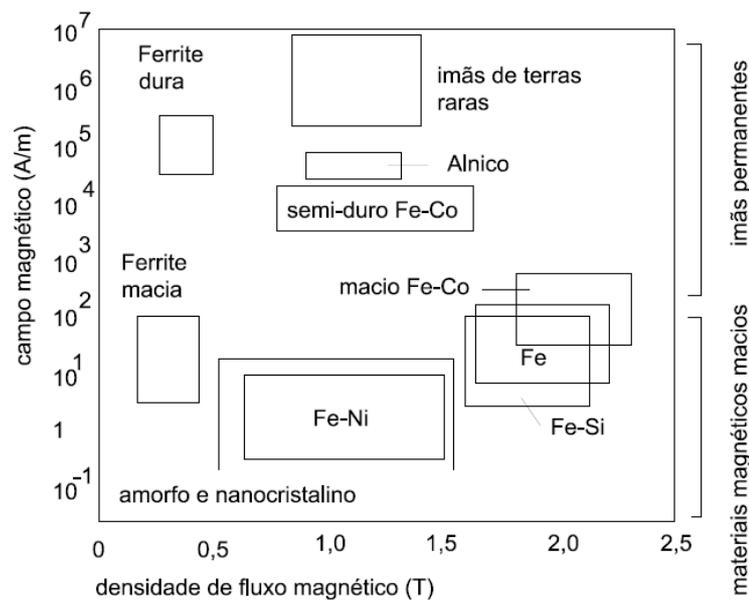


Figura 1: Classificação dos materiais magnéticos;

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 continuada na qualidade do material impulsiona a variedade no uso do mesmo (LIPO *et al.*, 2004). No geral, um material magnético macio (SMC), submetido a um campo magnético, possuirá, quando em saturação, altos índices de magno-permeabilidade e densidade de fluxo. Tem-se que, durante o seu uso como material

magnético, precisa-se estar magnetizado ao longo das diversas direções dos grãos, para que idealmente, se deva ter o mesmo comportamento em cada um desses, ou seja, a ausência de anisotropia magno-cristalina. Ainda, deve-se destacar que, cristais com uma estrutura de baixa simetria possuem anisotropia forte (GAVRILA; IONITA, 2002; ZHOU *et al.*, 2020). Os núcleos magnéticos usinados ou compactados (estatores), a partir do pó, para tal, tem fabricação ante a compactação de particulado magnético, em conjugado a um revestido de camadas isolantes, tendendo o projeto a evitar a formação das correntes parasitas (ditas de Foucault) (ZHONG, 2021).

No que tange aos processos inerentes da metalurgia em pó (M/P), tem-se a visão do amplo leque de controle microestrutural, ao longo do óxido/metálico formado, este, podendo-se adaptar facilmente suas propriedades para os mais diversos fins (WATANABE, 1995). Uma notável característica do material é o fluxo de campo magnético tridimensional (3D), que é o impulsionador principal dentre as características notáveis, justificando as altas performances das máquinas elétricas, pois, o fluxo magnético não se restringe a um plano, comparado para com a técnica da laminação do aço elétrico (ZHONG *et al.*, 2006; BIRČÁKOVÁ *et al.*, 2020).

O Método dos Elementos Finitos (FEM) aplicado em máquinas elétricas tem sua utilidade ao analisarem-se as condições magnéticas, e ainda assim, torque médio, para o mesmo desenvolver, ao que se pode seguir, nas condições isotrópicas tridimensionais (3D), estimar-se na tipologia de tal, perdas por correntes parasitas, perda magnética total, em altas frequências e, melhorias térmicas (VIJAYAKUMAR *et al.*, 2008). Devido aos curtos caminhos de fluxo providos por projetos inovadores, o SMC tende a ser atraente para a aplicação em máquinas elétricas (LIPO *et al.*, 2005).

Assim, visa-se como escopo deste trabalho colaborar com as áreas de processos de fabricação, simulação e, máquinas elétricas, tendo-se como lastro o desenvolver dos comportamentos do compósito magnético macio para utilização nas máquinas em que, a tipologia SMC possa ter seu alto desempenho, usinada ante o pó de Fe atomizado (M/P), apresentando-se camada a camada, isolante/conduto e, nano-partículas de silicatos acessórias do pó que se tem foco. A relevância estratégica deste trabalho para o setor produtivo nacional reside na possibilidade de fabricar máquinas elétricas que apresentam geometrias complexas onde o uso de chapas laminadas é impeditivo, e, ainda, contribuir com pesquisa e produção

intelectual, dessa forma, fomentar a indústria de pós-metálicos com o aprimoramento das propriedades necessárias de *design* para esta tecnologia competitiva.

1.1 Motivação

A motivação no desenvolvimento da pesquisa se aporta em que, atualmente, na técnica construtiva das máquinas elétricas, parte-se da usinagem de grupamentos de chapas de aço magnético, justapostas, e, compostos de maneira a se formar frente aos enrolamentos de fio de cobre esmaltado que circundam o mesmo. Este processo é deveras demorado/oneroso se comparado diretamente aos processos de fundição, o qual, se gera núcleos maciços (DIAS *et al.*, 2015). Assim, diante dos novos estudos, os quais indicam que as ligas (SMC), obtidas do processamento do pó de ferro base, acondicionado ainda de outros elementos componentes e processos, apresentam desempenho e propriedades análogas, e até em alguns casos, superiores frente às chapas de aço laminadas, em que se torna justificado o foco deste trabalho.

A análise dos campos eletromagnéticos é de suma importância para esses materiais, e, é conduzida frente a determinar alguns parâmetros de suma importância a aperfeiçoar as estruturas de máquinas. Os métodos de análise se validam ante resultados experimentais da prototipagem de topologias SMC (ZHU; GUO, 2004). Materiais macios sinterizados, produzidos pela (M/P), são a premissa de constantes estudos, tanto na eletrônica, quanto para aplicações em motores elétricos, norteados principalmente uma diminuição nas perdas, visto que ao mesmo resultar-se-ia em uma economia substancialmente representativa, considerando viés médio a longo prazo. Cabe indicar que para o seu uso do mesmo em circuitos, resulta-se em um aumento de corrente consumida (SMÓLKA; GMYREK, 2017).

Dentre as principais vantagens ao uso dos materiais sinterizados tem-se, o número reduzido das etapas em processo para fabricação dos núcleos, culminando no menor gasto energético/tempo, além do fato da matéria prima estar menor onerada, comparada à técnica laminada. Todavia, uma questão peculiar é o micro-encapsulamento do particulado férrico, propriedade esta denotada necessária dada supressão da circulação das correntes parasitas. Esse isolamento acontece de diferentes formas, desde uma camada oxidante até a utilização de diferentes componentes químicos e complexos processos de prensagem/tratamento térmico. Para o dito pó revestido de óxido de ferro/resina epóxi, mencionado em (Laxminarayana *et al.*, 2015), dado ao seu isolamento superficial, os caminhos da corrente de

Foucault ficam restritos dentro do próprio particulado, concluindo-se a tendência zero assim, no âmbito das correntes parasitas.

Deste modo, o alicerce desta pesquisa consiste na aplicação dos compósitos SMC para confecção de parte do estator para uma máquina elétrica de fluxo axial do tipo YASA. Como alternativa aos métodos já utilizados em outros estudos para com construção de máquinas elétricas, deseja-se uma rota viabilizadora, traçada com auxílio computacional, a partir da coleta de informações dos diferentes estudos e métodos já realizados, dando-se segmentações às simulações por (FEM) no uso dos pós.

1.2 Objetivo Geral

Este trabalho possui seu objetivo na construção de núcleos do estator da máquina YASA da equipe E-POWER (UFRGS) usando metodologias de metalurgia do pó para atendimento às características do motor frente ao uso da tecnologia de aços elétricos.

1.3 Objetivos Específicos

O trabalho foi conduzido de forma teórico-experimental, com os seguintes objetivos específicos:

- Construir os núcleos do motor considerando-se o método tradicional de (M/P);
- Determinar as propriedades elétricas e magnéticas do compósito a ser usado na simulação do estator dentro do software ANSYS ELETRONICS, tais como, permeabilidade magnética, coercividade e perdas, dinâmicas/histeréticas/eletromagnéticas;
- Desenvolver um viés para determinação da rota de pó utilizado, dando suporte para elaboração da geometria do estator de uma máquina de fluxo axial do tipo YASA;
- Realizar ensaios nos núcleos a fim de determinar as perdas no estator e validá-lo a partir dos equipamentos utilizados no laboratório LMEAE;

Assim, este capítulo apresentou uma introdução ao tema desta dissertação, abordando a sua relevância, o problema, as justificativas e seus objetivos. Os demais capítulos apresentarão um breve referencial bibliográfico, estudo da arte no âmbito de SMC's, metodologia e um fluxograma de trabalho. Ainda, indica-se a proposição, (Figura 2), como

indicativo do fluxograma das atividades que culminaram na referida base das etapas das atividades que foram desempenhadas.

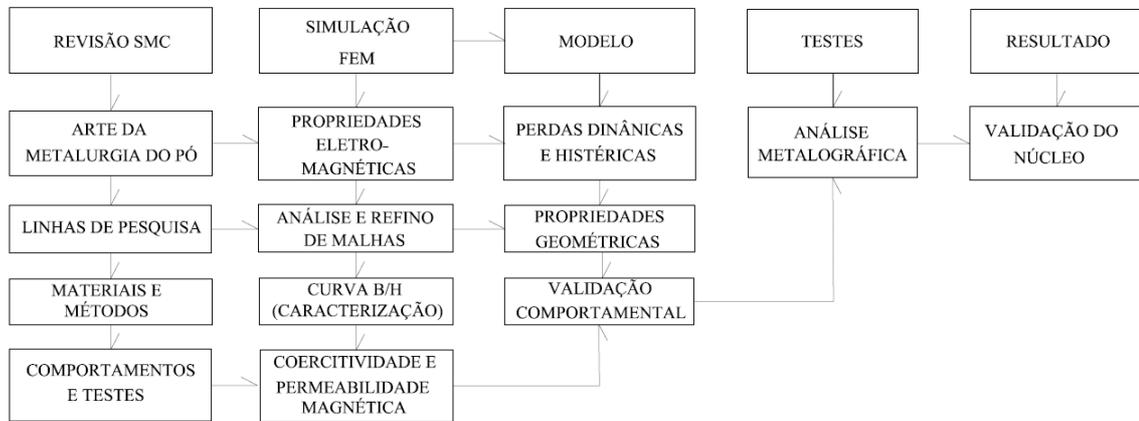


Figura 2: Fluxograma das atividades;

2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste capítulo, se trata uma breve revisão sobre fundamentos de magnetismo, classificação dos materiais ferromagnéticos, além, das perdas em aplicações eletromagnéticas. Uma introdução ao processo de metalurgia do pó é feita, assim como os SMC's e, seu processamento em elementos finitos ante a maquina pré-dita, destacando suas propriedades, vantagens e desvantagens em relação a outros materiais magnéticos moles e suas aplicações.

2.1 Compósito macio (SMC)

Para os (Guo *et al.*, 2003) SMC's possuem magnéto-igualdade de comportamento em todas as direções (Figura 3). 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).

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

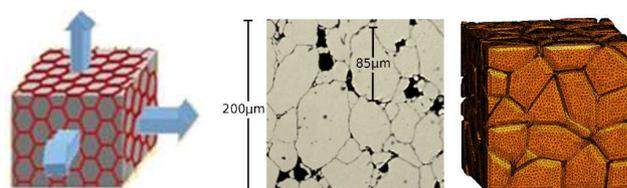


Figura 3: Comportamento tridimensional do particulado SMC para com fluxo magnético, com referência direta á metalografia e modelo tridimensional;

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 4), os campos eletromagnéticos sofrem descontinuidades e, conseqüentemente, não são diferenciáveis, no entanto, é possível derivar as condições de transmissão de campos (DAUTRAY; LIONS, 87).

Fonte: (PARK *et. al*, 2009);

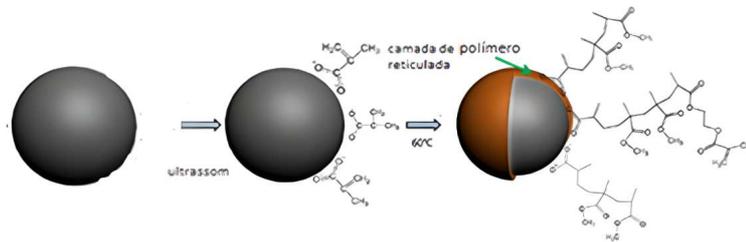


Figura 4: (Esquemático) exemplo de encapsulamento do granulado férrico no processo carbonila com indicação de camadas protetoras e indicações térmicas de processo de fabricação;

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 5), por exemplo, resultando em projetos de elevada precisão dimensional (KORDECKI *et al.*, 1982; SUNDAY; TAHERI, 2017).

Fonte: Adaptado de (SUNDAY; TAHERI, 2017);

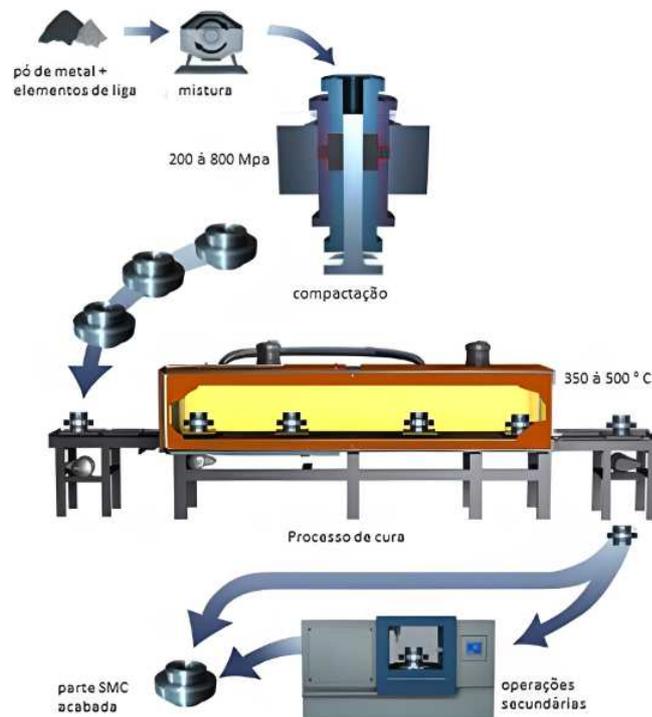


Figura 5: Processos da metalurgia do pó;

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).

2.2.1 Obtenção e mistura das matérias prima

Nos processos com moinhos há rotação para com o fluxo carregado do particulado sob altas velocidades dentro da câmara de acondicionamento, onde ocorre processo que leva à “fragmentação do conteúdo”, assim sendo, pequenas partículas são movidas ao centro da câmara até que a granulometria esteja atendida. Parte-se ainda, contemporaneamente, ao processo “*water atomization*”, processo a qual se forma o material usado neste estudo, que em contrapartida, tem como princípio do processo via água que desintegra um “derretido em queda livre”, provido por jatos de água pré-dispostos/ajustados (DANNINGER *et al.*, 2017). A partir das etapas de processo elucidado, tem-se a (Figura 6), onde se apresenta (a) derretido do material base, (b) jateamento com bicos, (c) pulverizar do fluido, (d) produto final (SMC), (e) fonte de pressão, e (f), câmara de acondicionamento:

Fonte: (DANNINGER *et al.*, 2017);

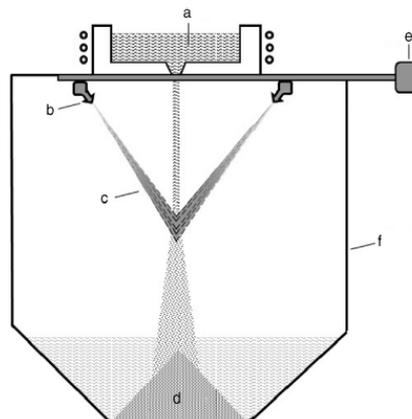


Figura 6: Arranjo de um hidroatomizador;

O fundido desintegrado solidifica-se de imediato, tão logo, a superfície do mesmo se oxida, assim, esta pasta resultante (água+pó) é coletada, seca e, posteriormente reduzida em

atmosfera inerte. Após isso, o pó recém-reduzido irá sinterizar, formando uma espécie de “bolo moído” antes da execução de tratamento final dos pós, tal como, separação magnética, triagem, equalização, etc. (DANNINGER *et al.*, 2017). Estes pós com ajustes finais têm sua forma superficial irregular que fornece boa resistência à geometria inicial (peça verde), intertravando as partículas entre si, assim, elucidando-se, tem-se abaixo na (Figura 7) respectivamente, (a) partícula, (b) grãos e, (c) aglomerado.

Fonte: (DANNINGER *et al.*, 2017);

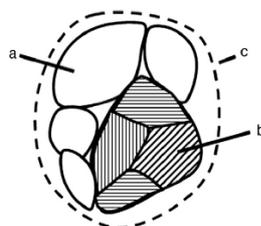


Figura 7: Regiões do SMC, (a) região do grão individual, (b) microrregião no grão e, (c) conglomerado global;

O todo do processo em si conta com variáveis interdependentes, como as relações de temperatura/quantidade de material fundido, a relação água/metálico, o diâmetro da corrente de metal fundido, quantidade de jatos de água/ângulo de incidência/pressão da água, etc. (DANNINGER *et al.*, 2017). As propriedades tecnológicas mais importantes de pós ficam descritas como se seguem e, são discretizadas e testadas usando-se metodologias das normativas ISO/ASTM:

- **Fluidez (ISO 4490):** o método usa um funil de vazão Hall, com dimensões (orifício de 2,5 mm/ângulo de abertura de 60°), a partir deste, mede-se o tempo necessário para que 50 g de pó fluam através dele.
- **Densidade aparente (ISO 3923):** o método mede a massa de pó em um recipiente (25 cm³) dividido pelo volume do mesmo após a remoção o excesso de pó;
- **Compactabilidade (ISO 3927):** o método se caracteriza pela compressão uniaxial de pó sob uma matriz á diferentes pressões (200 a 800 MPa) e, medição subsequente da densidade do compacto resultante. Dos principais fatores que influenciam temos a pressão de compactação, tipo e composição do pó, e ainda as relações “*shape*” de forma/tamanho das partículas, porosidade das partículas e lubrificantes/conteúdo orgânico;

2.2.2 Compactação dos pós

Durante a produção, os componentes SMC's são normalmente fabricados por compactação convencional combinada com técnicas como compactação a quente, multi-passo e recozimento magnético, seguido por um tratamento térmico á temperatura relativamente “baixa”. (SHOKROLLAHI; JANGORBHAN, 2007; GUO *et al.*, 2005). Em sistemas particulados de misturas em pó, não existe difusão de gases e líquidos, portanto, a segregação de partículas é um fenômeno norteador de fortes considerações no processamento dos pós, principalmente os formatos das partículas/tamanhos (DANNINGER *et al.*, 2017). Seguindo-se no *layout* de produção tem-se a (Figura 8) em que, concomitantemente ocorrem os processos de:

1. Distribuição da densidade no leito de pó compacto enquanto, o punção superior se move (A, B) e, molde + punção inferior ficam fixos (C);
2. Punções superior e inferior se movem pela matriz, fixa ou flutuante, enquanto que, o punção superior se move e abaixa, (D, E, F);
3. E, seguindo-se, se refaz o ciclo de “ação única” do pressionando, acrescido com processo de ejeção, processo de matriz flutuante, e, processo de retirada;

Fonte: (KAYSSER *et al.*, 2000);

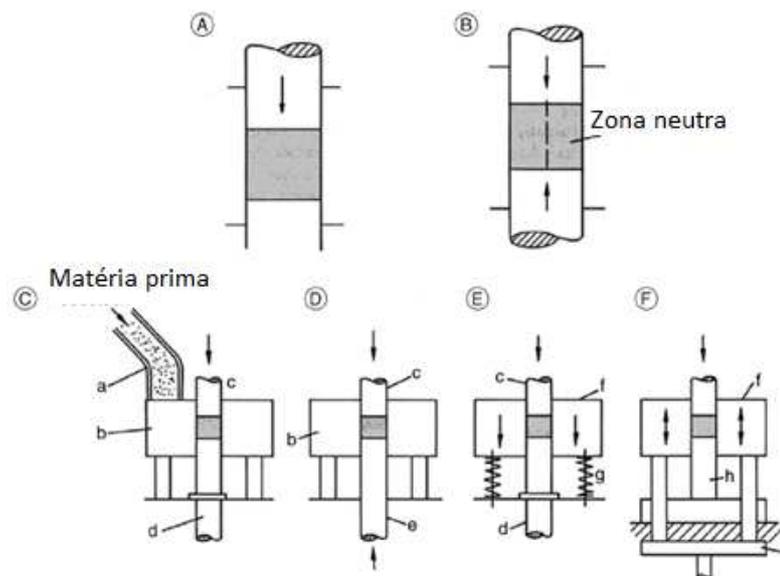


Figura 8: Compactação uniaxial de pó de metal;

Sendo que dentre os dispositivos da (figura 8) distinguem-se, (a), tubo para preenchimento, (b), matriz fixa, (c), punção superior, (d), ejetor, (e), punção inferior, (f),

matriz flutuante, (g), sistema de amortecimento, (h), punção fixo inferior, e (i), hastes de retirada.

A adição de ligantes/auxiliares de prensagem, normalmente, estearatos, são utilizados em proporções menores que 1%, e, essas “parafinas” ficam adicionadas para formar grânulos e regiões adequadas durante a compactação na matriz, de maneira a fornecer as propriedades desejadas durante o processo uniaxial, desse modo, os fatores resultantes dessa adição se comportam apresentando características de redução do atrito entre pós (ERNST *et al.*, 1991; GERMAN, 2013). Características de densificação e modelagem ocorrem simultaneamente durante o processo de compactação, fornecendo ao dito “compacto verde” uma dada densidade local. Esta densificação pode ser executada por compactação isostática em temperatura ambiente (compactação isostática a frio, CIP) ou, a temperaturas elevadas (compactação isostática a quente, HIP) e, há ainda, a possibilidade de moldar os pós sob baixas pressões (pó metálico + polímero) e, ainda assim, injetar tal mistura em um molde (MIM), (DANNINGER *et al.*, 2017), dada (Figura 9) em que se elucida a utilização de cada processo, condicionados a tais.

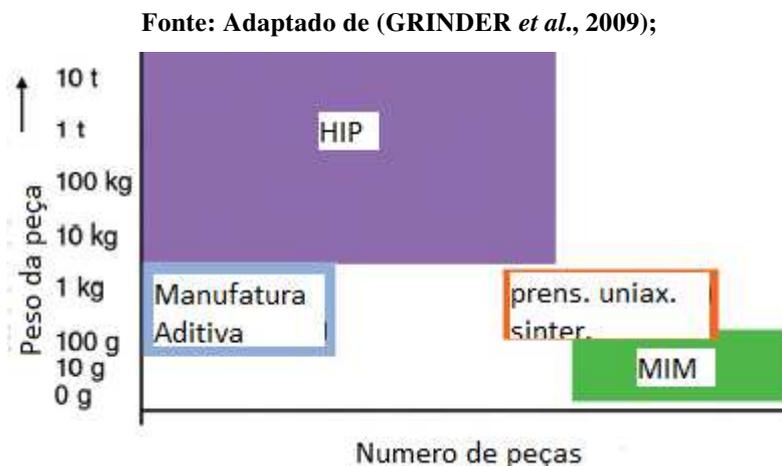


Figura 9: Particionamento de diferentes tecnologias de (M/P);

Em geral, compactação uniaxial e MIM são tecnologias empregadas para grandes séries de “pequenas peças” e, fabricação HIP e manufatura aditiva são mais adequados para séries pequenas/médias (DANNINGER *et al.*, 2017). Deve-se ater-se que, a etapa de compactação nos processos de (M/P) sempre transmite alguma deformação plástica e, conseqüentemente, aumentos da densidade de deslocamento, estas, impedem o movimento das paredes do domínio magnético e, como resultado, afetam as sensíveis propriedades magnéticas à estrutura (em particular permeabilidade, força coerciva e histerese) de forma prejudicial (HEMMATI *et al.*, 2006). Para a questão ante a transferência de calor em

máquinas elétricas executas em SMC em relação aos núcleos laminados é muitas vezes superior (JACK *et al.*, 1998; GUO *et al.*, 2015). Ainda, aumentando-se a pressão de compactação, há maior coercividade, que, é necessário para mover os domínios alinhados para suas direções iniciais, aleatórias, e, trazer a densidade de fluxo a zero novamente (HEMMATI *et al.*, 2006). O aumento da pressão de compactação pode ainda levar à formação de contatos elétricos indesejados entre partículas, devido à penetração local (degradação) da camada de polímero, criando pontes entre as partículas, e, conseqüentemente, favorecendo o desenvolvimento das perdas clássicas de Foucault (NEAMU *et al.*, 2012 e LIU *et al.*, 2016).

2.2.3 Processo de Sinterização para 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 10), 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).

Fonte: (Li *et al.*, 2020);

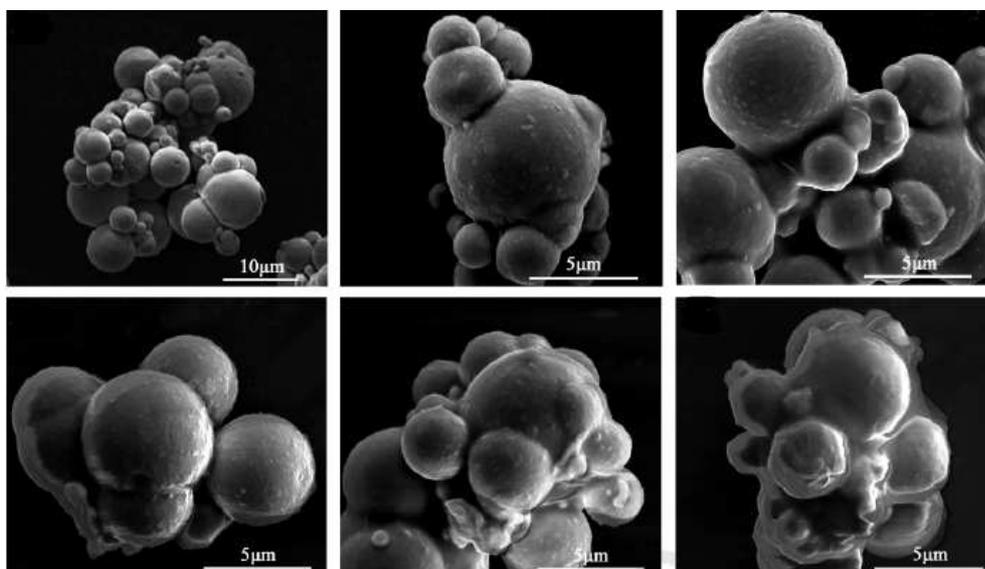


Figura 10: Descrição esquemática dos estágios de sinterização, cobrimento em ácido fosfórico (H_3PO_4) com diferentes vistas e escalas para acompanhamento da formação das regiões de pescoço e garantia da separação entre grãos;

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_2O_3) dispersas em silicato de sódio (Na_2SiO_3) 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.

2.2.4 Somaloy®

Desde 1990, a empresa Höganäs 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 11) possui propriedades que possuem relação direta com seu desempenho ideal em suas componente e aplicação.

Fonte: Adaptado de (Höganäs, 2020);

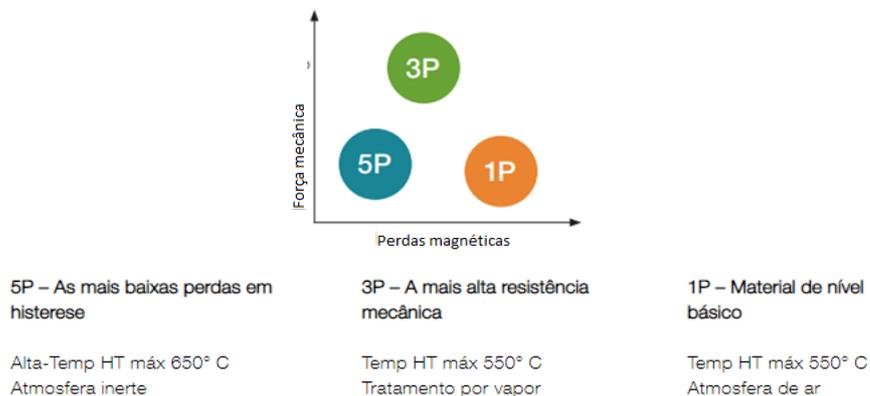


Figura 11: Somaloy® 1P= Linha de base, Somaloy® 3P=Resistência mecânica e permeabilidade, Somaloy® 5P+ Menor perda;

Em (Höganäs, 2020) tem-se que, o Somaloy 1P encontra-se disponível em 40, 100 e 200 μm (peneira), aditivo de lubrificação Kenolube P11 á 0,4% - 0,5% com características de compactação a 600 – 800 MPa e, tratamento térmico em atmosfera de ar a 530°C. O Somaloy 3P encontra-se disponível em 40 μm (peneira), com aditivo de lubrificação Lube 3P á 0,3% - 0,4%, com características de compactação a 600 – 800 MPa sob matriz aquecida e, tratamento térmico em dois estágios dos componentes em atmosfera de ar + vapor a 530°C, e, que é o material indicado pelo fabricante para máquinas elétricas de alta frequência. O Somaloy 5P encontra-se disponível em 40, 100 e 200 μm (peneira), aditivo de lubrificação Lube 5P á 0,3% - 0,4%, com características de compactação a 600 – 800 MPa, tratamento térmico com matriz aquecida e, ainda, sob atmosfera de N_2 a 650°C. Há-se a disponibilização pela empresa Höganäs, de catálogos com as principais características para desenvolvimento de máquinas elétricas (Figura 12), que dependem principalmente de sua forma de processamento para o uso de Somaloy®.

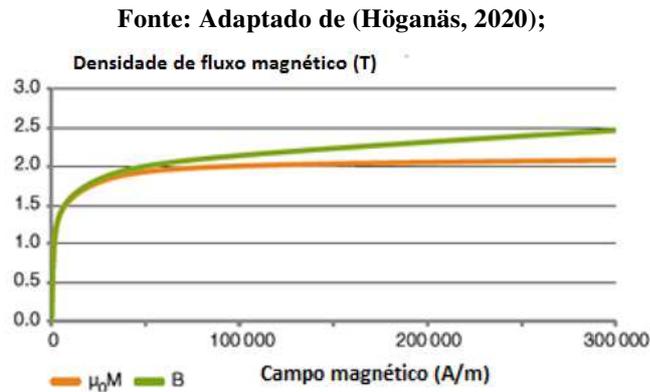


Figura 12: Curva de magnetização Somaloy®;

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 (Figura 13), (HÖGANÄS, 2020).

Fonte: (HÖGANÄS, 2020);

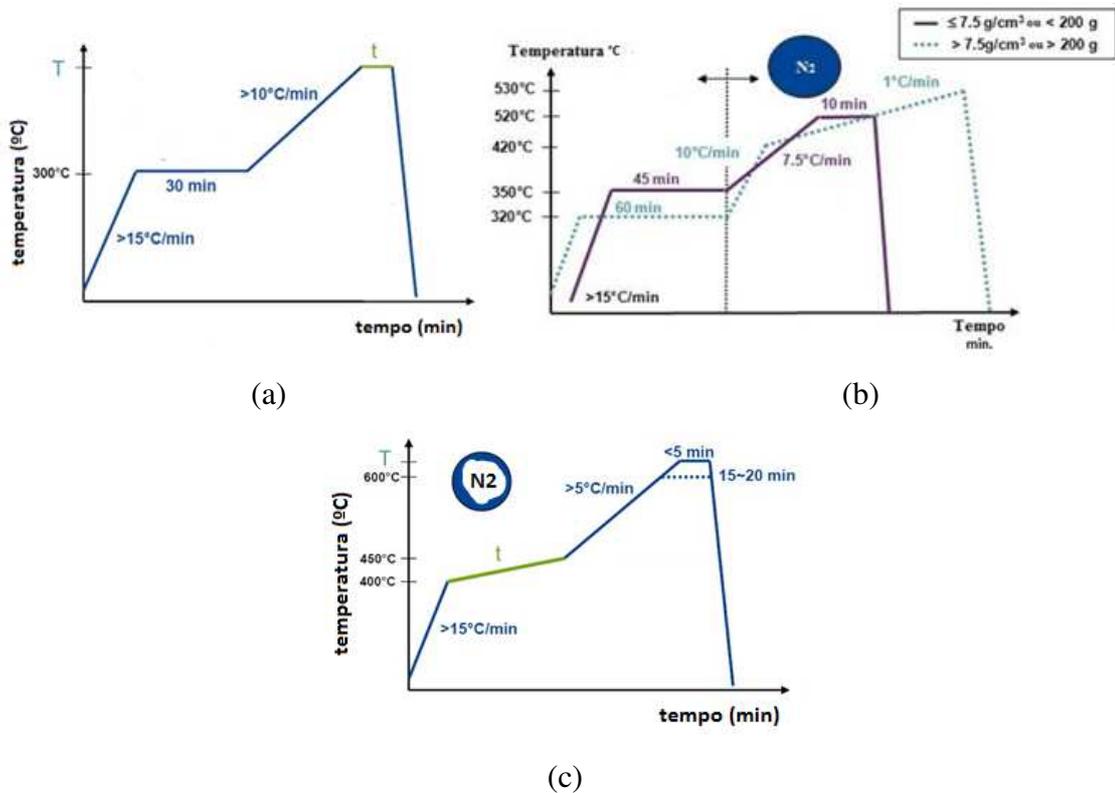


Figura 13: Tratamento térmico para o Somaloy® 700 1P (a), Somaloy® 700 3P (b) e, Somaloy® 700 5P (c);

2.3 Magnetismo

Um estudo preciso de máquinas elétricas inicia-se na compreensão das características técnicas dos materiais envolvidos, bem como os processos relacionados ao eletromagnetismo. Fenômenos magnéticos originam-se ante as cargas elétricas orbitando em volta da passagem do núcleo, e, elétrons girando em seu próprio eixo (Figura 14).

Fonte: (BASTOS; SADOWSKI, 2005);

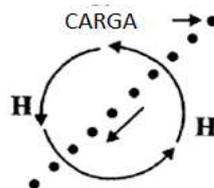


Figura 14: Uma carga em movimento e a intensidade do campo magnético que se gera;

Quando um campo magnético é aplicado num material com propriedade ferromagnética, ocorre um alinhamento magnético, e, o meio se torna dito magnetizado, este

tipo de polarização elétrica, dá-se na direção do campo magnético. Os materiais ferromagnéticos (abaixo da temperatura de Curie (T_c)) se comportam, nas regiões de grão, como um “pequeno ímã permanente” cada qual, assim, quando magnetizado, com um alinhamento mútuo dos momentos magnéticos na mesma direção (Figura 15) (APPINO, 2014).

Fonte: (LUNA 2012);

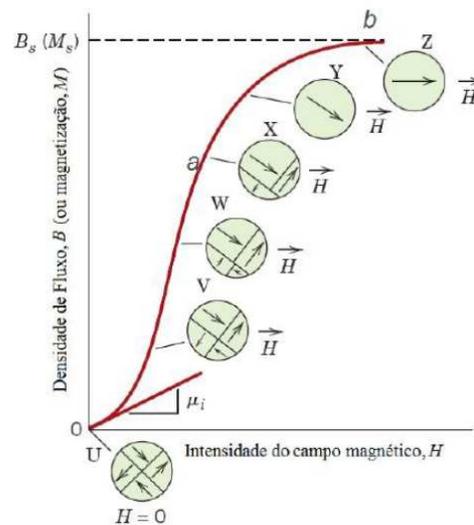


Figura 15: Estágios de magnetização de uma amostra com o alinhamento do campo;

Ainda, materiais podem ser classificados em diamagnéticos, paramagnéticos, ferromagnéticos, antiferromagnéticos e ferrimagnéticos dentre as possibilidades (Figura 16) (CAMILO 2006).

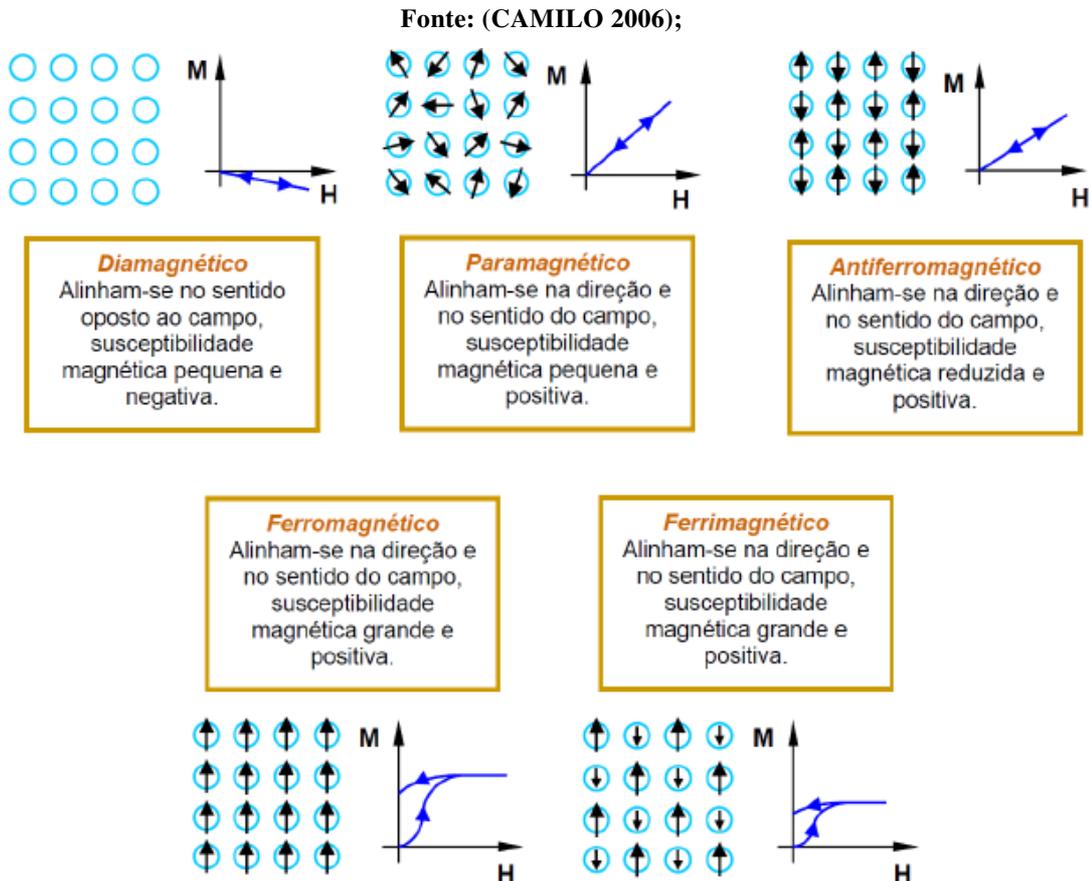


Figura 16: Orientação dos dipolos magnéticos com campo magnético externo aplicado e temperatura ambiente;

Assim como indicado na figura acima, têm-se a visualização comportamental a partir do alinhamento dos micro campos para cada classificação e, sua curva característica típica em cada situação para com magnetização e desmagnetização.

2.3.1 Propriedades físico/magnéticas

O conceito de que cargas em movimento geram os campos magnéticos, no que se apresenta, comporta-se os elétrons, apresentando-se então, um dito momento magnético de spin, γ_{spin} , originado na rotação alocada em torno do próprio eixo e, um momento orbital (Figura 17), $\gamma_{orbital}$, associado assim, ao entorno do núcleo (CULLITY, 2009). É importante atentar-se que, durante a maior intensidade de campo no equipamento, não exceder-se a rigidez dielétrica do material no qual o campo é encontrado, dessa maneira, observa-se a importância de conhecer os campos que atuam no equipamento, em particular os de alta intensidade (BASTOS; SADOWSKI, 2005).

Fonte: (CALLISTER 2002);

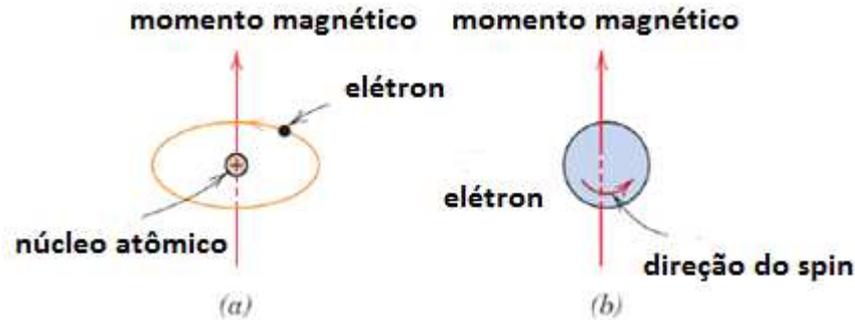


Figura 17: Momento magnético associado com: (a) um elétron em órbita e (b) um elétron em rotação;

Ainda, dentre os parâmetros inerentes para descrever as propriedades magnéticas dos sólidos, destaca-se a permeabilidade relativa (μ_r), que se equaciona como se segue (CALLISTER, 2002).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (\text{Eq. 01})$$

A permeabilidade magnética (μ) é a propriedade do meio específico através do qual o campo aplicado externamente (H) passa e, onde a indução magnética (B) é medida, logo, a permeabilidade relativa (μ_r) exprime a facilidade com a qual um campo B pode ser induzido na presença de um campo externo H (CALLISTER, 2002). Ainda, tem-se que a indução magnética B , relaciona-se com a magnetização M , e, a polarização magnética J , com o campo magnético aplicado H , descrevendo-se de fato o comportamento de um material ferromagnético (FIORILLO *et al.*, 2016).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 H + J \quad (\text{Eq. 02})$$

O campo resultante (B) é a soma do campo aplicado (H) com o campo do material magnetizado (M), onde B pode ser assim calculado através da Equação 2 (POPLAVKO, 2018). E, a máxima magnetização possível (M_s) (Figura 18), representa a magnetização que resulta quando todos os dipolos estão mutuamente alinhados, nesse ponto, existe também uma indução de saturação (B_s) que é igual ao produto do momento magnético líquido para cada átomo pelo número de átomos existentes no material (CALLISTER, 2002).

Uma carga que se movimenta, leva à lei de Ampère da corrente elétrica, esta, é o resultado final da integral do campo magnético vetorial H , e, se esse movimento de cargas ocorrer no ambiente de um conduto, a intensidade do campo elétrico torna-se praticamente inexistente (BASTOS; SADOWSKI, 2005).

$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int_s \vec{J} ds = I \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

H = campo magnético [A/m]

l = comprimento infinitesimal [m]

J = densidade de corrente [A/m^2]

I = corrente elétrica [A]

Em termos gerais, o sentido do campo magnético, pode ser dado pela “regra da mão direita” (Figura 20), sendo que o polegar aponta na direção da corrente e, os outros dedos, a direção do campo (HARPER 2005).

Fonte: (HARPER, 2005);

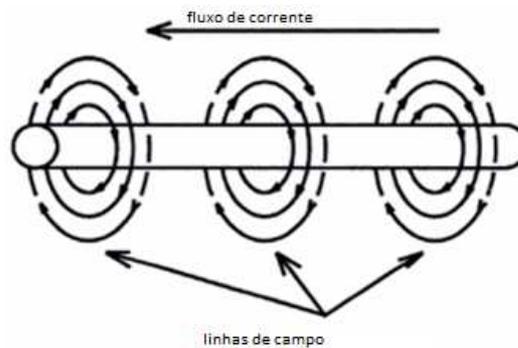


Figura 20: Campo magnético H a partir de corrente elétrica I ;

No todo, ao se resolver problemas com campos elétricos e densidades de fluxo, atenta-se à intensidade, enquanto no magnetismo a densidade do fluxo magnético assume um papel predominante na análise do dito fenômeno (BASTOS; SADOWSKI, 2005). Quando certa força do campo magnético é imposta, a dispersão das partículas formam estruturas de cadeia, que, estão alinhadas com a direção do campo, devido à interação do dipolo magnético induzido (LI *et al.*, 2007). Enquanto que, quando a força de cisalhamento é aplicada perpendicular ao campo magnético, a “estrutura” do particulado ficará estando “quebrada” (FANG *et al.*, 2008).

A indução magnética do SMC, possui proporção direta com a densidade do compósito, assim, a indução de saturação de altas densidades tangem valores próximos ao laminado de grão não orientado, ainda, referente às perdas, temos as dadas por ciclos de histerese e, correntes parasitas (Figura 21). 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).

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

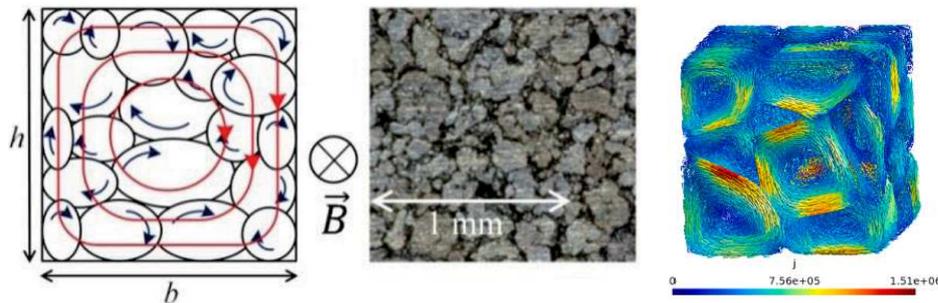


Figura 21: Correntes parasitas nos grãos (individual) e efeito global em SMC (imagem á esquerda), detalhe em metalografia de SMC (imagem ao centro) e, efeito simulado (FEM) de região tridimensional com efeito pericular (imagem á direita);

Dadas às perdas na curvatura histórica, temos ainda, que aumentam, dado o avanço da frequência, todavia, perdas por correntes parasitas variam na proporção quadrática, assim, as perdas totais serão menores no SMC (Figura 22), justificando aplicações em frequências maiores que apresentarão melhores os resultados (LEWIS, 2012).

Fonte: (SCHOPPA *et al.*, 2013);

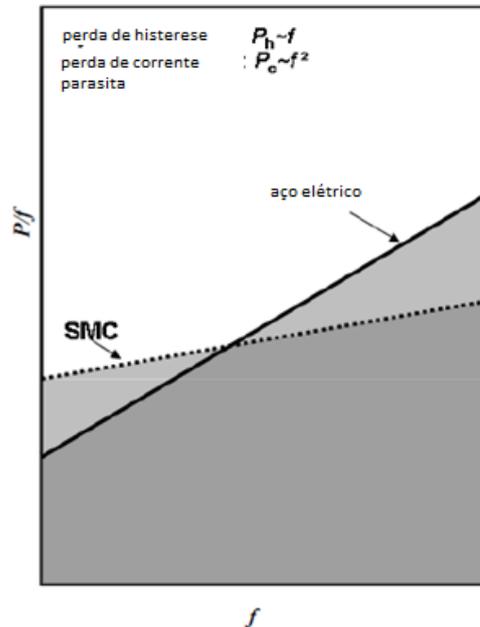


Figura 22: Comparativo de perdas em relação à frequência (f);

2.3.3 Histerese e perdas

Coercividade e histerese, respectivamente, são diretamente dependentes do efeito de fixação dos micro-campos magnéticos internos, contra o movimento das paredes dos domínios magnéticos, durante processo de magnetização (HEMMATI *et al.*, 2006). A histerese magnética é uma característica determinada pela interação complexa do movimento da parede do domínio magnético e, a rotação dos vetores de magnetização (Figura 21) (LIN; ZHU, 2007; ISHIKAWA *et al.*, 2012). O campo de desmagnetização dentro das partículas pode reduzir permeabilidade eficaz significativamente, para aumentar a permeabilidade efetiva, é necessário então, diminuir o campo de desmagnetização (LIN *et al.*, 2006).

Fonte da imagem: (MEUNIER, 2008);

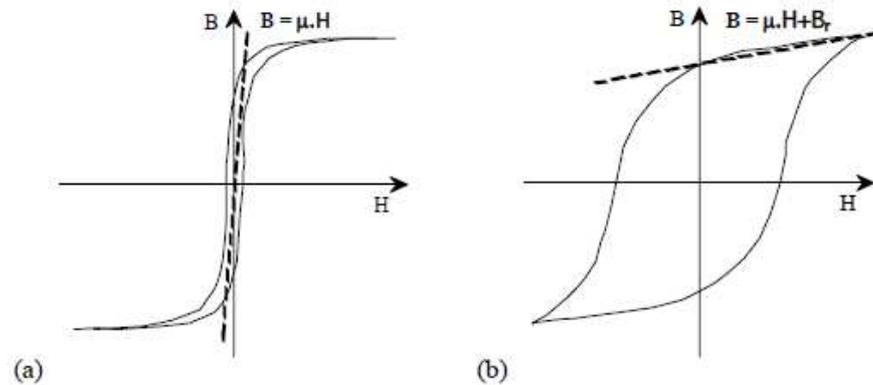


Figura 23: Curva típica de histerese (a) SMC's (materiais moles), (b) demais ferromagnéticos (materiais duros);

Enquanto em um núcleo SMC, as perdas no geral, estão proporcionais ao quadrado da frequência, na alteração da densidade do fluxo respectivamente, para assim, com o núcleo de aço magnético laminado, o coeficiente de perda da histerese no núcleo SMC é cerca três vezes maior, e, o coeficiente proporcional para convolução á perda magnética no núcleo é, cerca de dez vezes menor, logo, a perda no núcleo de aço magnético laminado será menor do que no núcleo SMC, no caso de frequências de campo magnético mais baixas, dessa maneira, a característica da perda gera vantagem no motor com núcleo SMC em frequências mais altas (PÉRIGO *et al.*, 2018).

Numa aproximação, os materiais moles são modelados pela sua curva de magnetização (B/H), o que se justifica, pois a força coercitiva é muito baixa, há então o modelamento por seu ciclo principal, no entanto, deve ser verificado *a posteriori* que, o ponto de operação permanece na zona de reversibilidade do ciclo e, que não há desmagnetização do material (BASTOS; SADOWSKI, 2005; UMANS, 2019). Quando (H) aumenta, (B) também aumenta rapidamente e, depois, mais lentamente, no que tange comportamento geral, ainda, quando aplicado elevado campo magnético a curva tende a assíntota. Então, a curva de magnetização inicial pode ser dividida em: (1) seção íngreme e, (2) seção plana, conforme (Figura 24), (JILES, 1991).

Fonte: (BARBOZA, 2009.);

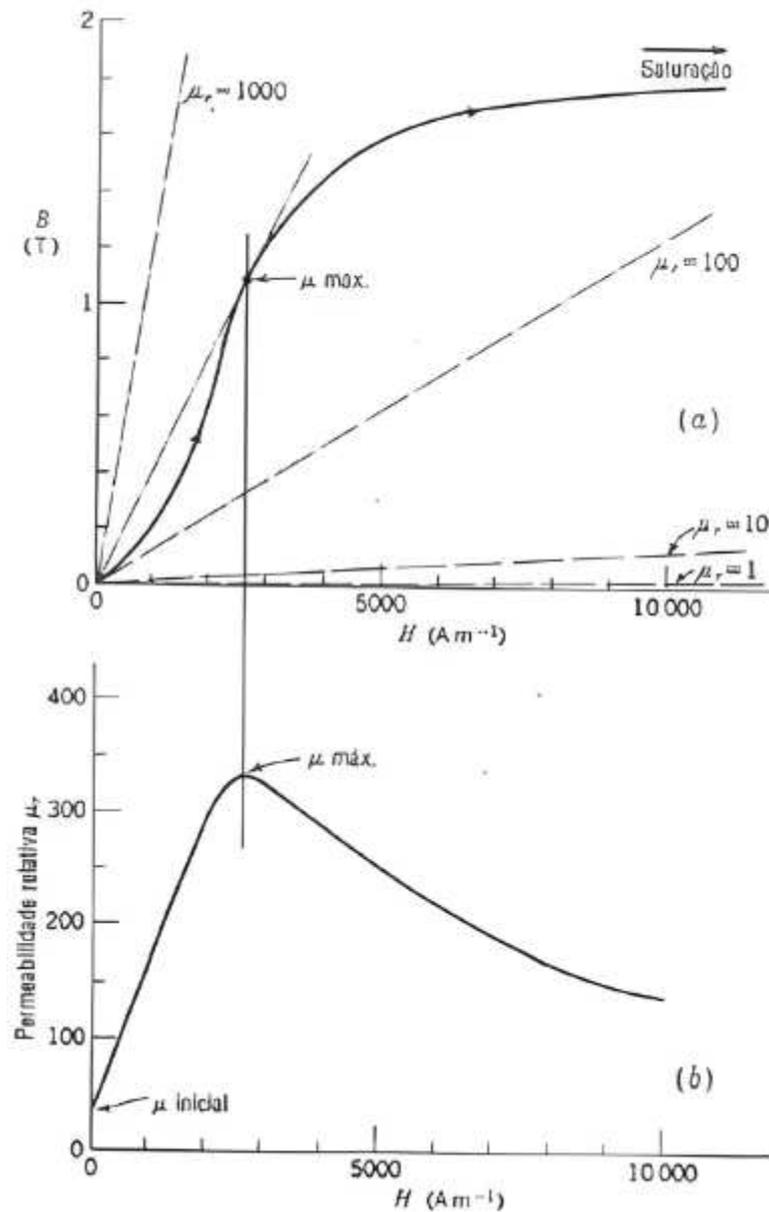


Figura 24: (a) Curva de magnetização, (b) Relação entre a permeabilidade relativa e o campo aplicado;

Aplicações de SMC's dependem do êxito das características ditas "históricas", e estas, se constituem num valioso parâmetro para nortear os mecanismos de magnetização e aplicações do material, ainda, são determinadas por uma iteração complexa do movimento nos domínios magnéticos à rotação de vetores de magnetização locais. Estudando-se curvas de comportamento, tem-se o grande benefício para construção de teorias gerais para interpretação do fenômeno da histerese e, também, para se desenvolver modelos adjunto a um design ideal de inovadores dispositivos (LIN *et al.*, 2006; LIN; ZHU, 2007; UMANS, 2019).

Quando da densidade de fluxo aumenta, há-se que na rotação da tipologia (Figura 25), frente à perda por histerese, decai rapidamente, e, desaparece ao ponto que a densidade de fluxo atinge o valor saturado para o material, enquanto nesse caso, a perda de histerese continua a aumentar (GUO *et al.*, 2008; BA *et al.*, 2018). Altas correntes de magnetização e, forças do campo magnético, ocorrem devido ao cisalhamento interno, que é formado de espaços de ar que são “introduzidos”, assim, a curva de magnetização normal inclina-se cada vez mais, e, as altas forças do campo magnético causam uma alta demanda energética (PARK *et. al.*, 2009; LIU *et al.*, 2016).

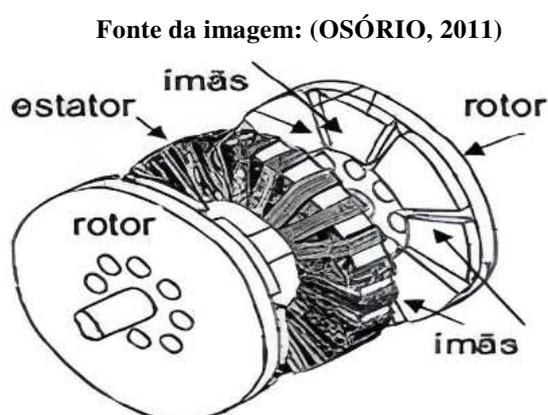


Figura 25: Partes da máquina de fluxo axial;

Ao que segue, máquinas elétricas com fluxo magnético (3-D) se fazem distintas para aplicações de alta eficiência, em contrapartida exigem altas frequências, ainda, SMC's são aptas a oferecer aumento na densidade de potência, podendo então, superar o desempenho dos comerciáveis aços elétricos. Ainda, em contraponto, para núcleos laminados, o processamento da fabricação de rotores SMC's, não influencia nas propriedades magnéticas finais (SCHOPPA; DELARBRE, 2014).

2.3.4 Núcleos de máquinas de fluxo axial

Com a metalúrgica em pó (M/P), as máquinas elétricas com núcleos em SMC tem a possibilidade de serem fabricadas de maneira econômica (LIU *et al.*, 2016). O núcleo sólido SMC possui integridade mecânica superior ao laminado, e, também deve ser mencionado que são de fácil reciclagem (IANCU *et al.*, 2006). Particularmente, a isotropia magnética cria vantagens no design, não havendo restrições de campo magnético impostas na tecnologia laminada (GUO *et al.*, 2005). O aumento da frequência faz com que as perdas magnéticas no núcleo aumentem de forma crítica, nesse caso, a anisotropia magnética é causada

principalmente por estresse durante a preparação do material SMC, a coercividade é aumentada na direção de compressão devido à alteração do tamanho de grão, no dito caso, a direção de magnetização é sempre ao longo da direção comprimida, deve-se dar atenção especial a este ponto, pois, para a perda no núcleo aumenta-se numa proporção direta a referida região de compressão na formação da peça (LI *et al.*, 2014). Atenta-se ao processo na alínea de que, sendo o trabalho mecânico aplicado à peça, este, indiscutivelmente, produzirá luxações e, campos de tensão na superfície da peça, assim, dependendo da gravidade da operação do processo, poderá-se aumentar a força coerciva e ainda, elevar o nível de perdas por histerese (BAS *et al.*, 2003; LI *et al.*, 2012).

As literaturas de máquinas elétricas, no geral, indicam o fluxo de ligação e, leis de corte de fluxo como totalmente equivalentes, o que simplificaria os modelos, entretanto, isso é verdade apenas em alguns casos muito especiais e de simples solução (WANG, 1992). O conhecimento detalhado da distribuição de campo permite então, a concepção do dispositivo e, otimização de suas várias dimensões, a um custo competitivo (MEUNIER, 2008; LI *et al.*, 2016). Uma previsão precisa da perda do núcleo torna-se crucial para o projeto e, a otimização de motores de alto desempenho com esses mesmos (BA *et al.*, 2018). No geral, para estimativas de máquinas deste tipo, (Figura 26), usam-se metodologias de elementos finitos, o papel de um elemento finito é interpolar um campo em um espaço de função de finita dimensão, e isso, localmente, e geralmente, dado em um campo de espaço com topologia simples, o chamado “elemento geométrico” (BASTOS; SADOWSKI, 2005). Devido à rotação dos domínios magnéticos, a aferição (3-D) a partir da modelagem magnética fica necessária para a compreensão completa do processo de magnetização no SMC (GUO *et al.*, 2005).

Fonte da imagem: (LOUREIRO 2008)

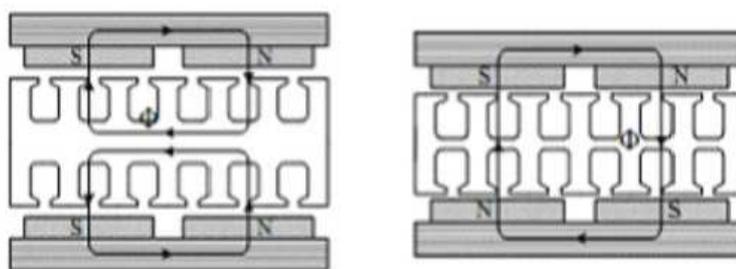


Figura 26: Topologias máquinas de fluxo axial tipo Norte – Norte á esquerda e, tipo Norte – Sul á direita;

2.4 Elementos finitos aplicados em 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 parrear 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 á interpretação geométrica destas funções que, são feita então, com uso de tetraedros no intuito de discretizar o modelo (Figura 27-a). 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).

Fonte da imagem: (LIU et al. 2021);

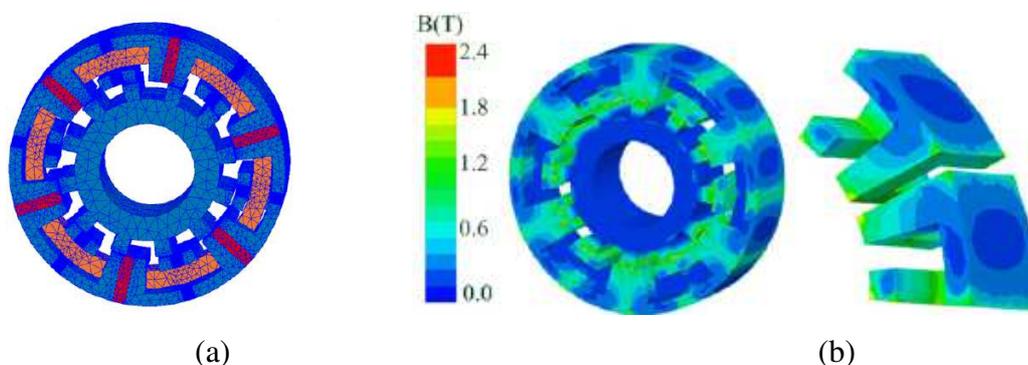


Figura 27: Distribuições de malha (esquerda) e, densidade de fluxo resultante do cálculo (direita);

A partir do ponto a ser resolvido, seja de ordem eletroestático, 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 seguinte 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).

2.4.1 Máquina elétrica de fluxo axial com duplo rotor e armadura segmentada (YASA)

A máquina elétrica de fluxo axial (YASA) figura com êxito para com as tradicionais topologias ante a otimização de massa/volume (GOLTZ, 2021). O termo *Yokeless* refere-se à “ausência” de caminho ferromagnético na região bobinada, logo que, na topologia com duplo rotor, o fluxo magnético segue através do material ferromagnético macio (WOOLMER; MCCULLOCH, 2006).

A grande vantagem nas máquinas (toroidais), com enrolamentos, está no menor volume na região de cabeceiras de bobinas. Ainda, a densidade de perdas magnéticas na região da coroa são maiores se comparado aos edentamentos, pois o vetor magnetização na ali possui um comportamento rotacional em função do campo girante, enquanto nos dentes da armadura este efeito é unidirecional (RONGHAI QU; LIPO, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, desenvolve-se a proposta da dissertação, para tanto, dada sequência aos estudos dos pós e, simulação finita, assim, teve-se o andamento aos experimentos no LdTM e LMEAE-UFRGS, desenvolvendo-se no material sinterizado, com os núcleos que concatenam fluxo, de maneira a formular seus parâmetros magnéticos. Assim, comparar-se-á as características deste, com parâmetros já coletados na revisão bibliográfica. O desenvolvimento da rota de pesquisa dá-se na avaliação física das geometrias magnéticas, a partir do mesmo, compor-se-á o núcleo de um estator constituído de novas tecnologias e design, associado à análise de desempenho superior. A caracterização dos materiais foi feita com corpos de prova, que proporcionaram análises físicas/magnéticas, comparando estas com resultados existentes em literatura.

3.1 Estudo de geometria e concepção inicial (rota viabilizadora)

A máquina objetivada teve sua concepção de design no laboratório LMEAE, (GOLTZ, 2021), que tem intuito de utilizá-la em competições de carros elétricos do tipo fórmula para a competição Fórmula SAE. O veículo da equipe E-POWER se comporá inteiramente em termos de responsabilidade ambiental/desempenho com “uso de tração sem combustão”, idealizando-se na discretização em cada roda da geometria da (Figura 28) para tração com acoplamento direto.

Fonte: Adaptado de: <https://www.yasa.com/>;

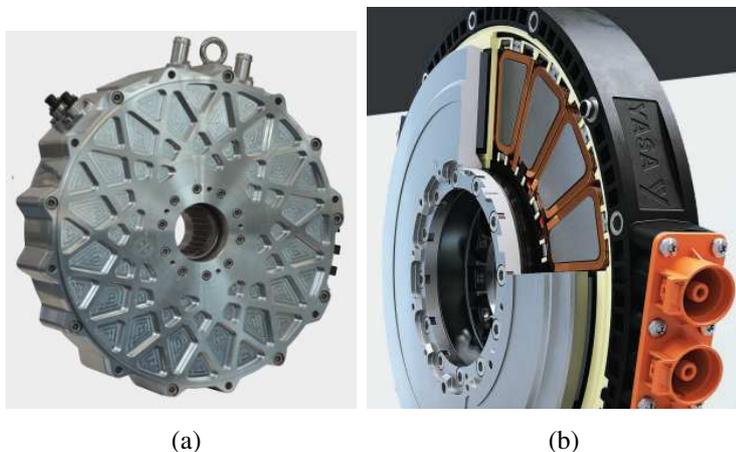


Figura 28: Geometria (diâmetro aprox. 40 cm) (a), e, detalhe do estator de núcleos bobinados (b), respectivamente;

O desenvolvimento de novas geometrias e características de projeto são o impulsionador para as inovações que tangem os próximos passos da concepção deste tipo de projeto, dessa maneira, seu uso numa competição em que se tem por normalidade as máquinas de combustão (Figura 29) torna seu desenvolver numa característica dominante de uma nova filosofia de projeto.

Fonte: <http://portal.saebrasil.org.br/>



Figura 29: Modelo competitivo Fórmula SAE;

A composição da máquina elétrica de fluxo axial, no que tange (M/P) está nos segmentos do estator (Figura 31b), que possuem geometria “inviabilizadora economicamente” ante a atual usinagem em chapas laminadas de aço-silício (Figura 30), além de, ter seu processo de montagem e resinagem deveras oneroso, e, dispendioso em relação ao tempo dedicado de usinagem se comparada a rota sinterizada.

Fonte: Autor;



Figura 30: Núcleo laminado desmontado extraído do processo eletro-erosão, em (a) vista de topo, em (b) vista em perspectiva;

O processo de fabricação contemporaneamente utilizado no LMEAE é a eletro-erosão neste caso específico (figura 31a), onde se dispõe um feixe de chapas laminadas prensado entre duas chapas maciças de aproximadamente 10 mm de espessura (sanduíche) para que se

mantenha no alinhamento durante o corte, assim, no processo em que, mediram-se aproximadas 3 horas de corte para cada segmento (Figura 31c), logo, a peça permanece submersa em um fluido refrigerante para que aconteça a rápida dissipação do calor gerado, pois, não existem esforços tensoativos de corte, dado o não contato entre fio e peça diretamente, assim, o fio de latão eletricamente carregado, atravessa a peça emitindo descargas elétricas, esse fio é programado no computador por um software específico de usinagem em erosão a fio (Figura 31d).

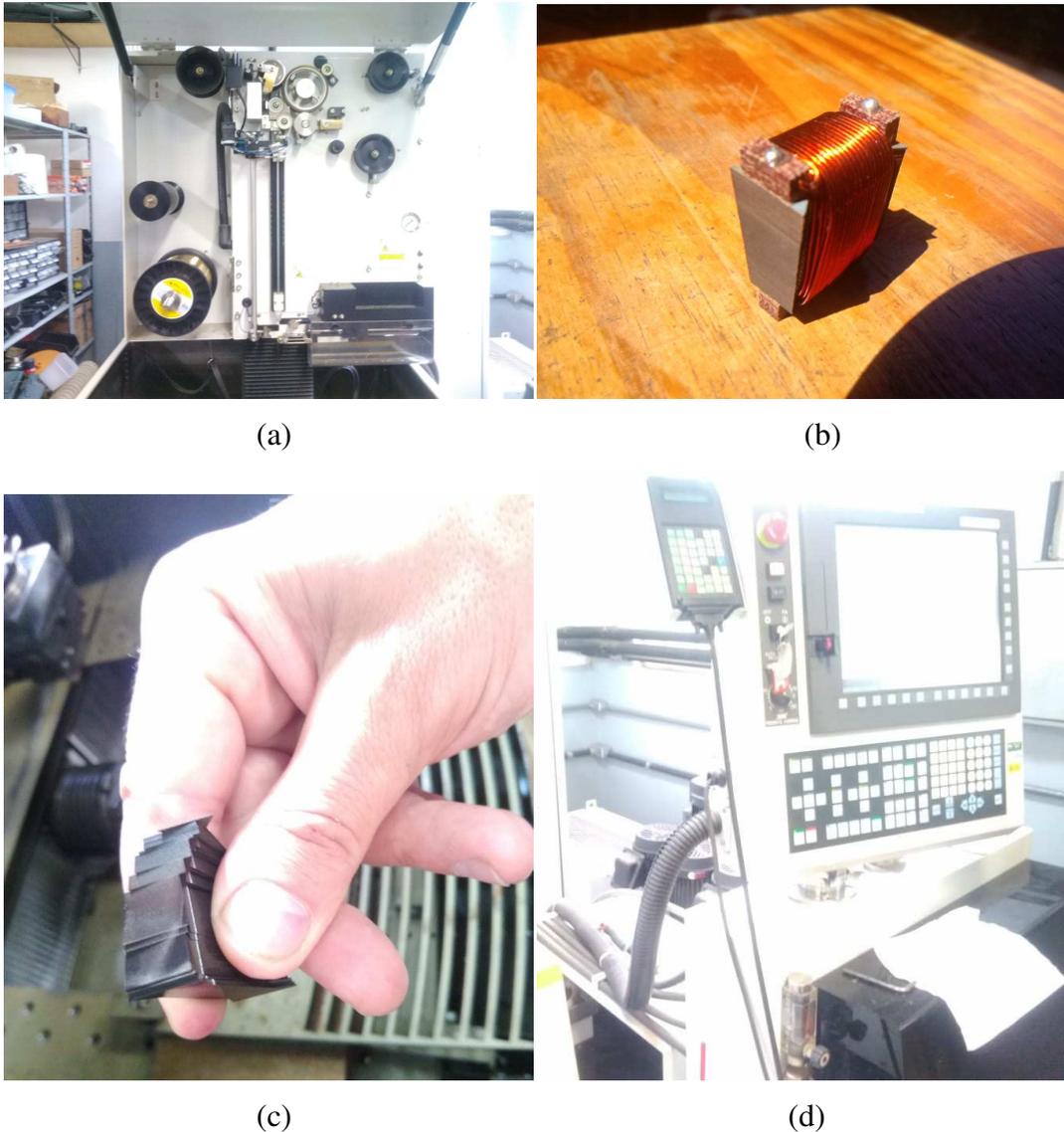


Figura 31: Detalhes da máquina e central de comando respectivamente que executam a usinagem (a e d) e, produto final do processo (b e c);

3.1.1 Modelo matemático e geometria final

A simulação computacional dos materiais SMC se aporta na coleta das características eletromagnético-geométricas do material, tendo em vista, a trabalho/onerosa tarefa de concepção dos corpos de prova e ferramental. Uma alternativa é o processo derivado do processamento em elementos finitos dado pelo software ANSYS ELETRONICS, sendo o mesmo um dos possíveis “processadores” em simulação de problemas magnéticos diversos. Conforme segue (Figura 32), o seguinte design norteia a pesquisa e, os processamentos, de modo a justificar a geometria final de melhor desempenho para construção do polo.

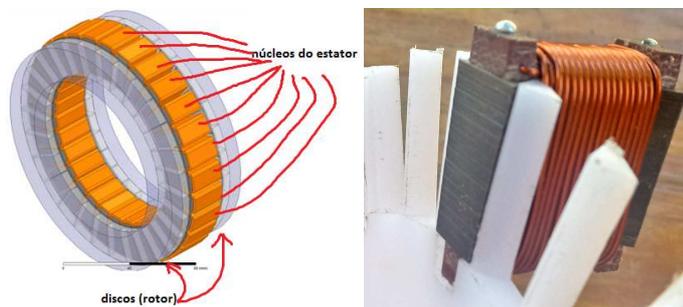


Figura 32: Geometria 3-D, rotor+estator e enrolamentos pertinentes da máquina elétrica (esquerda), núcleo montado (chapas laminadas) em suporte polimérico (direita);

A partir então, desenrolou-se no procedimento para emaranhamento das malhas de controle, que darão suporte as características que nortearão o funcionamento e, indicaram o escopo da maior eficiência. O processamento ocorre de modo a considerar a precisão de uma malha auto-adaptativa desenvolvida pelo software. Para cada um dos polos (Figura 33), tem-se a seguinte geometria que terá encaixe via radial ante-entrelace com uma peça em polímero de coroamento para o estator.

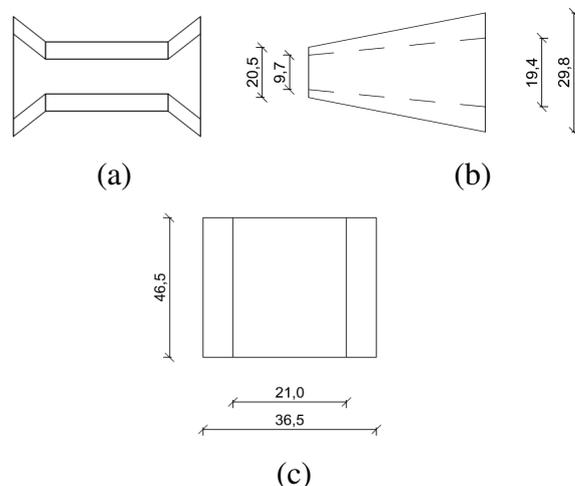


Figura 33: Detalhamento do pólo (estator): (a) Vista frontal, (b) Vista lateral e (c) Vista superior, medidas em milímetros;

Ainda, há-se a seguinte disposição de malhas, e, cabe de se indicar que o próprio solucionador em elementos finitos identifica as regiões de maior densidade de malhas com a indicação de maiores detalhamentos de fluxo e demais características magnéticas, otimizando os tempos de análise, ainda, indica-se que o desenho que se segue possui dois eixos de simetria e a figura abaixo (Figura 34) corresponde à fração de $\frac{1}{4}$ da máquina simulada.

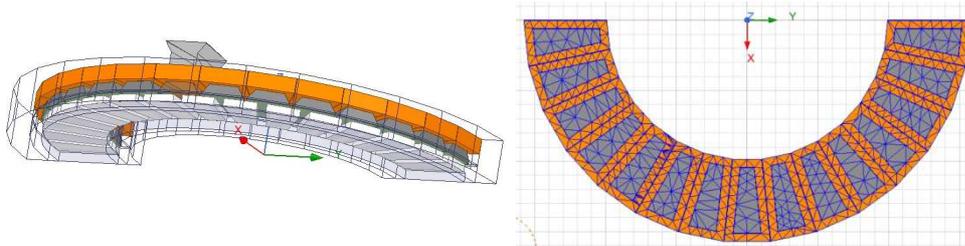


Figura 34: máquina elétrica ($\frac{1}{4}$) com aplicação das malhas para refino de cálculo;

3.1.2 Montagem e detalhamentos da máquina elétrica

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.

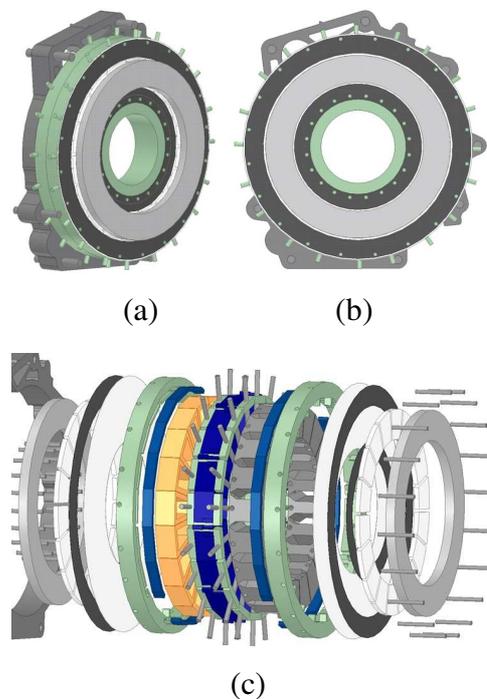


Figura 35: Detalhamento das partes da máquina, (a) vista perfil, (b) vista lateral e, (c) montagem;

Os componentes além dos pesquisados neste trabalho compunham outros trabalhos diversos e patentes ainda contemporaneamente á validar.

3.2 Ferramental/Prensagem/Caracterização

Ao que se segue, tem-se a disposição metódica para fabricação com todos os processos e, decisões que aportaram os resultados ante o estudo. Ainda, indicação das características intrínsecas do processo que culminam às discussões para a abordagem dos resultados.

3.2.1 Desenvolvimento das matrizes

A escolha do aço do ferramental partiu dentre as possibilidades disponibilizadas pelo PPGE3M (Aço tipo H13) para concepção destes ferramentais, calculados pela equipe da empresa G1 Equipamentos, dada matriz do caracterizador e pólo, respectivamente, tem-se na (Figura 36) 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.

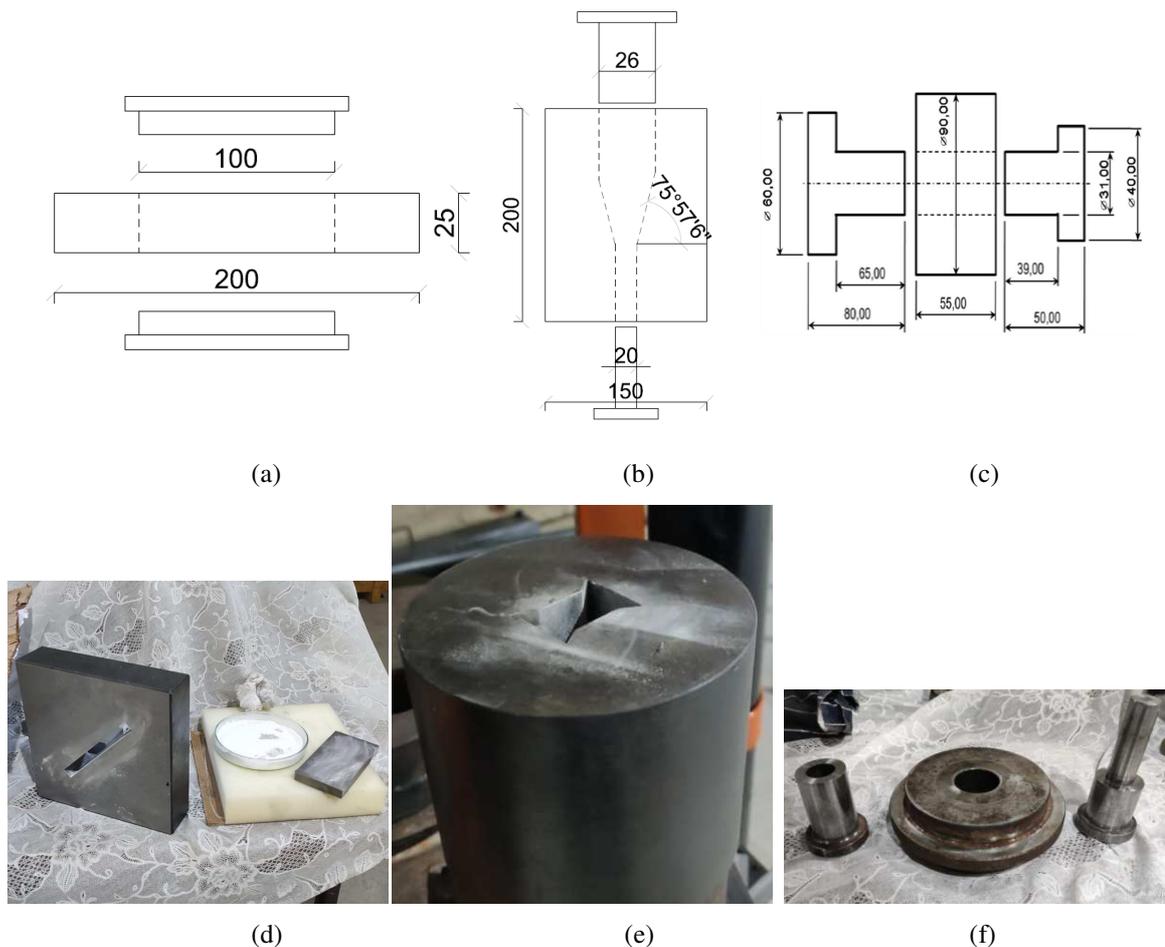


Figura 36: Projeto e executadas das matrizes, amostrador (a/d), pólo do estator (b/e), e, anel de Rowland (c/f), com aplicação de estearato de zinco;

A matriz (Figura 36a) 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 36b) tornar-se-á o objeto pretendido deste trabalho e, a matriz (Figura 36c) 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.

3.2.2 Prensagem das geometrias (EKA-PKL40)

Para compactação dos núcleos do estator, realizou-se na prensa hidráulica marca EKA modelo PKL40, com capacidade de 400.000 N, velocidade de prensagem: 2,0 mm/s, curso: 500 mm e, dimensões úteis da mesa: 500X300 mm (Figura 37). A pressão utilizada para a compactação foi 800.000 Pa, ajustando-se a força para as devidas áreas de compactação, todavia, sempre garantindo-se a densidade mínima do material, de $7,5\text{g/cm}^3$, conforme manual do fabricante.

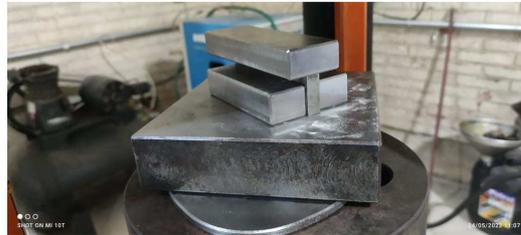


Figura 37: Detalhe do processo de compactação (EKA-PKL40);

3.2.3 Compactação (Geometrias de caracterização/Núcleo do estator)

Dadas as matrizes, para a obtenção dos corpos de prova em questão, à técnica utilizada foi à compactação unidirecional, este tipo, gera influência a zona neutra, região em que os póis sofrem gradiente de pressão e conseqüente gradiente de densidade do compactado. A justificativa destas matrizes se dá na verificação de características magnéticas dos produtos, ainda, a partir da matriz amostradora, constitui-se a peça (Figura 38 a e b) a qual, depois de

executado processo de sinterização, possibilitou desenvolverem-se análises de metalografia e, caracterização para uso no modelo de elementos finitos, a qual também se aplica á (Figura 38c).



(a)



(b)



(c)

Figura 38: Detalhe de compactação, (a) barra caracterizadora, (b) pólo da máquina elétrica e, (c) anel de Rowland;

Para as peças de barra do anel e pólo foram utilizados, 75, 50 e 196 g, e, forças na faixa de 75, 80 e 100 toneladas para compactação.

3.2.4 Caracterização eletromagnética (REMAGRAPH® C – 500 e TCH)

Para caracterização das geometrias teste das amostras, as quais validam a eficiência dos núcleos do estator, objeto deste trabalho, utilizou-se do equipamento REMAGRAPH® C, (Figura 39), equipamento este localizado nas dependências do LMEAE, ele mede as curvas de histerese, (quase) estáticas (DC), de materiais SMC's, a partir de geometrias que são fixadas com um sistema de bobina de medição entre polos, e, estas bobinas são conectadas a dois fluxômetros eletrônicos. A polarização magnética J é aferida em função da intensidade do campo interno H , assim, a densidade de fluxo B é calculada a partir da polarização para que as curvas sejam representadas. Logo, a intensidade do campo H é determinada por uma bobina de potencial, esta, mede a diferença de potencial entre dois pontos na superfície da amostra.



(a)



(b)



(c)

Figura 39: Detalhes do processo de caracterização magnética (REMAGRAPH® C - 500) - processo com amostra fixada (a), equipamento de aferimento em detalhe (b) e, detalhe dos fixadores (c);

A amostra fica presa na REMAGRAPH[®] C com "fixadores" de material liga Fe-Co, conhecida liga de mercado pela nomenclatura "*supermalloy*", dada característica de não influenciar para com a amostra no quesito de saturação, logo que, garante que o material preso sature "infinitas" vezes mais rápido que o material do fixador.

Ainda, para determinação do loop de histerese das amostras utilizou-se o Traçador de Curvas de Histerese Magnética (TCH) v. 141101, (Figura 40), que fora utilizado nas dependências do LdTM-UFRGS, ante as seguintes características:



Figura 40: Traçador de Curvas de Histerese Magnética;

Este equipamento realiza a caracterização de materiais ferromagnéticos (alta permeabilidade), partindo-se de amostras toroidais, que, são bobinadas com dois enrolamentos, sendo o primário usado para gerar o campo magnetizante (H) e no secundário mede-se a indução magnética (B), este equipamento opera usualmente para as seguintes faixas de resultados:

- Curva de Histerese Magnética (0,05 Hz a 400 Hz senoidal);
- Curva de Permeabilidade AC (0,1 Hz a 400 Hz senoidal);
- Estimativa das Perdas Magnéticas (pela área do ciclo de histerese)

Seguindo-se no diagrama (Figura 41), têm-se as seguintes paramétricas:

Fonte: Manual TCH-141101;

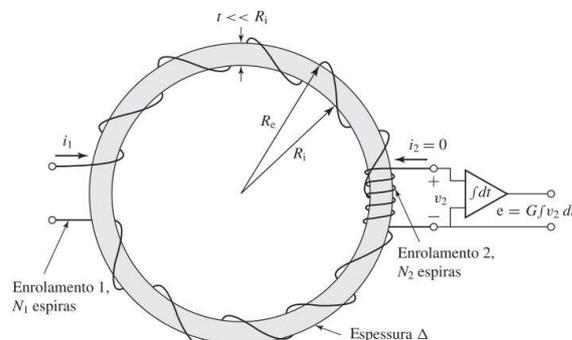


Figura 41: Medição do loop histerese, tal que: N1 espiras, produz um campo magnético ao redor do núcleo, já N2 espiras, é usado para captar o fluxo magnético resultante;

Nos ensaios objetivam-se mensurar a taxa de perda de energia e confeccionar gráficos característicos do ciclo de histerese. Para tanto, deve-se tomar os seguintes equacionamentos:

- a) Calcula-se a Seção Transversal S_T , em mm^2 ;

$$S_T = \left(\frac{\phi_{ext}}{2} - \frac{\phi_{int}}{2} \right) \times h \quad (\text{Eq. 04})$$

Onde ϕ_{ext} é o diâmetro externo, ϕ_{int} é o diâmetro interno e h é a altura.

- b) Calcula-se a densidade do anel sinterizado pela equação abaixo:

$$d = \frac{\text{massa}}{\pi \cdot h \cdot \left(\frac{\phi_{ext}^2}{4} - \frac{\phi_{int}^2}{4} \right)} \quad (\text{Eq. 05})$$

Sendo d a densidade do anel, h a altura, ϕ_{ext} o diâmetro externo e ϕ_{int} o diâmetro interno.

- c) Calcula-se a densidade de espiras do primário pela Equação 06, dada a importância deste parâmetro para cálculo da curva de histerese do material:

$$d_{pri} = \frac{N_P}{\pi \cdot (\phi_{ext} + \phi_{int}) / 2} \quad (\text{Eq. 06})$$

Sendo d_{pri} a densidade de espiras do primário [esp/mm], N_P o número de espiras do primário, ϕ_{ext} o diâmetro externo [mm] e ϕ_{int} o diâmetro interno [mm].

3.2.5 Metalografia e análise microscópica (Zeiss EVO MA10)

O equipamento ao qual se obtiveram os resultados de vista á microestrutura, fora a partir da MEV Zeiss EVO MA10, (Figura 42), este localizado nas dependências do CMM-UFRGS, que é um microscópio de varredura com filamento de tungstênio operando de 200 V até 30.000 V, sendo a resolução nominal na faixa de 3nm em máxima tensão, ela está equipada com detectores de elétrons secundários e retroespalhados, ainda, detector de raios-X característicos (EDS) para aferimento de composição química.

Fonte: <https://www.ufrgs.br/cmm/>



Figura 42: Microscópio Zeiss EVO MA10;

4 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Para as análises têm-se as seguintes premissas:

- a) Análise de simulações do núcleo e construção do produto final;
- b) Análise metalográfica do núcleo, com viés de mensuração de porosidade residual, avaliação das camadas isolantes, formato do grão e composição (MEV/EDS), ainda, parte-se da preparação das amostras com polimento contínuo e ataque químico adequado;
- c) Caracterização ante coercitividade, permissividade e análise perdas de Foucault (Traçador de curvas) a partir dos equipamentos de aferição ligadas pelo capítulo anterior;
- d) Comparação dos resultados em elementos finitos para com o modelo em chapas de aço silício (tecnologia comumente empregada) e entre pós Somaloy de aplicação em máquinas elétricas;
- e) Discussão das limitantes de processo e aferimento da qualidade de processo no uso para com o preterido projeto.

4.1 Análise elementos finitos

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, que comprovam refino das estruturas construídas com a disposição dos caminhos de fluxo magnético para o modelo matemático final (Figuras 36 a 38).

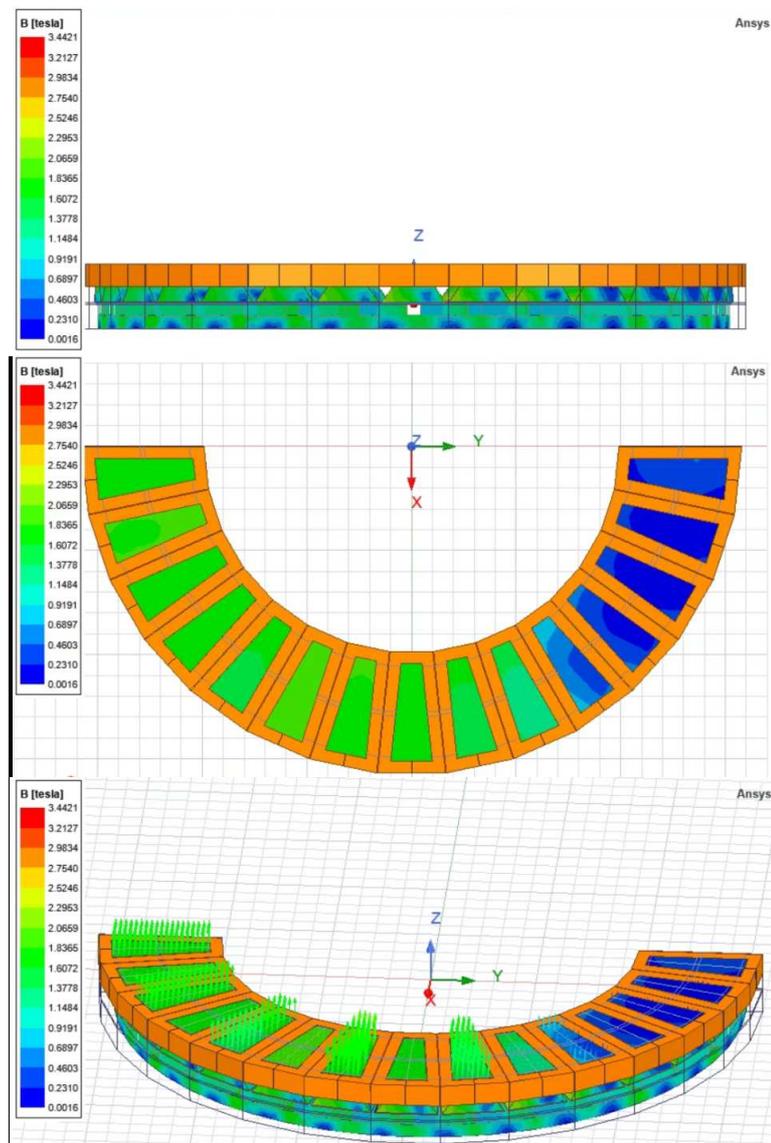


Figura 43: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 1P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;

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.

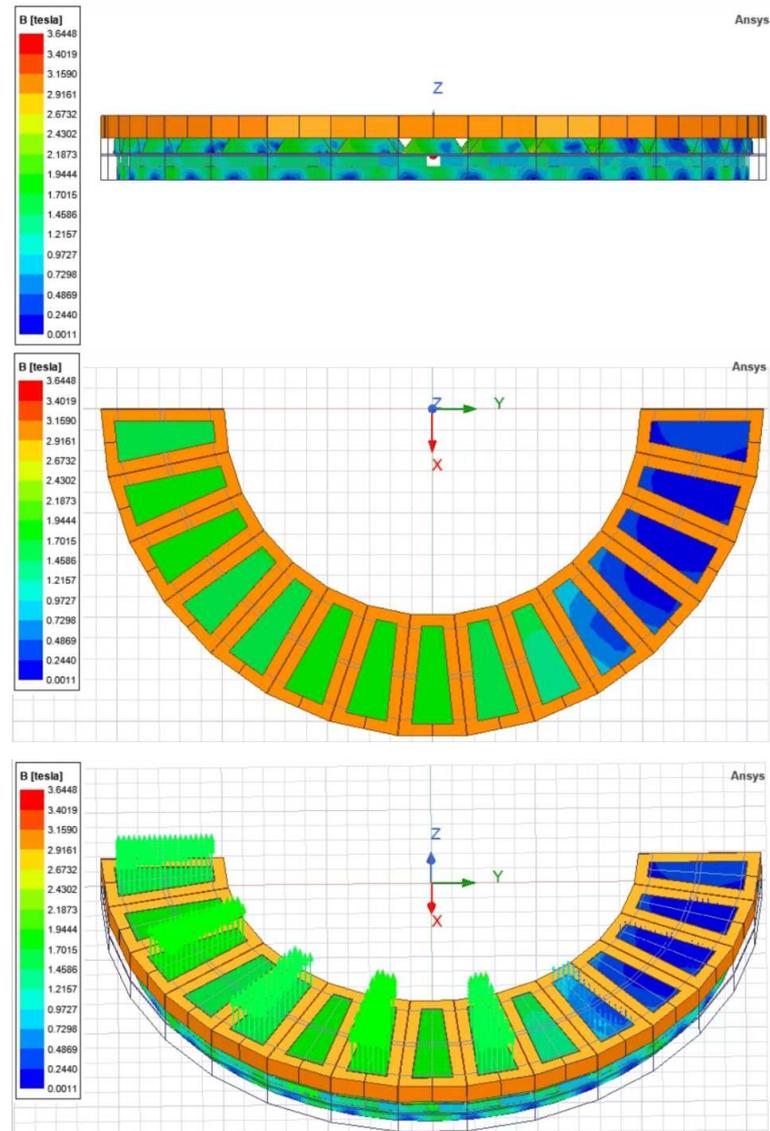


Figura 44: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 3P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;

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.

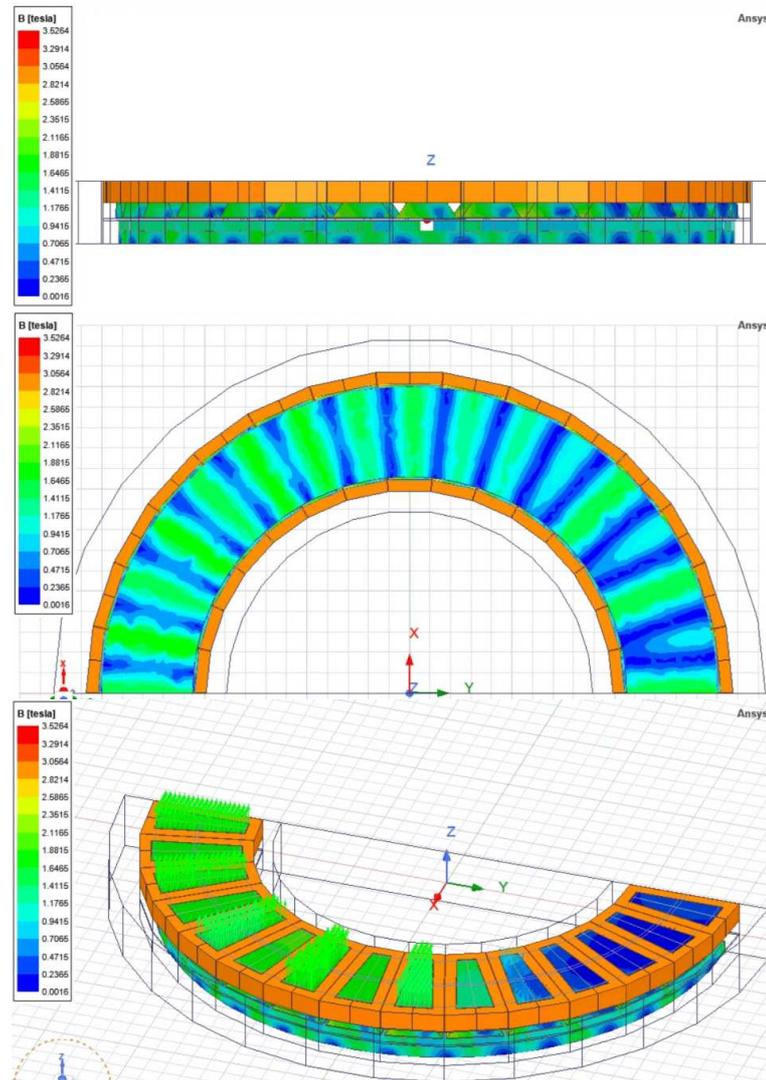


Figura 45: Simulação em elementos finitos para Somaloy® 700 5P com vistas lateral, superior e perspectiva, respectivamente;

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.

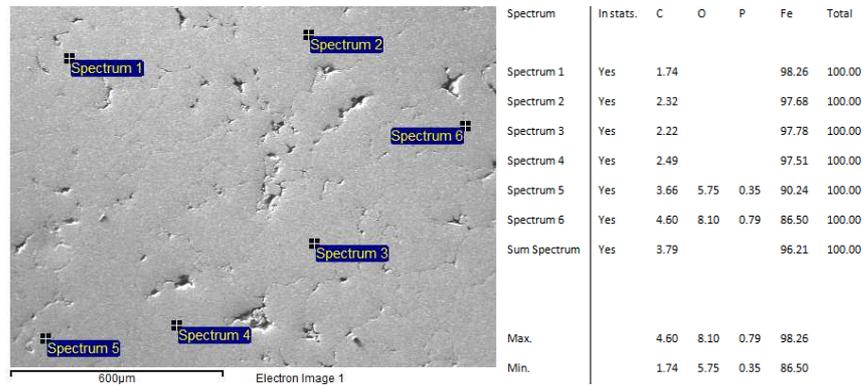
4.2 Análise metalográfica

As Figuras 47 até 49 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 vazios (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 aço. 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 46). Como pode ser observado as maiores composições estão entre ferro e carbonato de cálcio, tal que, para todas as amostras, quanto à legenda das imagens, C é o composto CaCO_3 , O é o composto SiO_2 , P é P e, Fe é o composto Fe.

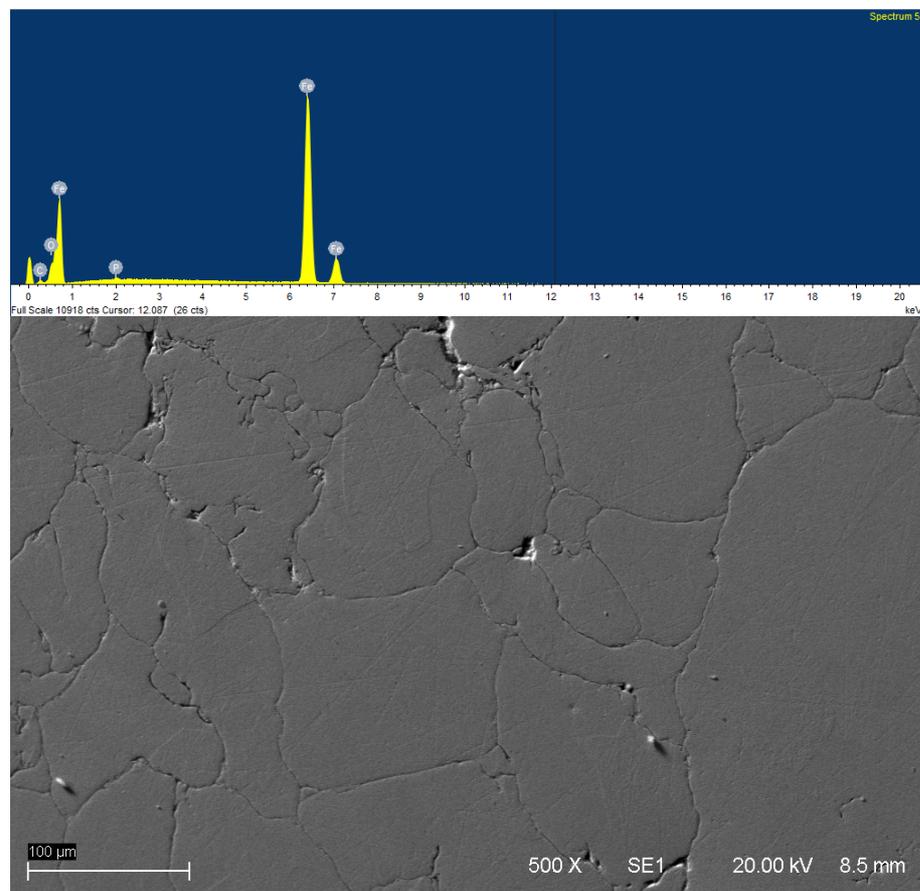


Figura 46: (a) Polo e, (b) frações embutidas para análise de Somaloy® 5P, 3P e, 1P respectivamente em sentido horário (amostras embutidas, lixadas e polidas com pasta diamantada);



(a)

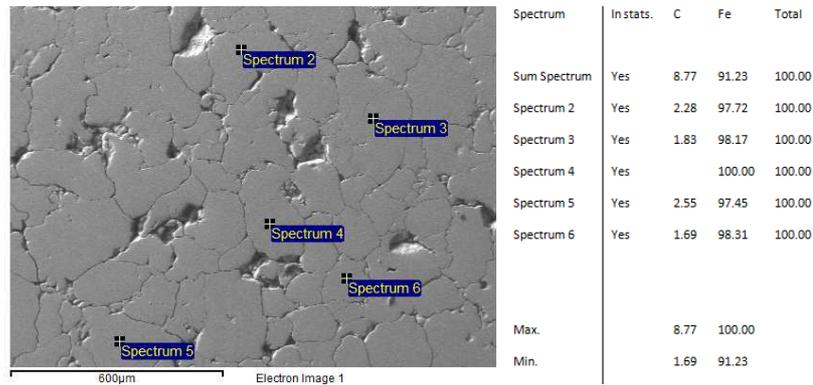
(b)



(c)

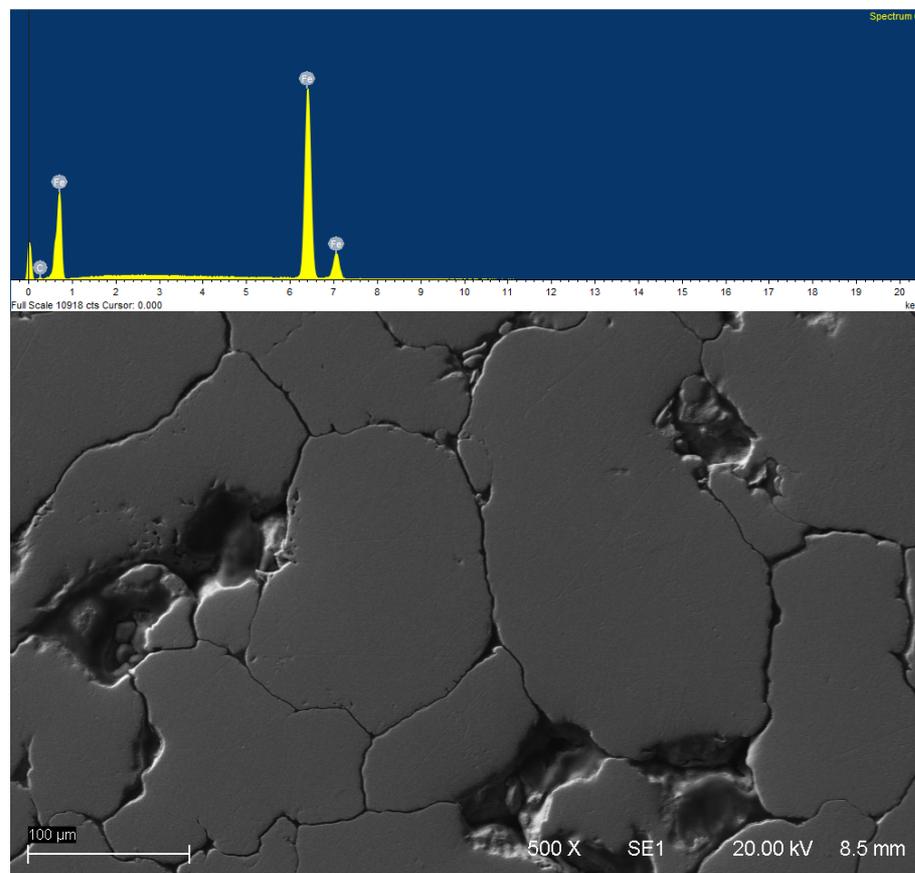
Figura 47: Análise metalográfica (Somaloy® 700 1P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);

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 CaCO_3 , O é o composto SiO_2 , P é P e, Fe é o elemento Fe.



(a)

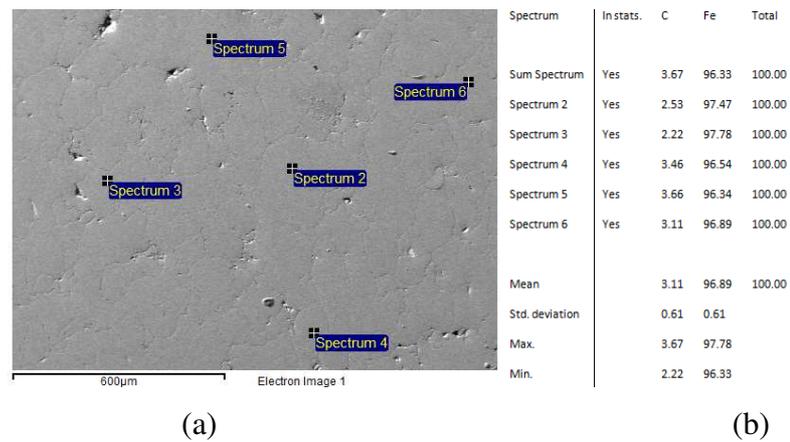
(b)



(c)

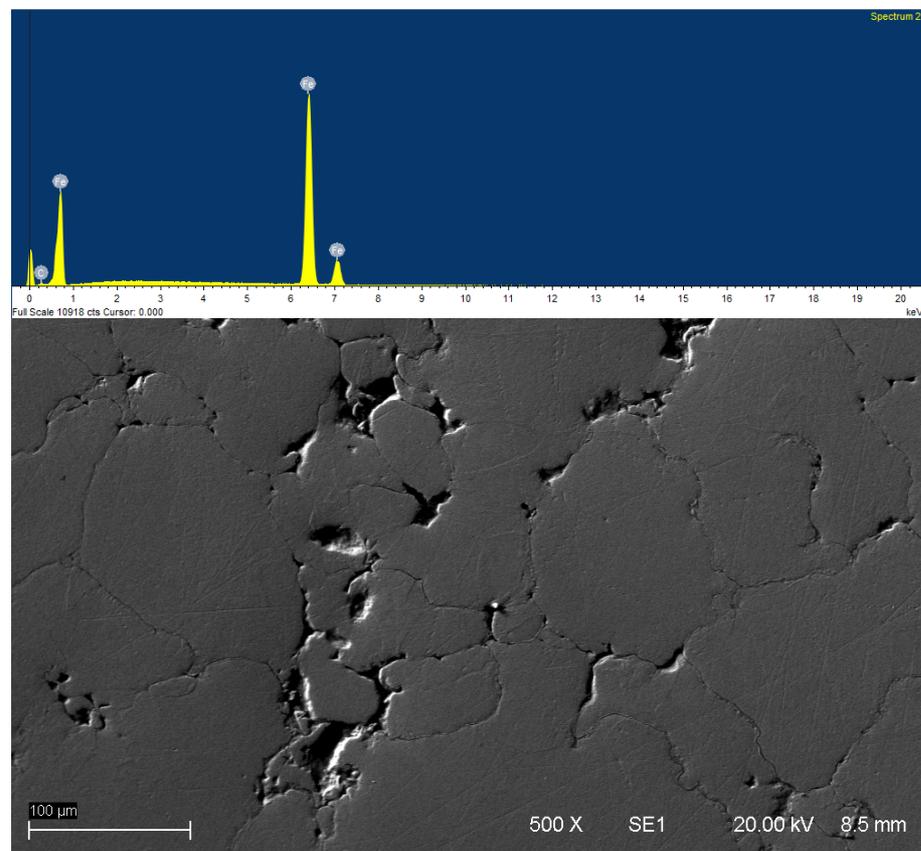
Figura 48: Análise metalográfica (Somaloy® 700 3P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);

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 CaCO_3 , O é o composto SiO_2 , P é P e, Fe é o elemento Fe.



(a)

(b)



(c)

Figura 49: Análise metalográfica (Somaloy® 700 5P) com definição, aumento 200X (a), composição resumida (b) e, aumento 500X (c);

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 CaCO_3 , O é o composto SiO_2 , P é P e, Fe é o elemento Fe.

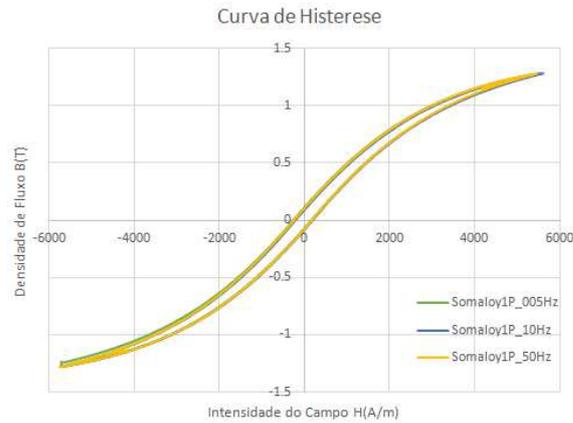
Aos resultados que se compunham teve-se a disposição dos produtos de cura no que procede ao entregão, logo são visuais que os grãos não se tocam, garantindo a mitigação dos efeitos parasitários clássicos e, tornando-se a garantia que o processo teve êxito no que tange á produção das geometrias em metalurgia 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.

4.3 Análise de propriedades magnéticas (TCH)

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 (Figuras 50 a 52), 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 possuíam 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.

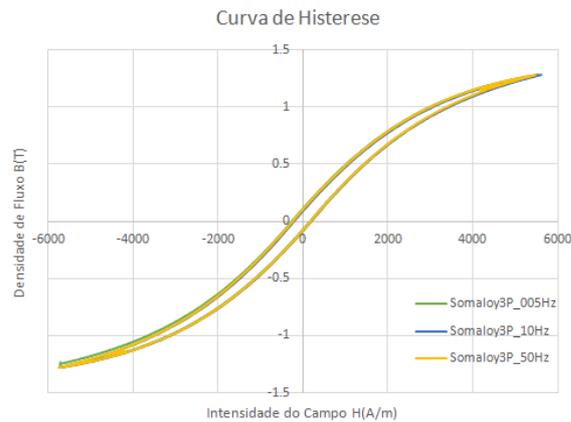
Assim, estas propriedades magnéticas são analisadas a partir da curva de histerese, em que se tem o campo magnético H aplicado a um material com indução magnética B resultante conforme se segue.



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: 810.186 J/m3

Figura 50: Loop de histerese (Somaloy® 700 1P);

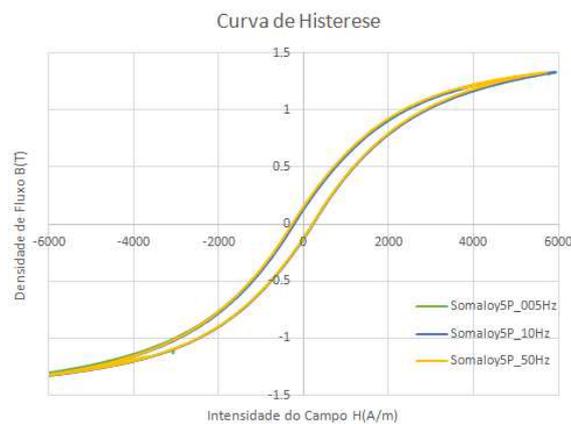
Acima, tem-se o *loop* de histerese para Somaloy® 700 1P para frequências de 0,05, 10 e 50 hz, ao qual se vê comportamento análogo e, nível de perdas na faixa média de 800J/m³.



Somaloy3P_005Hz	Somaloy3P_10Hz	Somaloy5P_30Hz
Somaloy 3P 2807	Somaloy 3P 2807	Somaloy 3P 2807
Ensaio de Histerese	Ensaio de Histerese	Ensaio de Histerese
#2022-07-27 10:52:24#	#2022-07-27 10:53:59#	#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: 224	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: 1460.968 J/m3	Perdas: 3291.594 J/m3

Figura 51: Loop de histerese (Somaloy® 700 3P);

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/m³.



Somaloy5P_005Hz	Somaloy5P_10Hz	Somaloy5P_50Hz
Somaloy 5P 2807	Somaloy 5P 2807	Somaloy 5P 2807
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: 1273.417 J/m3	Perdas: 1147.903 J/m3	Perdas: 1213.779 J/m3

Figura 52: Loop de histerese (Somaloy® 700 5P);

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/m³.

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 53 a 55):

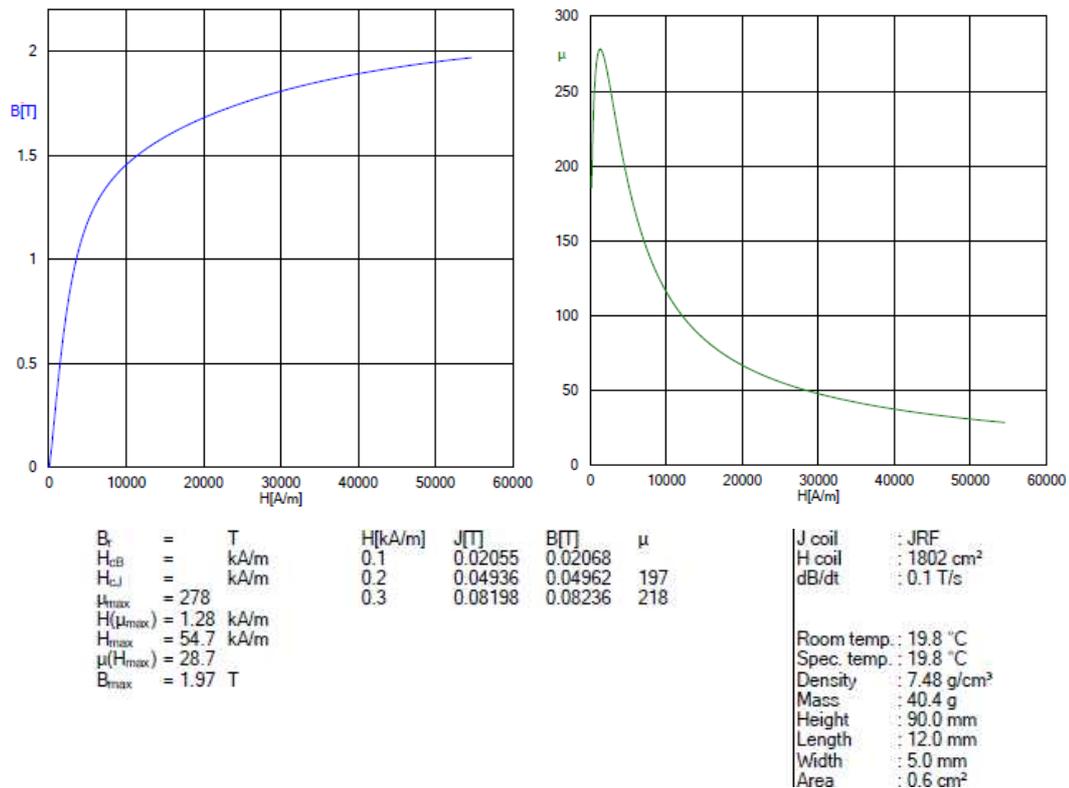


Figura 53: Dados caracterizados Somaloy® 700 1P;

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.

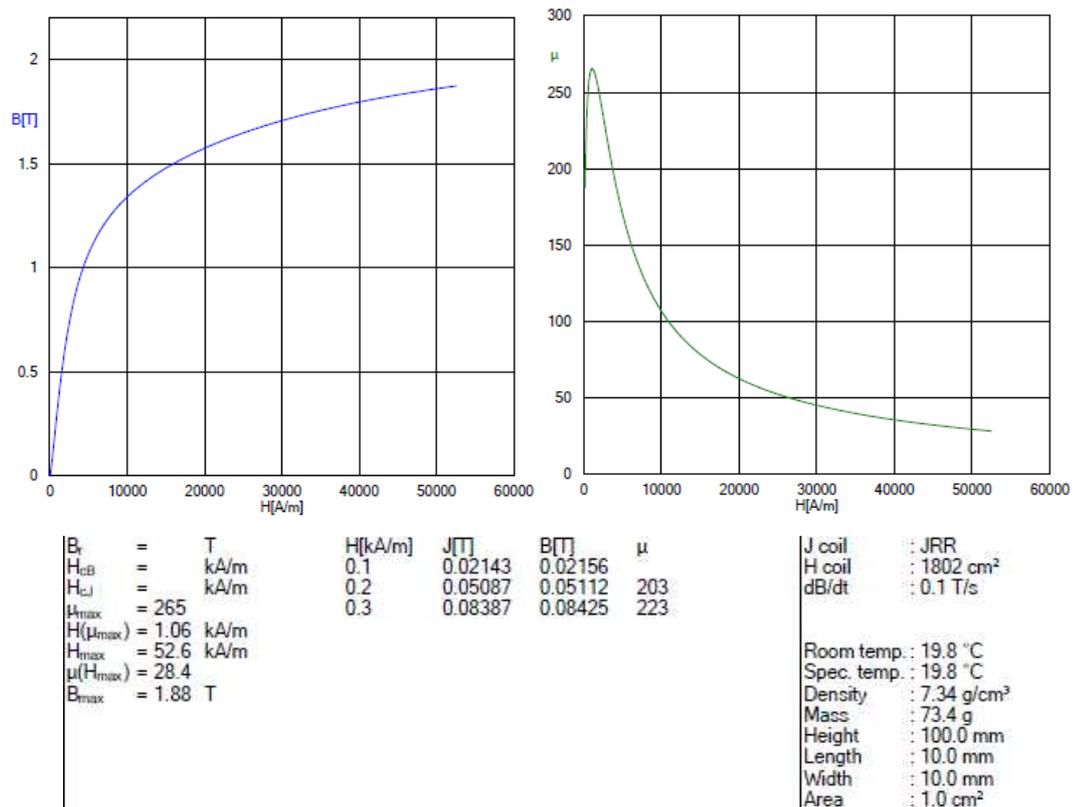


Figura 54: Dados caracterizados Somaloy® 700 3P;

Acima, tem-se a curva de magnetização inicial e curva de permeabilidade para Somaloy® 700 3P, sendo a permeabilidade máxima ficou em 265 e, B_{max} . ficou em 1,88T para o devido processo de fabricação o qual seguiu-se manual do fabricante.

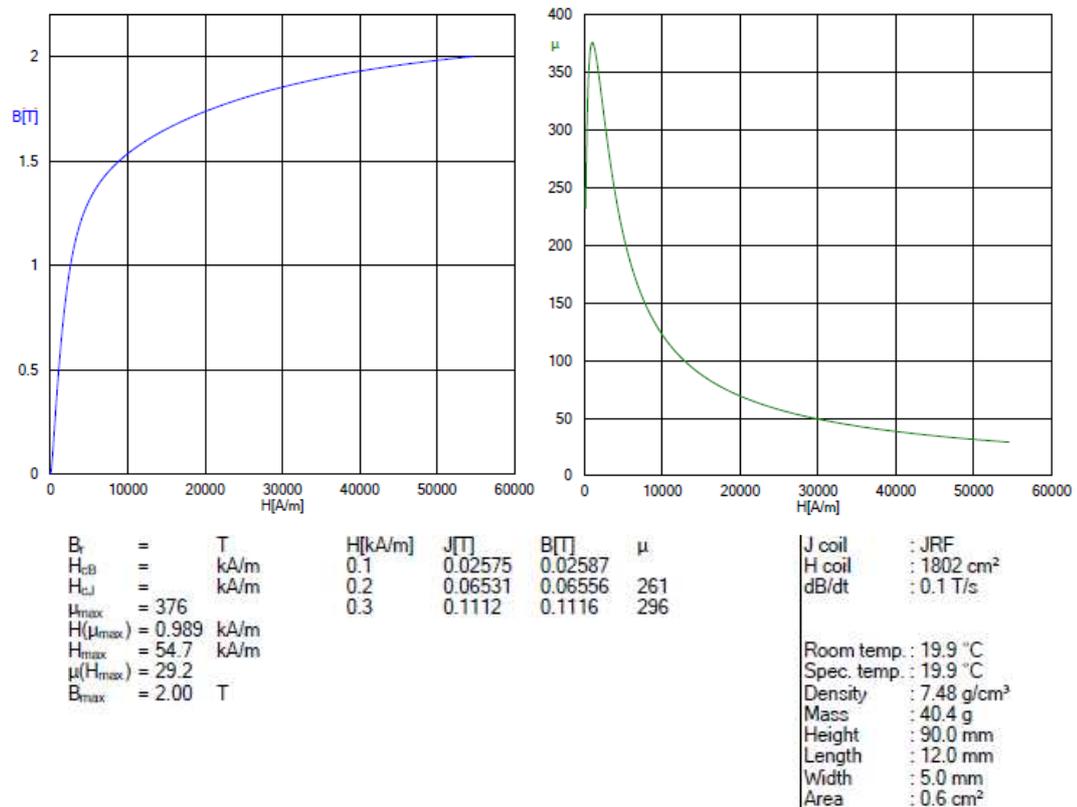


Figura 55: Dados caracterizados Somaloy® 700 5P;

Acima, tem-se a curva de magnetização inicial e curva de permeabilidade para Somaloy® 700 5P, sendo a permeabilidade máxima ficou em 376 e, B_{max} . 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 esvaiu 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.

5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguinte discursação de resultados se pauta nas características mecânicas de intertrave de grãos e, características magnéticas intrínsecas á caracterização de geometrias base para validação no uso em máquinas de fluxo axial seguindo-se nas características.

5.1 Comparativo entre modelos de chapas com materiais SMC

Ao que se segue, avaliam-se os comportamentos das ligas Somaloy® ante ao composto laminado de grão não orientado comercialmente utilizado (Figura 56), 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.

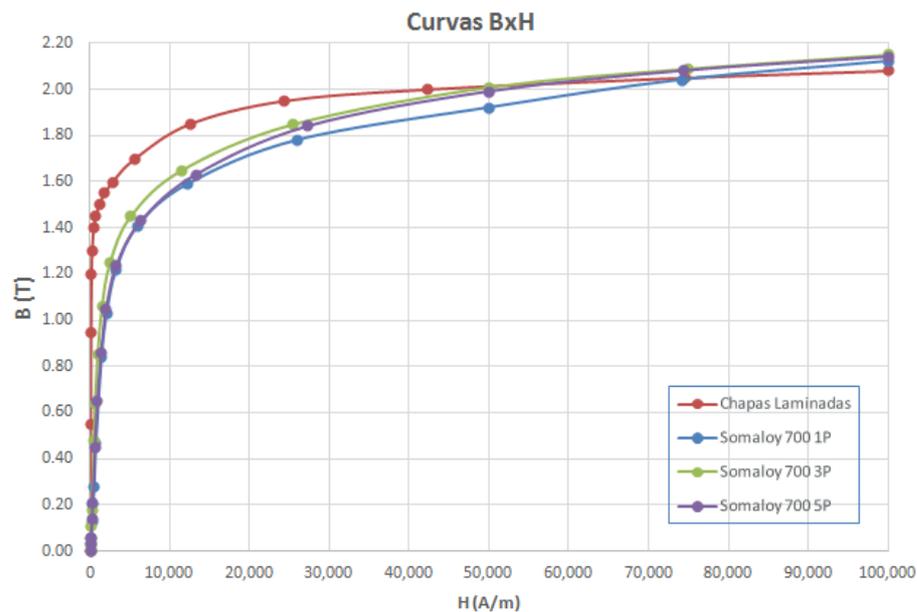


Figura 56: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo entre si dos materiais (Chapas laminadas, e Somaloy®, 1P, 3P e 5P, respectivamente;

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:

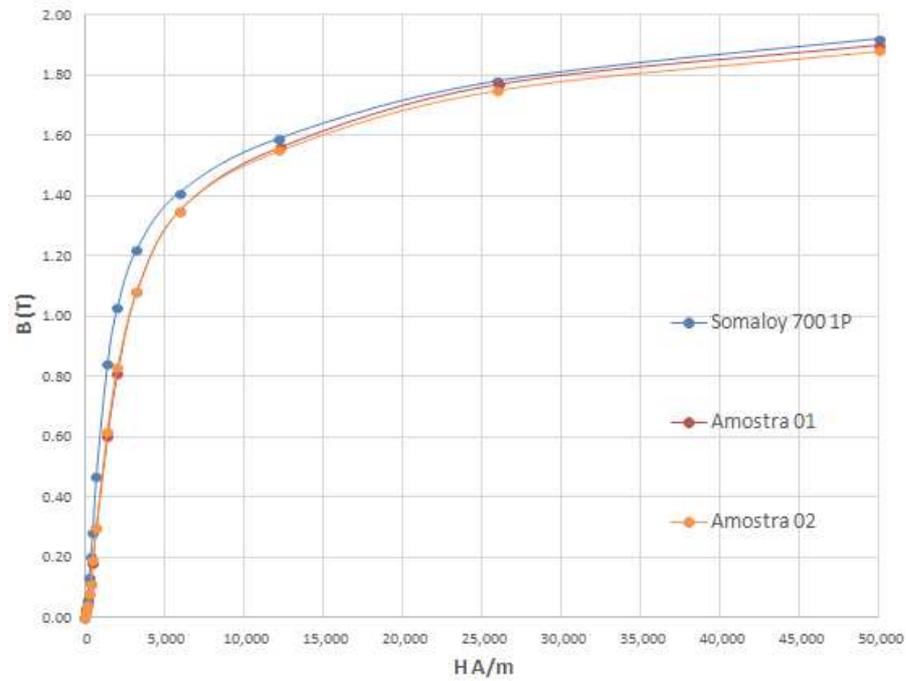


Figura 57: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 1P;

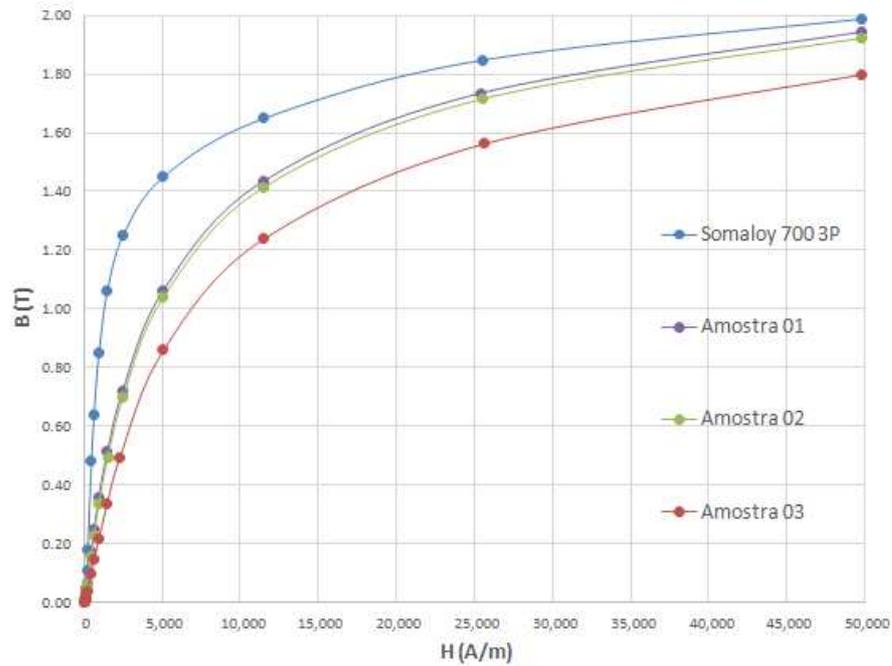


Figura 58: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 3P;

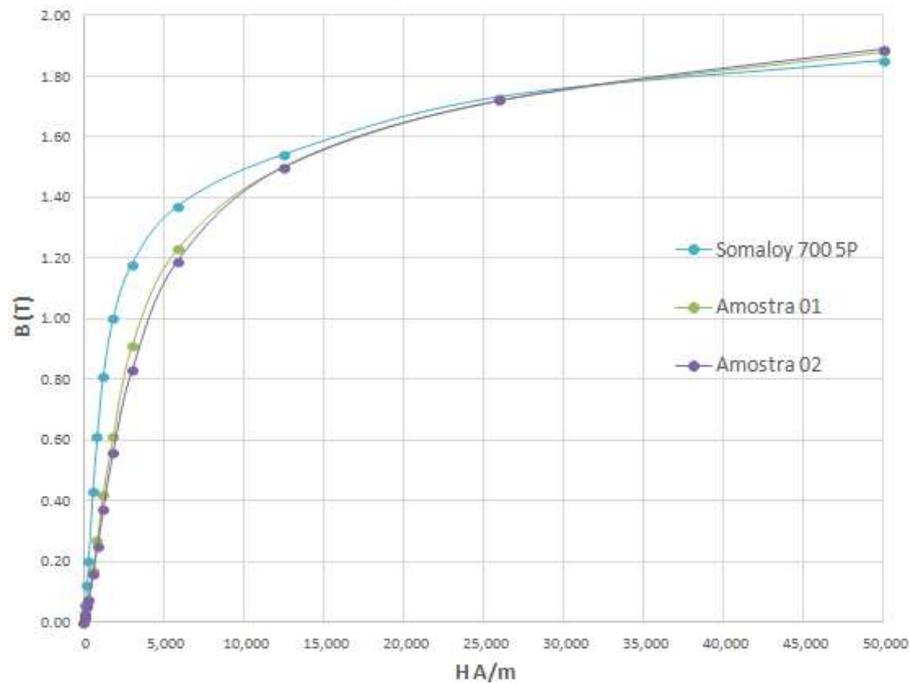


Figura 59: Desempenho aferido a partir do manual e comparativo com amostras prensadas e sinterizadas de Somaloy 700 5P;

Assim, os dados evidenciam o comportamento de proximidade se comparado ao composto de chapas de aço silício, dado este ponto, e, á característica de alta produção preferida 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.

6 CONCLUSÕES

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. 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.

7 SUJESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os seguintes temas podem ser abordados, dada à importância da continuidade da linha de pesquisa:

- Construção de motores com núcleo do rotor, desta vez, de material sinterizado para realização de ensaios comparativos;
- Aprofundar os estudos e desenvolvimento de novos pós para comparação.
- Melhorias no processo de oxidação interna da peça para liga 3P.
- Elaboração de um banco de dados de máquinas de fluxo axial com núcleos em M/P.
- Confeção de nova matriz (aquecida, ou dupla ação por exemplo), onde o desempenho se tornaria diferente para o material SMC, que sofre alterações quando há regiões mais com gradiente de compactação, ou variações térmicas abruptas advindas do processo.

REFERENCIAL BIBLIOGRÁFICO

AB, Höganäs. **Soft Magnetic Composites**. Disponível em: <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/Fe₃O₄-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, PPGE - 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.0313010-03130137, 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 Eléctricas**. [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 Abril 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 – are-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 SiO₂ 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.