



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

Luiza Rodrigues Perin

Desenvolvimento de dispositivos simplificados de caracterização ágil de propriedades elétricas e magnéticas de materiais compósitos magnéticos moles

Florianópolis
2024

Luiza Rodrigues Perin

Desenvolvimento de dispositivos simplificados de caracterização ágil de propriedades elétricas e magnéticas de materiais compósitos magnéticos moles

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia de Materiais do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais

Orientador: Leandro Lima Evangelista, Dr. Eng.
Coorientador: Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.-Ing.

Florianópolis

2024

Perin, Luiza Rodrigues

Desenvolvimento de dispositivos simplificados de caracterização ágil de propriedades elétricas e magnéticas de materiais compósitos magnéticos moles / Luiza Rodrigues Perin ; orientador, Leandro Lima Evangelista, coorientador, Aloisio Nelmo Klein, 2024.

62 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia de Materiais, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia de Materiais. 2. Engenharia de Materiais. 3. Compósitos Magnéticos Moles. 4. Perdas Magnéticas . I. Evangelista, Leandro Lima. II. Klein, Aloisio Nelmo. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia de Materiais. IV. Título.

Luiza Rodrigues Perin

Desenvolvimento de dispositivos simplificados de caracterização ágil de propriedades elétricas e magnéticas de materiais compósitos magnéticos moles

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Engenheira de Materiais e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Materiais na Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 08 de fevereiro de 2024.

Insira neste espaço
a assinatura

Coordenação do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Leandro Lima Evangelista, Dr. Eng.

Orientador

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Aloisio Nelmo Klein, Dr.-Ing.

Coorientador

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Diego Berti Salvaro, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Insira neste espaço
a assinatura

Antonio Itamar Ramos Filho, Dr. Eng.
Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Leandro Lima Evangelista pela confiança, orientação e apoio que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação e conhecimento foram inspiradores, e sou grata por sua orientação e aprendizado ao longo deste processo.

Ao meu coorientador, prof. Aloisio Nelmo Klein, pelo apoio e contribuições para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais, Liliane e Inácio, e ao meu irmão, Mateus, por serem base e apoio em todos os momentos. Agradeço por todos os esforços em garantir que eu sempre tivesse acesso a uma educação de qualidade e por vibrarem junto comigo em minhas conquistas acadêmicas.

Ao meu namorado, Cristian, agradeço pelo amor e paciência em todos os momentos, sempre disposto a me ajudar a superar as dificuldades.

Ao Laboratório de Materiais - LabMat e todos os seus professores, pela oportunidade da bolsa de iniciação científica, que enriqueceu minha trajetória acadêmica. Também agradeço pela oportunidade de realizar este trabalho em um laboratório tão conceituado na área de Ciência e Engenharia de Materiais, o que contribuiu significativamente para meu crescimento pessoal e profissional.

À Universidade Federal de Santa Catarina, por oferecer ensino público gratuito e de qualidade, que moldou significativamente minhas experiências, conhecimentos e oportunidades ao longo dos últimos anos.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

A eficiência energética desempenha um papel fundamental no avanço tecnológico, e os materiais magnéticos assumem uma posição importante nesse cenário. Os recentes avanços nesta área visam aprimorar dispositivos relacionados à geração e conversão de energia elétrica. Os chamados Compostos Magnéticos Moles (*Soft Magnetic Composites* - SMCs) representam uma categoria inovadora de materiais magnéticos projetados para minimizar perdas magnéticas. Sua capacidade de conduzir o fluxo magnético de maneira isotrópica em três dimensões possibilita não apenas a redução de perdas, mas também a miniaturização de dispositivos, o desenvolvimento de designs inovadores e a viabilização de aplicações mais avançadas. A identificação de materiais SMCs promissores envolve a avaliação das perdas magnéticas, com foco no aumento da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética para minimizar as perdas do material. Este trabalho de conclusão de curso apresenta o desenvolvimento de bancadas para a avaliação de propriedades elétricas e magnéticas de amostras toroidais produzidas a partir de compósitos magnéticos moles. Os dispositivos desenvolvidos neste estudo têm como principal finalidade fornecer informações influentes nos coeficientes de perdas magnéticas, com o uso de circuitos mais simples de construir e mensurar. Nesse sentido, foi realizada a validação da bancada de medição de permeabilidade magnética, comparando os resultados obtidos com amostras de SMC comercial às medições anteriormente realizadas em uma bancada comercial de precisão. Os resultados indicam uma elevada correspondência entre as medições realizadas na bancada de precisão e aquelas obtidas através do dispositivo desenvolvido ($R^2=0,99$). Posteriormente, foi conduzida a validação da bancada de medição de resistividade elétrica, fundamentada na correlação entre os valores de resistividade medidos em amostras de SMCs de dupla camada utilizando o equipamento desenvolvido e seus respectivos coeficientes de perdas dinâmicas (K_D). A correlação identificada neste contexto está em conformidade com o padrão de comportamento comumente observado em SMCs, conforme documentado em estudos anteriores. Por fim, um estudo de caso foi implementado, empregando as bancadas desenvolvidas para efetuar uma avaliação ágil das propriedades elétricas e magnéticas de novos SMCs de dupla camada desenvolvidos no Laboratório de Materiais da UFSC (LabMat). Os resultados do estudo de caso sugerem que amostras produzidas com revestimento de dupla camada com fase vítrea baseada em silicato de potássio com fração de sólidos variando de 1 a 2% são particularmente promissoras.

Palavras-chave: Compósitos magnéticos moles, perdas magnéticas, permeabilidade magnética, resistividade elétrica.

ABSTRACT

Energy efficiency plays a key role in technological advancement, and magnetic materials assume an important position in this scenario. Recent advances in this field aim to enhance devices related to the generation and conversion of electrical energy. The so-called Soft Magnetic Composites (SMCs) represent an innovative category of magnetic materials designed to minimize magnetic losses. Their ability to conduct magnetic flux isotropically in three dimensions allows not only the reduction of losses but also the miniaturization of devices, the development of innovative designs, and the enablement of more advanced applications. The identification of promising SMC materials involves evaluating magnetic losses, focusing on increasing electrical resistivity and magnetic permeability to minimize material losses. This Conclusion Course Monography presents the development of devices for the evaluation of electrical and magnetic properties of toroidal samples produced from soft magnetic composites. The devices developed in this study aim to provide influential information on magnetic loss coefficients, using simpler circuits to build and measure. In this context, the validation of the magnetic permeability measurement setup was carried out by comparing the results obtained with commercial SMC samples to measurements previously performed on a commercial precision setup. The results indicate a high correspondence between the measurements made on the precision setup and those obtained through the developed device ($R^2=0.99$). Subsequently, the validation of the electrical resistivity measurement setup was conducted, based on the correlation between resistivity values measured in double-layer SMC samples using the developed equipment and their respective dynamic loss coefficients (K_D). The correlation identified in this context is in line with the behavior pattern commonly observed in SMCs, as documented in previous studies. Finally, a case study was implemented using the developed setups to conduct an assessment of the electrical and magnetic properties of new double-layer SMCs developed at the Materials Laboratory of UFSC. The results of the case study suggest that samples produced with a double-layer coating with a vitreous phase based on potassium silicate with a solid fraction ranging from 1 to 2% are particularly promising.

Keywords: Soft magnetic composites, magnetic losses, magnetic permeability, electrical resistivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do campo magnético (H) gerado por um conjunto de espiras induzindo uma densidade de fluxo magnético (B).	20
Figura 2 - Curva de histerese B x H típica para materiais ferromagnéticos.	21
Figura 3 - Variação da permeabilidade (μ) e da indução magnética (B) com o campo magnético aplicado (H).	22
Figura 4 – Representação esquemática de domínios magnéticos.	23
Figura 5 - Movimentação das paredes e rotação dos domínios magnéticos no processo de magnetização.....	24
Figura 6 - Correntes parasitas interparticulates e intraparticulares em SMCs.....	28
Figura 7 - Gráfico esquemático de separação de perdas, perda total por ciclo versus frequência.....	29
Figura 8 - Curvas esquemáticas de magnetização para materiais magnéticos moles e duros.	32
Figura 9 - Representação ilustrativa de um compósito magnético mole.	34
Figura 10 - Estratégias para a redução das perdas totais em compósitos magnéticos moles.....	36
Figura 11 - Geometria toroidal e dimensões das amostras para medição nos dispositivos desenvolvidos.	40
Figura 12 - Desenho esquemático do dispositivo desenvolvido para a avaliação de permeabilidade magnética.	41
Figura 13 - Fotos do dispositivo desenvolvido para medição de resistividade elétrica.	43
Figura 14 - Desenho esquemático do dispositivo desenvolvido para avaliação de resistividade elétrica.....	44
Figura 15 - Correlação entre K_H e permeabilidade magnética relativa máxima.	47
Figura 16 -Curvas de tensão no bobinamento secundário versus corrente aplicada ao bobinamento primário (à esquerda) e derivada da tensão em função da corrente aplicada (à direita) para amostras de SMC comerciais.	48
Figura 17 - Correlação entre os valores obtidos para dV/di máximo de cada uma das amostras de SMC comerciais e seus valores de permeabilidade mensurados em bancada especializada.	49

Figura 18 - Correlação entre resistividade elétrica e coeficiente de perdas dinâmicas K_D	51
Figura 19 – Relação entre a resistividade média total em função da concentração de sólidos de silicato de potássio.	53
Figura 20 - Derivada da tensão em função da corrente aplicada para amostras de SMC de dupla camada.	54
Figura 21 – Relação entre dV/di máxima em função da concentração de sólidos de silicato de potássio.	54
Figura 22 - Compilado de resultados de resistividade elétrica e permeabilidade (dV/di) das amostras de SMC de dupla camada.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades típicas de componentes à base de Somaloy® 3P 700.....	38
Tabela 2 - Resultados das medições de resistividade das amostras de SMC de dupla camada para validação do dispositivo.....	50
Tabela 3 - Resultados das medições de resistividade das novas amostras de SMC de dupla camada no dispositivo desenvolvido.	52

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

- B – Densidade de fluxo magnético ou indução magnética [T];
- B_r – Remanência ou indução residual [T];
- f – Frequência de excitação [Hz];
- H – Campo magnético aplicado [A/m];
- H_c – Coercividade ou campo coercivo [A/m];
- i – Corrente elétrica [A];
- K_{cp} – Coeficiente de perdas por correntes parasitas;
- K_D – Coeficiente de perdas dinâmicas;
- K_{exc} – Coeficiente de perdas excedentes;
- K_H – Coeficiente de perdas por histerese;
- M – Magnetização [A/m];
- M_s – Magnetização de saturação [A/m];
- R – Resistência elétrica [Ω];
- SMC – *Soft Magnetic Composite* – Compósito Magnético Mole;
- V – Tensão [V];
- W_{cp} – Perdas por correntes parasitas;
- W_{din} – Perdas dinâmicas;
- W_{est} – Perdas estáticas;
- W_{exc} – Perdas excedentes;
- W_h – Perdas por histerese;
- W_t – Perdas magnéticas totais [J/m^3];
- μ – Permeabilidade magnética;
- μ_0 – Permeabilidade magnética no vácuo ($4\pi \cdot 10^{-7}$ T.m/A);
- μ_i – Permeabilidade inicial;
- μ_m – Permeabilidade máxima;
- μ_r – Permeabilidade relativa;
- ρ – Resistividade Elétrica [$\mu\Omega.m$];

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVO GERAL	19
1.1.1	Objetivos Específicos	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1	HISTERESE E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS	20
2.2	DOMÍNIOS MAGNÉTICOS.....	23
2.3	PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS.....	25
2.3.1	Perda por Histerese (W_h)	26
2.3.2	Perda por Correntes Parasitas (W_{cp})	27
2.3.3	Perda Excedente (W_{exc})	29
2.4	MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES	31
2.5	COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MOLES	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MATERIAIS.....	38
3.1.1	Somaloy[®] 3P 700	38
3.1.2	SMC de Dupla Camada	39
3.2	DESENVOLVIMENTO DAS BANCADAS EXPERIMENTAIS	40
3.2.1	Bancada de Medição de Permeabilidade Magnética	41
3.2.2	Bancada de Medição de Resistividade Elétrica	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	46
4.1	VALIDAÇÃO DA BANCADA DE MEDIÇÃO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA.....	46
4.2	VALIDAÇÃO DA BANCADA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	50
4.3	ESTUDO DE CASO – USO DAS BANCADAS DESENVOLVIDAS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS SMC DE DUPLA CAMADA	52
5	CONCLUSÃO	57
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	59
	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

Dada a crescente demanda global por energia, a eficiência energética tornou-se uma área de intensa pesquisa e desenvolvimento, em vista de sua considerável influência tanto econômica quanto ambiental (ENERDATA, 2022). A potencial dificuldade na expansão do fornecimento de energia limpa a custos acessíveis representa importantes forças motrizes para a investigação ou o desenvolvimento de materiais mais eficientes energeticamente (GUTFLEISCH *et al.*, 2011; JAYACHANDRAN, 2022; PÉRIGO *et al.*, 2018; SUNDAY, 2017).

Nesse cenário, os materiais magnéticos de engenharia ocupam uma posição econômica de destaque, uma vez que se encontram em muitas aplicações, produtos e processos industriais dentro de diversos setores. Estes materiais são componentes essenciais das aplicações de energia tendo papel importante em dispositivos relacionados à geração, condicionamento, transporte e conversão de energia elétrica, como motores, geradores, transformadores e atuadores (GUTFLEISCH *et al.*, 2011; PÉRIGO *et al.*, 2018).

À medida que procuramos aprimorar a eficiência energética, é crucial reconhecer que as perdas de energia não se restringem apenas à montagem de componentes. Também ocorrem perdas devido ao funcionamento de máquinas elétricas, muitas das quais estão relacionadas às propriedades dos materiais magnéticos utilizados. Portanto, embora seja crucial aumentar a produção de energia elétrica a partir de fontes renováveis, também devemos abordar a redução das perdas eletromagnéticas nos processos já existentes (FARGHALI, 2023; GUTFLEISCH *et al.*, 2011).

Os materiais magnéticos moles, uma categoria de materiais ferromagnéticos com magnetização facilmente reversível, desempenham um papel crucial em aplicações como transformadores, sensores e motores elétricos devido à sua capacidade de amplificar campos magnéticos (CULLITY; GRAHAM, 2008). O aço elétrico é amplamente usado nesse contexto, usualmente na forma de chapas eletricamente isoladas, que graças à sua configuração é capaz de reduzir correntes parasitas e perdas em baixa frequência. No entanto, em aplicações de média e alta frequência, que são condições de grande interesse para miniaturização de sistemas elétricos, as correntes parasitas podem reduzir fortemente a eficiência devido à alta condutividade desses materiais (FISH, 1990; PÉRIGO *et al.*, 2018). Portanto, a pesquisa e o desenvolvimento contínuos visam soluções que possam mitigar essas

correntes parasitas e melhorar o desempenho dos materiais magnéticos moles, sendo essencial para a evolução das tecnologias elétricas e magnéticas em busca de maior eficiência e sustentabilidade.

Em meio a essas circunstâncias promissoras, há um destaque significativo para o avanço e a otimização de materiais que possam viabilizar a produção de dispositivos elétricos miniaturizados, com eficiência aprimorada e custos competitivos. Entre esses materiais, destacam-se os conhecidos como compósitos magnéticos moles referidos como SMCs (do inglês, *soft magnetic composites*). Este grupo de materiais tem despertado especial atenção devido às suas propriedades magnéticas altamente ajustáveis e a sua capacidade de minimizar perdas magnéticas em regimes de média-alta frequência, tornando-os essenciais para uma série de aplicações tecnológicas (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SUNDAY, 2017).

Os SMCs apresentam alta resistividade elétrica e propriedades isotrópicas, permitindo o fluxo magnético em três dimensões, o que contrasta com as tradicionais chapas de aço elétrico limitadas a duas dimensões (BOEHM; HAHN, 2012). Essas características viabilizam novas geometrias de máquinas elétricas, contribuindo para a miniaturização de dispositivos que incorporam componentes baseados em SMC, como motores axiais e transversais. Além disso, o processamento dos SMCs envolve a metalurgia do pó, resultando em componentes próximos à geometria final com mínimo desperdício de material e alta produtividade (KOLLÁR *et al.*, 2013).

Na escolha dos materiais, a prioridade é encontrar o equilíbrio ideal entre desempenho e custo, dependendo da aplicação em questão. Quando se trata de materiais magnéticos moles, como os SMCs, a ênfase recai geralmente em obter uma combinação específica de propriedades a fim de maximizar a eficiência da máquina elétrica, como altos valores de magnetização de saturação, resistividade elétrica e permeabilidade magnética, juntamente com baixos valores de coercividade e perdas no núcleo (GUTFLEISCH *et al.*, 2011; PÉRIGO *et al.*, 2018).

Nesse sentido, o presente trabalho tem por objetivo principal o desenvolvimento de bancadas que permitem uma forma alternativa de avaliação de propriedades elétricas e magnéticas de amostras toroidais produzidas a partir de compósitos magnéticos moles. A permeabilidade magnética determina a capacidade do material de canalizar e direcionar as linhas de fluxo magnético, influenciando

diretamente na eficiência de dispositivos magnéticos, como transformadores e indutores. Por sua vez, a resistividade elétrica está intrinsecamente relacionada às correntes parasitas que podem gerar perdas de energia indesejadas em aplicações de alta frequência. Portanto, a avaliação dessas duas propriedades desempenha um papel crítico na busca por materiais magnéticos moles mais eficientes e na otimização de dispositivos elétricos e magnéticos.

Dentro deste cenário, a principal razão para o desenvolvimento dos dispositivos neste estudo é a obtenção de informações que influenciam os coeficientes de perdas magnéticas. Esses dispositivos foram projetados com a finalidade de simplificar a construção e medição, desempenhando um papel essencial ao fornecer dados significativos que facilitam análises comparativas e investigações relacionadas às propriedades magnéticas e elétricas dos materiais SMC de forma mais prática e viável. Além disso, vale ainda frisar que os conceitos para construção dos dispositivos, ora aplicados em corpos de prova padrão, em formato toroidal, podem ser reajustados com facilidade de forma a compor um método de aferição de qualidade de componentes em uma linha de produção, contribuindo para o aumento da confiabilidade das peças produzidas em SMC em escala industrial.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem como objetivo central o desenvolvimento de bancadas que viabilizam uma metodologia para a avaliação de propriedades elétricas e magnéticas de amostras toroidais produzidas a partir de compósitos magnéticos moles.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Desenvolvimento e validação da bancada de medição de resistividade elétrica;
- Desenvolvimento e validação da bancada de medição de permeabilidade magnética;
- Avaliação dos resultados obtidos com os sistemas desenvolvidos através da seleção de amostras mais promissoras de compósitos magnéticos moles em desenvolvimento.

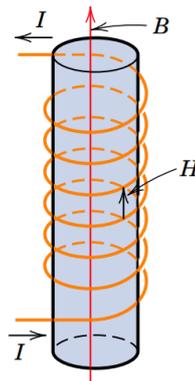
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 HISTERESE E PROPRIEDADES MAGNÉTICAS

O estado de spin dos elétrons dos átomos e sua interação com campos magnéticos externos determinam as características magnéticas dos materiais. Independente do estado físico, todos os materiais apresentam características magnéticas (CULLITY; GRAHAM, 2008). De acordo com a interpretação clássica do magnetismo, os campos magnéticos são originados a partir de cargas em movimento, como é o caso da rotação de um elétron em torno do seu próprio eixo, que concede ao elétron um momento magnético de spin. O movimento dos elétrons ao redor do núcleo também origina um momento magnético orbital. O momento magnético resultante é a soma desses dois momentos e, em um material de volume V com n átomos, o momento magnético total corresponde à soma vetorial das contribuições de todos os seus átomos. É definido então como magnetização M , o momento magnético resultante por unidade de volume (CULLITY; GRAHAM, 2008).

O magnetismo é atribuído a um campo gerado por espiras de corrente elétrica. Quando um campo magnético, H , é gerado por um conjunto de espiras, isso induz uma densidade de fluxo magnético, B , dentro do solenóide, conforme ilustrado pela Figura 1.

Figura 1 – Desenho esquemático do campo magnético (H) gerado por um conjunto de espiras induzindo uma densidade de fluxo magnético (B).



Fonte: Adaptado de CALLISTER, 2012.

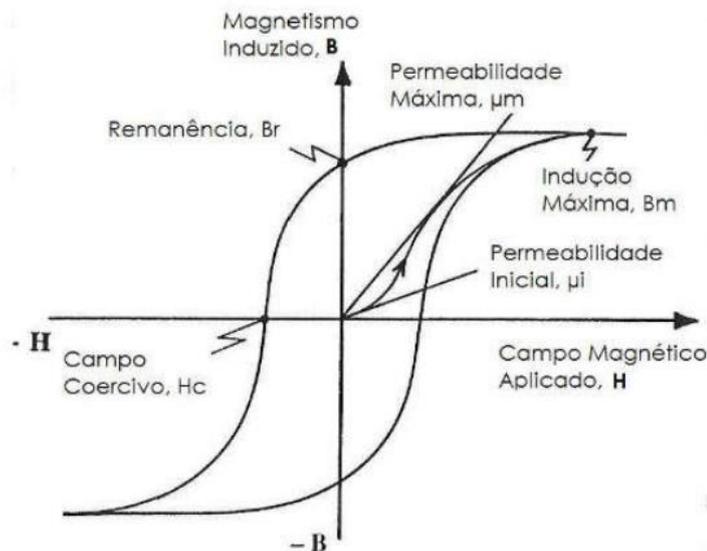
Esse fluxo magnético induzido, também conhecido como indução magnética, é aumentado significativamente se um material ferromagnético for usado como núcleo do solenóide (CALLISTER, 2012). Essas variáveis estão interligadas pela Equação 1.

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

No sistema internacional de unidades, a densidade de fluxo B é dado em T (tesla), o campo aplicado H é expresso em A/m (amperes por metro) e a permeabilidade do vácuo μ_0 é uma constante de valor $4\pi 10^7$ T.m/A.

As propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos, as quais determinam as aplicações desses materiais, são comumente avaliadas através de uma curva de histerese, a qual descreve a relação entre a intensidade do campo magnético aplicado (H) e a densidade do fluxo magnético resultante (B) durante um ciclo completo de magnetização e desmagnetização, conforme apresentado na Figura 2.

Figura 2 - Curva de histerese $B \times H$ típica para materiais ferromagnéticos.



Fonte: Traduzido e adaptado de LALL, 1992.

Inicialmente, quando aplicamos um campo magnético externo ao material, a densidade do fluxo magnético começa a aumentar à medida que o material é magnetizado. Sendo assim, quando a intensidade do campo magnético aplicado é aumentada, o valor de densidade do fluxo magnético aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente, até atingir a chamada saturação magnética (M_s). A partir deste ponto, um campo externo aplicado não mais terá efeito de polarização no material. Apesar do aumento da intensidade do campo externo, a magnetização permanece constante e a indução permanece quase constante (ocorre um aumento mínimo de B por conta do campo aplicado H), ou seja, o material encontra-se saturado magneticamente (CULLITY; GRAHAM, 2009).

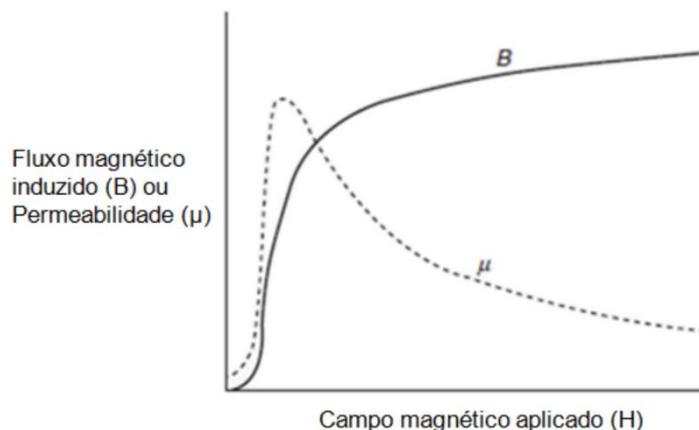
Após a saturação magnética, ao reduzir o campo magnético, a densidade do fluxo B diminui, mas a curva percorre um caminho diferente do inicial,

comportamento que justifica o termo histerese. Isso ocorre devido a fenômenos magnéticos remanescentes no material. O material permanece parcialmente magnetizado, mesmo quando o campo magnético é reduzido. Alcançando o valor nulo de campo aplicado, ainda se tem um valor de indução, dita indução residual B_r ou remanência. A fim de anular a indução magnética presente no material, aplica-se um campo chamado campo coercivo H_c , de sentido oposto ao campo inicialmente induzido. Se aumentado o valor de campo aplicado para valores maiores que H_c , ocorre novamente a saturação da polarização, com a mesma magnitude, apenas no sentido oposto em relação à saturação atingida na magnetização inicial. E finalmente, a retirada do campo aplicado e posterior aumento de H no sentido inicial fecha o ciclo de histerese, obtendo-se uma curva simétrica.

O ciclo de histerese forma uma curva fechada no gráfico de B vs. H , e essa curva representa como o material responde a campos magnéticos variáveis. A área dentro do ciclo de histerese representa a energia perdida durante um ciclo completo de magnetização e desmagnetização, e essa energia é liberada na forma de calor.

A permeabilidade magnética (μ) é definida como a razão entre a densidade de fluxo e o campo aplicado (B/H), ou seja, é a inclinação da curva de magnetização. A Figura 3 é proveniente da curva de magnetização inicial e ilustra a dependência da permeabilidade em relação ao campo aplicado, H (CSANYI, 2011).

Figura 3 - Variação da permeabilidade (μ) e da indução magnética (B) com o campo magnético aplicado (H).



Fonte: Traduzido de Csanyi (2011).

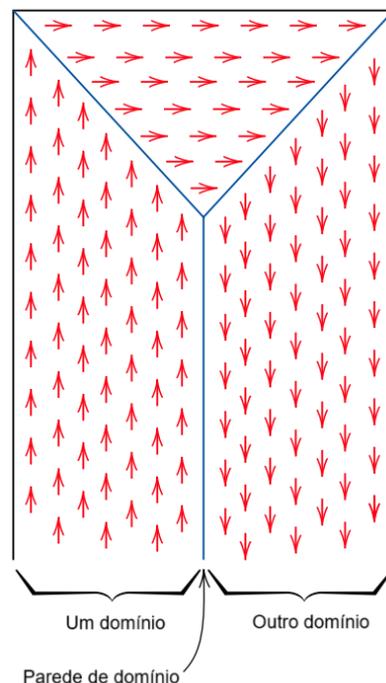
Dois valores de permeabilidade são frequentemente citados: a permeabilidade inicial, μ_i e a permeabilidade máxima μ_m . A inclinação da curva de B em relação a H quando $H = 0$ (ou seja, no ponto inicial) é chamada de permeabilidade inicial. Já a permeabilidade máxima, é a maior razão B/H em uma

curva de magnetização inicial (CULLITY; GRAHAM, 2009; LALL, 1992). Ambas permeabilidade e permeabilidade máxima são comumente expressas na forma da chamada permeabilidade magnética relativa (μ_r), dada pela razão entre a permeabilidade magnética do material e a permeabilidade magnética do vácuo (CULLITY; GRAHAM, 2008).

2.2 DOMÍNIOS MAGNÉTICOS

Os materiais ferromagnéticos são utilizados em diversas aplicações graças ao seu poder de magnetização espontânea, mesmo na ausência de um campo externo, que se deve à forte interação entre os dipolos dos átomos vizinhos. Esses materiais são divididos em pequenas regiões de volume chamadas de domínios magnéticos, em que os momentos magnéticos atômicos encontram-se apontando em uma mesma direção, as quais são separadas pelas chamadas paredes de domínios, conforme ilustrado na Figura 4. Normalmente, os domínios são de tamanho microscópico e, para uma amostra policristalina, cada grão pode consistir em mais de um domínio (PINHO, 2009; LALL, 1992).

Figura 4 – Representação esquemática de domínios magnéticos.



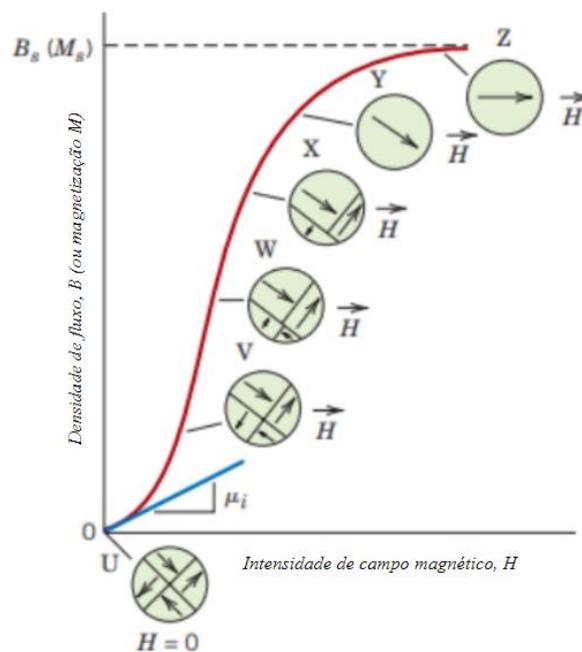
Fonte: CALLISTER, 2012.

Assim, em um pedaço microscópico de material haverá muitos domínios e todos poderão ter diferentes orientações de magnetização. A magnetização total (representada por M) em todo o material é obtida somando as contribuições

magnéticas de todos os domínios, considerando o volume de cada domínio. Para um material que ainda não foi magnetizado, a soma vetorial ponderada das magnetizações de todos os domínios é igual a zero. Isso significa que, em média, as orientações magnéticas dos domínios se cancelam mutuamente, resultando em uma magnetização total nula para o material não magnetizado (CALLISTER, 2012).

A teoria dos domínios explica o processo de magnetização e desmagnetização que se observa na curva de histerese do material. À medida que um campo magnético crescente é aplicado, as estruturas do domínio magnético mudam de configuração e de tamanho de acordo com o movimento dos contornos dos domínios, conforme mostrado na Figura 5. Esta figura mostra esquematicamente as estruturas dos domínios em vários pontos ao longo da curva de magnetização em função do campo magnético. (CALLISTER, 2012).

Figura 5 - Movimentação das paredes e rotação dos domínios magnéticos no processo de magnetização



Fonte: CALLISTER, 2012.

Inicialmente, para minimizar a energia magnetostática, cada domínio apresenta-se orientado na direção fácil, mas em sentido oposto ao domínio vizinho. Quando um material magnético é desmagnetizado os domínios magnéticos ficam orientados ao acaso, em vista de que não há momento magnético resultante, mantendo o estado preferencial de menor energia do sistema (FARIA; LIMA, 2005). À medida que um campo magnético exterior é aplicado, os domínios alinhados na sua direção crescem graças ao movimento das paredes ou fronteiras dos domínios,

vencendo os domínios com orientações menos favoráveis (LALL, 1992). Conforme a intensidade do campo externo aplicado aumenta, a amostra macroscópica se torna um único domínio, praticamente alinhado com o campo, onde os domínios remanescentes são forçados a rotacionar de forma que se tornem alinhados com o campo aplicado, atingindo a saturação (LALL, 1992).

2.3 PERDAS MAGNÉTICAS EM CAMPOS ALTERNADOS

A variação do campo magnético aplicado ao material produz uma resposta dinâmica, onde o tempo, expresso em forma de frequência do ciclo de magnetização, é introduzido. A resposta do material a essa variação depende de diversos fatores como a estrutura cristalina, defeitos internos, resistividade elétrica, dimensões e frequência de testes (LALL, 1992).

Contudo, o resultado prático é que uma porção da energia aplicada para atingir um determinado nível de magnetização em resposta a um campo magnético alternado, operando a uma frequência definida, é irremediavelmente dissipada. Essa dissipação de energia é conhecida como "perdas eletromagnéticas" e, em sua maioria, é convertida em calor devido ao fenômeno conhecido como efeito Joule. Essas perdas eletromagnéticas diminuem a eficiência de dispositivos que funcionam em campos magnéticos alternados, como transformadores e motores elétricos, uma vez que parte da energia aplicada não contribui para o trabalho útil desejado, mas sim é transformada em energia térmica. (CULLITY; GRAHAM, 2008).

A procura por materiais e processos que resultem em perdas cada vez menores, está atrelada ao avanço no conhecimento dos mecanismos que geram as perdas eletromagnéticas. A perda eletromagnética em aços para fins elétricos pode então ser avaliada por meio de uma separação de perdas, proposta em 1988 por Bertotti (BERTOTTI, 1988), onde a perda total, W_t , em J/m^3 para uma dada frequência de magnetização f em Hz é composta pela soma de três componentes:

$$W_t(f) = W_h + W_{cp}(f) + W_{exc}(f) \quad (2)$$

A componente de perdas por histerese, W_h , é independente da frequência de magnetização, f , enquanto as componentes de perdas por correntes parasitas, $W_{cp}(f)$ e de perdas excedentes, $W_{exc}(f)$, são dependentes. O formalismo de separação de perdas é uma abordagem que nos permite identificar e quantificar essas diferentes componentes de perdas em materiais magnéticos, originalmente

desenvolvido para aços elétricos laminados, mas pode ser aplicado a outros materiais desde que levemos em conta suas diferenças estruturais e magnéticas.

É comum classificar as perdas de acordo com sua dependência da frequência de magnetização. Chamamos as perdas que não dependem da frequência de "perdas estáticas", $W_{est} = W_h$, e as perdas que dependem da frequência de "perdas dinâmicas", $W_{din}(f) = W_{cp}(f) + W_{exc}(f)$. Isso nos ajuda a entender como as perdas se comportam em diferentes situações de frequência.

2.3.1 Perda por Histerese (W_h)

Conforme discutido anteriormente, durante a magnetização e desmagnetização dos materiais ocorre a rotação dos domínios, a qual depende de energia, fazendo com que apareçam as perdas por histerese. Estas podem ser medidas em uma frequência próxima a zero, em um regime quase estático (KOLLÁR *et al.*, 2013).

Estas perdas estão relacionadas a energia necessária para completar a reorientação dos domínios durante cada ciclo da corrente alternada aplicada ao material (PINHO, 2009). Durante o processo de inversão de fluxo, as paredes de domínio são deslocadas e, mesmo com uma excitação quase estática, resulta em pequenas correntes parasitas. Quando essas paredes de domínio são deslocadas bruscamente, surgem pulsos de correntes ao redor destes segmentos. Esses pulsos de corrente são convertidos em calor devido ao efeito Joule, e sua duração é muito curta em comparação com o período de mudança do campo magnético ($1/f$, onde f é a frequência). Por isso, a energia dissipada destes pulsos (W_h) é independente de f , o que lhe permite ser chamada também de perda estática (FIORILLO, 2004).

A área da curva de histerese criada pela aplicação da corrente alternada é diretamente proporcional à energia dissipada durante um ciclo e por unidade de volume do material magnético. Portanto, o valor de W_h é determinado experimentalmente através da área da curva de histerese medida por um método de corrente contínua (DC):

$$W_h = \oint HdB \quad (3)$$

Para aplicações de baixas frequências, a perda por histerese é a principal contribuição para as perdas totais. Os processos para reduzir este tipo de perda consistem na qualidade dos materiais, isto é, garantindo uma forma do ciclo de

histerese estreita. Podem-se atingir melhorias através do aumento do tamanho de grão, diminuição de impurezas e da densidade de discordâncias, aumento da densidade e alívio de tensões residuais, haja vista que contornos de grão, impurezas e regiões tensionadas atuam como fixadores que dificultam o movimento de parede de domínio e que porosidades atuam como fontes de campos desmagnetizantes (KOLLÁR *et al.*, 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

2.3.2 Perda por Correntes Parasitas (W_{cp})

Essa componente de perdas está relacionada com a energia dissipada por efeito Joule pelas correntes parasitas, também chamadas de correntes de Foucault, as quais são induzidas em qualquer material condutor por um fluxo magnético alternado (KOLLÁR *et al.*, 2013). Estas correntes circulam num plano perpendicular às linhas de fluxo. Desta forma, e devido ao seu sentido de circulação e de acordo com a lei de Lenz, o fluxo produzido por estas correntes opõe-se ao fluxo indutor, dissipando energia por efeito Joule (PINHO, 2009). É uma componente linearmente dependente da frequência de magnetização calculada aplicando as leis de Maxwell ao material assumindo que este é completamente homogêneo do ponto de vista magnético (ausência de paredes de domínio) (FIORILLO, 2004). A componente associada a estas correntes em um material maciço (*bulk*) é dada pela Equação 4:

$$W_{cp} = \frac{(\pi d_{ef} B_m)^2}{\beta \rho_R} \quad (4)$$

onde d_{ef} é a dimensão efetiva das correntes parasitas (a própria espessura no caso de um material maciço condutor), B_m é a indução magnética máxima do ciclo de magnetização, ρ_R é a resistividade elétrica do material e β é um coeficiente geométrico. Esse fator geométrico, para um material com seção retangular perpendicular à direção do fluxo magnético é definido pela Equação 5 (KOLLÁR *et al.*, 2013):

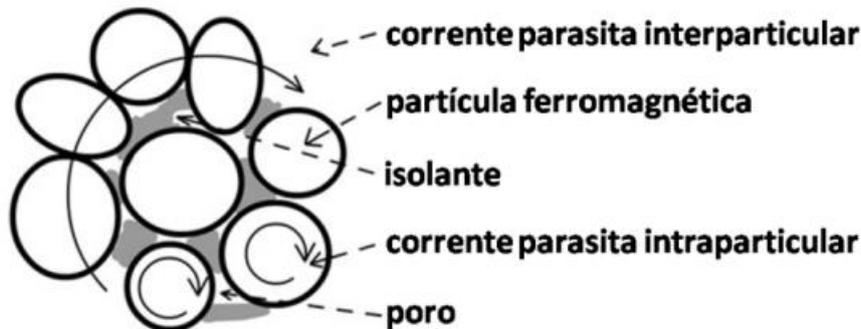
$$\beta = \frac{6}{1 - 0,633 \left(\frac{w}{h}\right) \tanh\left(\frac{1,58h}{w}\right)} \quad (5)$$

onde w é a largura e h é a altura do retângulo. Quando o valor de h for muito maior do que o valor de w , o resultado de β na Equação 5 deve ser de aproximadamente 6, o que é conhecido para as chapas de aço laminado. Entretanto, segundo Kollár *et al.* (2013), o valor de β em uma seção reta circular é aproximadamente 20. (KOLLÁR *et al.*, 2013).

O processo para reduzir este tipo de energia consiste na qualidade dos materiais, aumentando a resistividade, e optando por chapas de pequena espessura. As correntes parasitas, neste caso, ficam confinadas na espessura de cada chapa, diminuindo drasticamente a componente W_{cp} (LANDGRAF, 2002; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007).

A redução da componente W_{cp} também pode ser realizada através da produção de um material compósito, no qual cada partícula de material magnético esteja inteiramente revestida com um material isolante. Estes materiais são chamados de compósitos magnéticos moles ou SMCs (do inglês *Soft Magnetic Composites*), e serão discutidos na Seção 2.5. Estes materiais permitem que as correntes parasitas fiquem confinadas dentro de cada partícula, diminuindo significativamente as perdas clássicas por correntes parasitas. Estas perdas podem ser vistas nestes materiais como a combinação de correntes que ocorrem dentro de cada partícula, chamadas de correntes intraparticulares, e aquelas que ocorrem entre as partículas devido a falhas no revestimento, chamadas de correntes interparticulares, conforme representado pela Figura 6 (KOLLÁR *et al.*, 2013).

Figura 6 - Correntes parasitas interparticulates e intraparticulares em SMCs



Fonte: Traduzido de KOLLÁR *et al.*, 2013.

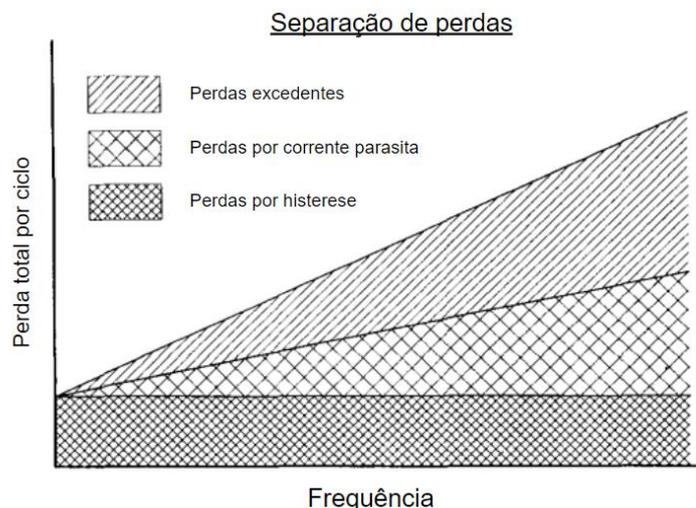
Neste caso, o comportamento das perdas por corrente parasita interparticulares W_{cp}^{inter} pode ser equacionado da mesma forma que os materiais *bulk* utilizando a Equação 4. Se aproximarmos o material para partículas esféricas e perfeitamente isoladas, pode-se estimar o valor de utilizando o seu diâmetro médio como d_{ef} e β como 20 (CARDOSO, 2005). No entanto, havendo falhas no revestimento isolante, este valor estimado provavelmente será muito menor do que o observado experimentalmente. Nesse caso, é necessário considerar a dimensão efetiva das correntes parasitas como uma média da distribuição do tamanho de

conjuntos de partículas em contato, ou diâmetro circular efetivo de partículas interconectadas (RODRIGUES, 2001).

2.3.3 Perda Excedente (W_{exc})

Quando medimos as perdas totais de um material elétrico submetido a um campo magnético alternado, geralmente obtemos um valor maior do que a simples soma das perdas por histerese (W_h) e as perdas por correntes parasitas (W_{cp}) assim como esquematizado na Figura 7. A diferença entre as perdas totais e a soma das perdas por histerese e correntes parasitas é chamada de perdas excedentes ou anômalas (W_{exc}). Essas perdas extras incluem perdas devido ao movimento, relaxação e ressonância das paredes de domínio, bem como outros efeitos que dependem da frequência devido à complexa estrutura magnética do material (KOLLÁR et al., 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Em resumo, as perdas excedentes são as perdas adicionais que não podem ser explicadas apenas pelas perdas por histerese e correntes parasitas.

Figura 7 - Gráfico esquemático de separação de perdas, perda total por ciclo versus frequência.



A teoria estatística de Bertotti (BERTOTTI, 1988), descreve como os domínios magnéticos se comportam durante a magnetização de um material. Considera-se que vários objetos magnéticos estão ativos ao mesmo tempo e que esses objetos podem representar, por exemplo, o número de paredes de domínio móveis na amostra. As perdas em excesso ocorrem quando campos magnéticos não uniformes (gerados por correntes parasitas) são compensados por um campo magnético aplicado. Essa teoria ajuda a entender como as perdas excedentes ocorrem durante

o processo de magnetização. Pode-se expressar a componente de perdas excedentes para vários materiais magnéticos de acordo com a Equação 6 (KOLLÁR *et al.*, 2013).

$$W_{exc} = 2B_m n_0 V_0 \left(\sqrt{1 + \frac{16GSB_m f}{n_0^2 V_0 \rho_R}} - 1 \right) \quad (6)$$

onde n_0 é o número de objetos magnéticos ativos no processo de magnetização DC, V_0 é o parâmetro do material referente ao ancoramento local do campo magnético, S a seção reta do material perpendicular ao fluxo magnético, B_m a indução máxima, f a frequência de magnetização, ρ_R a resistividade elétrica do material e G um coeficiente adimensional igual a 0,1356 (KOLLÁR *et al.*, 2013).

De acordo com Kollár *et al.*, quando lidamos com materiais heterogêneos que têm valores elevados de resistividade elétrica (ρ_R) e/ou um grande número de objetos magnéticos ativos (n_0), como os compósitos magnéticos moles, a expressão atende à condição onde $(16GSB_m f/n_0^2 V_0 \rho_R)$ é significativamente menor do que 1. Essa condição permite uma expansão de Taylor da Equação 6, simplificando os cálculos e fornecendo uma descrição mais precisa do comportamento do material, levando à expressão:

$$W_{exc} = \frac{16GSB_m^2 f}{n_0 \rho_R} \quad (7)$$

Assim sendo, em relação aos compósitos magnéticos moles, a componente de perda excedente W_{exc} mostra uma relação linear com a frequência, assim como as componentes de perda de correntes parasitas W_{cp} . Isso significa que, para SMCs, a equação que separa as diferentes componentes de perda é diferente daquela usada para chapas de aço (PERIGO *et al.*, 2018). Nota-se também que as perdas excedentes, assim como as perdas por corrente parasita, são inversamente proporcionais à resistividade elétrica do material.

Em outras palavras, quando se trata de SMCs, as perdas de energia ($W - J/m^3$) conforme divisão em suas várias componentes explicitadas anteriormente, podem ainda ser expressas na forma das potências dissipadas ($P - W/kg$) da seguinte forma:

$$P_t = K_H B^\alpha f + K_{cp} B^2 f^2 + K_{exc} B^2 f^2 \quad (8)$$

$$P_t = K_H B^\alpha f + K_D B^2 f^2 \quad (9)$$

em que K_H , α , K_{cp} e K_{exc} são coeficientes de ajuste para o material, sendo os dois primeiros associados às perdas por histerese, enquanto os dois últimos são

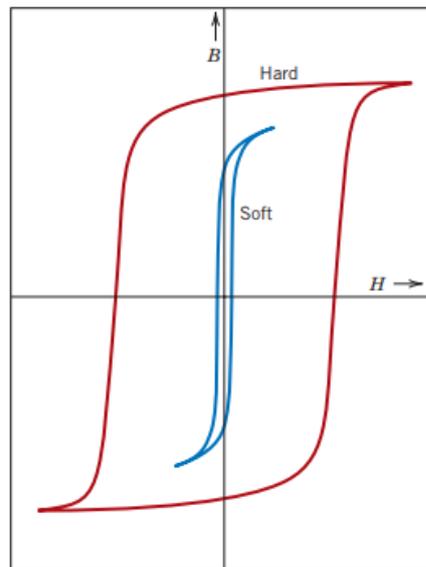
respectivamente associados às perdas por corrente parasita e às perdas excedentes. Uma vez que ambas K_{cp} e K_{exc} são coeficientes que multiplicam B^2f^2 , esses coeficientes podem ser reescritos na forma do coeficiente K_D , que representa as perdas dinâmicas, soma das perdas por correntes parasitas – intra e interparticulares – com as perdas excedentes.

As perdas totais durante a magnetização têm diversas origens, e para reduzi-las, são empregadas estratégias e materiais específicos, levando em consideração a indução máxima e a frequência da magnetização necessárias para uma aplicação específica. Portanto, ao escolher materiais magnéticos moles, é essencial considerar como essas perdas se comportam nas condições específicas da aplicação, com o objetivo de otimizar a eficiência da máquina elétrica.

2.4 MATERIAIS MAGNÉTICOS MOLES

Materiais ferromagnéticos são categorizados com base em suas características de histerese em "moles" ou "duros". Materiais magnéticos moles são empregados em dispositivos sujeitos a campos magnéticos alternados, nos quais as perdas de energia precisam ser minimizadas, como é comum em transformadores. A característica distintiva desses materiais moles é a área pequena dentro de seu ciclo de histerese, que é notavelmente estreita, conforme representado na Figura 8. Essencialmente, um material magnético mole deve apresentar uma alta permeabilidade inicial e uma baixa coercitividade. Isso significa que o material pode atingir sua saturação magnética com a aplicação de um campo relativamente baixo, facilitando sua magnetização e desmagnetização, resultando em perdas de energia de histerese reduzidas (CALLISTER, 2012; FIORILLO, 2012; FISH, 1990).

Figura 8 - Curvas esquemáticas de magnetização para materiais magnéticos moles e duros.



Fonte: CALLISTER, 2012.

Dentre os materiais magnéticos moles, as chapas de aço elétrico desempenham um papel predominante na fabricação de máquinas e componentes elétricos, particularmente em dispositivos como transformadores e motores elétricos. Entretanto, esses materiais enfrentam restrições significativas, especialmente quando operam em frequências mais elevadas, tipicamente acima de 400 Hz. A alta condutividade elétrica dessas chapas resulta na geração de correntes parasitas, que causam perdas substanciais de energia e, conseqüentemente, reduzem a eficiência dos dispositivos (BOEHM; HAHN, 2012; FIORILLO, 2012; FISH, 1990).

Essas limitações de frequência limitam o uso eficaz das chapas de aço elétrico a aplicações de baixa frequência, enquanto em frequências médias e altas, outras soluções precisam ser consideradas para evitar as perdas de energia associadas.

Além disso, o aço elétrico laminado apresenta restrições na condução eficiente do fluxo magnético, sendo altamente eficaz apenas em duas dimensões. (BOEHM; HAHN, 2012). Isso restringe a flexibilidade no projeto de componentes que requerem controle complexo do campo magnético. Adicionalmente, ao processar chapas de aço por estampagem, é comum ocorrer um desperdício substancial de material devido ao processo de corte e conformação (BOEHM; HAHN, 2012).

Portanto, embora amplamente utilizadas em aplicações elétricas, as chapas de aço elétrico enfrentam limitações notáveis relacionadas à eficiência em altas

frequências, à capacidade de condução do fluxo magnético e ao desperdício de material, incentivando a busca por alternativas em contextos específicos.

Em contrapartida, compósitos magnéticos moles apresentam uma resistividade elétrica significativamente maior do que a dos aços elétricos. Isso torna esses materiais adequados para uso em uma ampla faixa de frequências, incluindo frequências mais altas (BOEHM; HAHN, 2012; DE WULF, M. *et al.*, 2002; KOLLÁR *et al.*, 2013). Além disso, os compósitos magnéticos moles exibem uma propriedade importante de carregamento de fluxo magnético isotrópico. Isso significa que eles podem direcionar o fluxo magnético de maneira uniforme em todas as direções, ao contrário das chapas de aço elétrico, que têm propriedades anisotrópicas e limitam o design de componentes. Essa característica de isotropia oferece aos projetistas uma gama muito maior de formatos possíveis para componentes magnéticos, o que pode levar à miniaturização de dispositivos e economia de materiais, como fios de cobre e ímãs permanentes usados em motores elétricos (BOEHM; HAHN, 2012; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). A produção de peças de compósitos magnéticos moles é eficiente, devido ao processamento via metalurgia do pó. Isso resulta em um desperdício mínimo de material, pois as peças podem ser fabricadas diretamente em sua geometria final ou com pequenas alterações de geometria, economizando recursos e reduzindo custos de produção (BOEHM; HAHN, 2012; DE WULF, M. *et al.*, 2002).

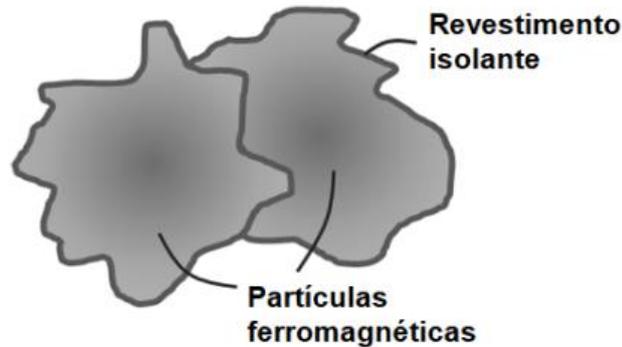
2.5 COMPÓSITOS MAGNÉTICOS MOLES

A pesquisa contínua em compósitos magnéticos moles (SMCs) tem revelado um potencial significativo para aprimorar a indução magnética em materiais de núcleo, tanto em aplicações de corrente contínua (CC) quanto alternada (CA), abrangendo frequências desde baixas até altas. Esse avanço abre portas para projetos inovadores concebidos por engenheiros em diversas áreas, permitindo melhorias substanciais no desempenho e eficiência de sistemas elétricos e magnéticos (SUNDAY, 2017).

Os compósitos magnéticos moles são compostos por partículas de ferro puro ou ligas ferrosas envolvidas por um material isolante, assim como representado pela Figura 9. Os isolantes podem ser de dois tipos: orgânicos (como epóxi, acrílico, poliéster, híbridos de epóxi-poliéster e poliuretano) ou inorgânicos (como fosfatos, óxidos e sulfatos). A principal função desses isolantes é fornecer isolamento elétrico

às partículas ferromagnéticas, aumentando a resistividade do material e, conseqüentemente, reduzindo as perdas causadas por correntes parasitas (PERIGO *et al.*, 2018; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SUNDAY, 2017).

Figura 9 - Representação ilustrativa de um compósito magnético mole.



Fonte: MACHADO, 2020.

Os compósitos magnéticos moles permitem designs revolucionários de dispositivos eletromagnéticos para auxiliar na melhoria da eficiência e na redução de peso e custos, sem sacrificar o desempenho magnético (SUNDAY, 2017). O método de processamento de peças de SMC geralmente segue o processo da metalurgia do pó. Nesse procedimento, a primeira etapa envolve a obtenção de pó de ferro ou ligas ferrosas, que pode ser revestido com um material isolante, seja ele orgânico ou inorgânico. Em seguida, o pó é compactado em uma matriz rígida, dando forma ao componente e aumentando sua densidade. Após essa etapa, o componente passa por um tratamento térmico adicional para aliviar as tensões resultantes da compactação e promover um aumento na resistência mecânica. (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SUNDAY, 2017).

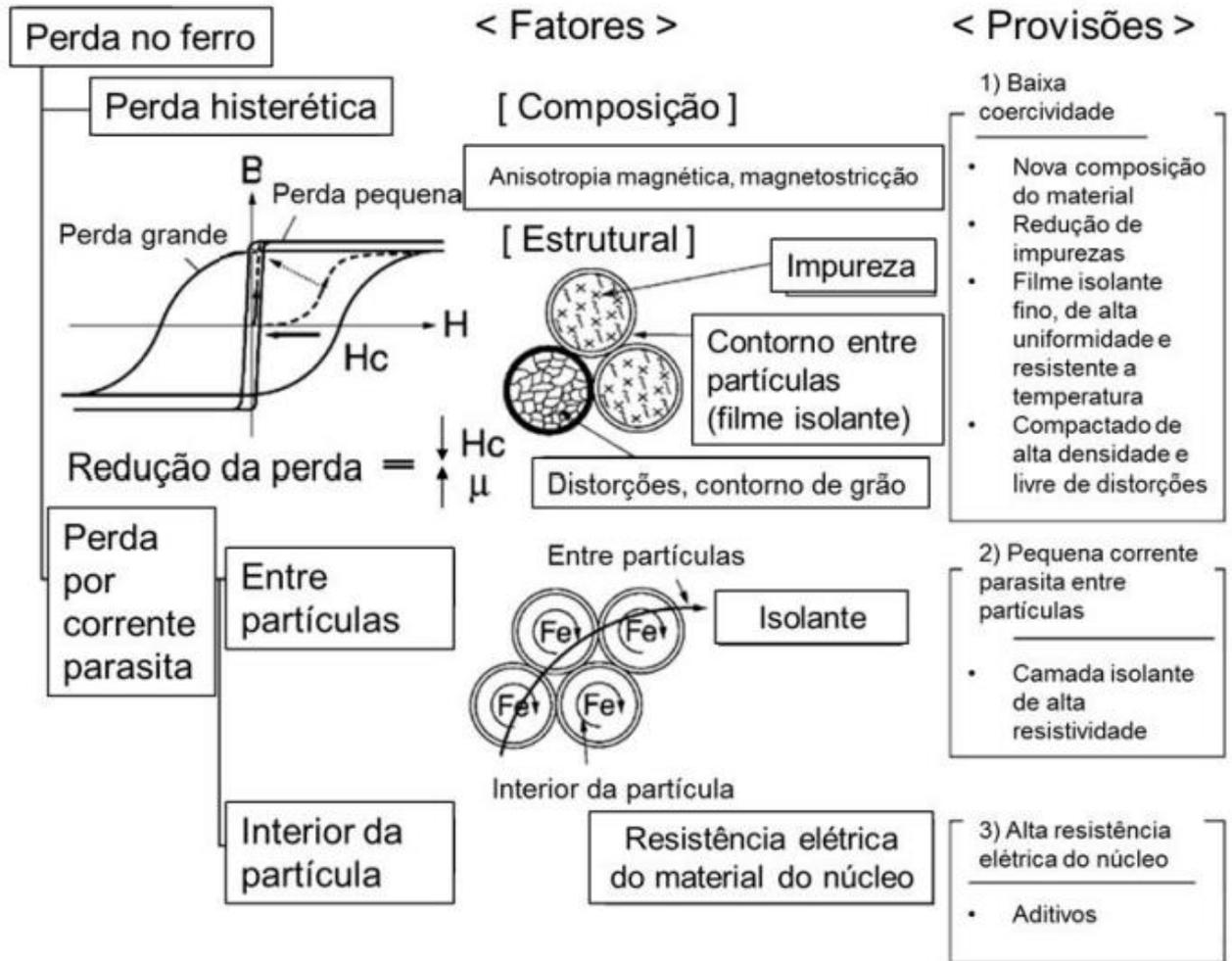
Os SMCs apresentam propriedades distintas que incluem isotropia magnética e térmica, baixas perdas de energia devido a correntes parasitas e perdas totais em frequências médias e altas, alta capacidade de conduzir o fluxo magnético (permeabilidade magnética), alta resistividade elétrica, baixa resistência à inversão da magnetização (coercividade), e alta temperatura de Curie (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SUNDAY, 2017)

As aplicações para materiais magnéticos moles são tipicamente classificadas em duas categorias principais: aplicações de corrente contínua (CC) e aplicações de corrente alternada (CA) (KOLLÁR *et al.*, 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007). Em aplicações de corrente contínua, um campo magnético constante é aplicado. Um exemplo comum é o uso em automóveis. As principais características

consideradas aqui são a capacidade do material de conduzir o fluxo magnético (permeabilidade), sua facilidade de desmagnetização quando o campo é desligado (força coerciva) e a capacidade de atingir uma alta magnetização (indução de saturação). Já em aplicações de corrente alternada, um campo magnético variável é aplicado. Materiais usados em circuitos eletromagnéticos CA precisam ter alta capacidade de magnetização e baixas perdas devido a correntes parasitas. Essas características são altamente influenciadas pela frequência do campo magnético alternado, pela intensidade do campo, bem como pela resistividade elétrica do material. Os principais parâmetros considerados em aplicações CA são a resistividade elétrica, a capacidade do material de conduzir o fluxo magnético (permeabilidade), e as perdas totais devido ao campo magnético alternado (GAY, 1997; KOLLÁR *et al.*, 2013)

Durante a última década, os estudos concentraram-se no aumento da permeabilidade magnética e na redução das perdas dos SMCs para resultar em aplicações de frequência mais elevada, nominalmente de 400 Hz a alguns kHz (SUNDAY, 2017). As propriedades de um componente feito de compósito magnético mole são fortemente influenciadas pelos parâmetros de processamento durante sua fabricação. Vários pesquisadores têm estudado como essas variáveis afetam as propriedades finais do material compósito magnético mole, buscando estratégias para reduzir as perdas de energia no ferro. A Figura 10 apresenta um esquema que reúne algumas das recomendações resumidas por Shokrollahi e Janghorban (SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007) com o objetivo de aprimorar a eficiência dos componentes fabricados com base em SMCs.

Figura 10 - Estratégias para a redução das perdas totais em compósitos magnéticos moles.



Fonte: Traduzido de SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007.

Para reduzir as perdas de energia causadas pela histerese magnética em materiais magnéticos, é recomendável usar materiais que tenham baixa tendência à orientação magnética preferencial, baixa deformação elástica quando submetidos a um campo magnético (magnetostricção), alta pureza, um revestimento isolante fino, fabricação dos componentes com alta densidade, e minimização das tensões residuais (KOLLÁR *et al.*, 2013; SHOKROLLAHI; JANGHORBAN, 2007; SUNDAY, 2017). Por outro lado, para reduzir as perdas de energia devido a correntes parasitas, juntamente com as perdas excedentes relacionadas à resistividade elétrica do material, é aconselhável aplicar uma camada isolante homogênea na superfície das partículas magnéticas com alta resistividade elétrica. Em alguns casos, especialmente em frequências elevadas, pode ser necessário ainda a redução das perdas por corrente parasita intraparticular, exigindo ajuste da composição do material do núcleo das partículas de forma a minimizar tais perdas (KOLLÁR *et al.*, 2013).

Em suma, os compósitos magnéticos moles são versáteis e encontram aplicações em diversas áreas, abrangendo desde o design de núcleos com características ferromagnéticas isotrópicas tridimensionais até o uso em bobinas de reatância de corrente contínua, indutores ressonantes, sensores de freio antitravante (ABS), dispositivos de acionamento eletromagnético, substituição de aços laminados em motores síncronos de corrente contínua, máquinas rotativas, filtros de baixa frequência, bobinas de indução de campo, sistemas de selamento magnético, transformadores, aplicações em alta temperatura e motores de pequenas aeronaves (BARBOZA, 2009; KOLLÁR *et al.*, 2013). Esses materiais podem ter aplicação em alternadores, geradores e motores elétricos usados em uma ampla variedade de ferramentas e dispositivos, como brocas, serras, equipamentos de corte e lixamento, além de ferramentas para jardinagem (BARBOZA, 2009).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, neste capítulo, são detalhados os materiais empregados na validação dos dispositivos desenvolvidos. Após a apresentação dos materiais utilizados, o funcionamento dos dispositivos construídos é descrito em relação à medição da resistividade elétrica e da permeabilidade magnética.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Somaloy® 3P 700

O material utilizado para a validação do dispositivo de medição de permeabilidade magnética foi o Somaloy® 3P 700, uma classe da família Somaloy®, projetada para alcançar resistências mecânicas mais elevadas e aplicações onde a permeabilidade magnética é importante. Trata-se de um pó SMC comercial para aplicações eletromagnéticas. O Somaloy® 3P 700 consiste em partículas de ferro de elevada pureza revestidas com fosfato de ferro, desenvolvida especificamente para proporcionar uma combinação de baixa perda por histerese, alta permeabilidade magnética e alta resistividade elétrica (HÖGANÄS AB, 2018). Os valores reivindicados pela fabricante para as propriedades do material estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Propriedades típicas de componentes à base de Somaloy® 3P 700.

Resistividade elétrica	200 $\mu\Omega\cdot\text{m}$	
Resistência à ruptura	125 Mpa	
B à 10000 A/m	1,61 T	
μ_{max}	850	
Perdas magnéticas à 1T*	100 Hz	10,2 W/kg
	400 Hz	45 W/kg
	1000 Hz	132 W/kg

*Propriedades magnéticas medidas em toróides de diâmetros interno e externo de 55 e 45 mm e altura de 5 mm.

Fonte: Traduzido de HÖGANÄS AB, 2018.

As amostras utilizadas neste trabalho, partiram de caracterizações magnéticas realizadas em desenvolvimentos anteriores do Laboratório de Materiais (LabMat) da UFSC. O processamento destas amostras envolve a variação na temperatura de tratamento térmico, gerando amostras com diferentes propriedades. As propriedades magnéticas foram previamente mensuradas em bancada comercial de medição de precisão da Brockhaus Measurements, modelo MPG 200 D.

3.1.2 SMC de Dupla Camada

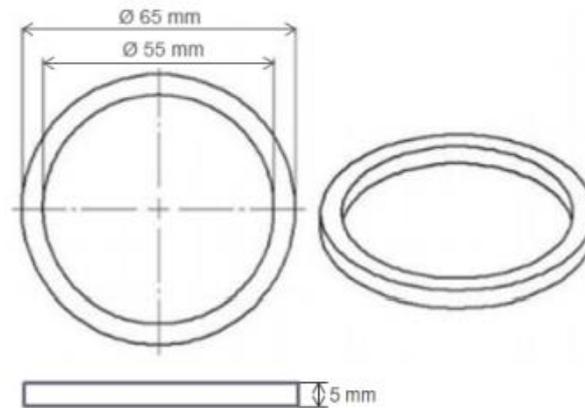
Dentre os SMCs desenvolvidos no Laboratório de Materiais, destaca-se os materiais que o grupo denominou como SMC de dupla camada. Estes SMCs apresentam uma estrutura que combina duas camadas distintas: uma camada inicial composta por nanopartículas de óxido e uma segunda camada constituída por um composto vítreo que atua como um isolante elétrico. A inclusão dessa segunda camada de fase vítrea visa otimizar o desempenho dos SMCs de dupla camada em comparação com os SMCs de camada única, promovendo sinergia entre as camadas.

As amostras de SMC utilizadas para validar a construção do dispositivo de resistividade elétrica foram produzidas com base nas formulações desenvolvidas na dissertação de mestrado de Bernardo Sena da Silva (SILVA, 2023). Para estes SMCs, a primeira camada consiste em pó de ferro revestido com nanopartículas de pentóxido de nióbio (Nb_2O_5), enquanto a segunda camada é composta por silicato de potássio do tipo vidro líquido. A escolha do silicato de potássio se deve às suas características, tais como a elevada resistividade elétrica, o baixo custo e a facilidade de manipulação, tornando-o um componente adequado para esta aplicação específica.

Este material, em sua versão não otimizada, foi inicialmente selecionado para validar o dispositivo de resistividade elétrica. Na sequência, novas amostras produzidas com essa estratégia de dupla camada foram utilizadas como um estudo de caso. Essa escolha se deu em decorrência de problemas técnicos que impediram o uso da bancada de medição de precisão, normalmente empregada para a caracterização das propriedades magnéticas em projetos realizados no LabMat.

Os materiais analisados neste trabalho foram conformados, a partir de pós previamente revestidos, em amostras com formato de anéis, com um diâmetro externo de 65 mm, diâmetro interno de 55 mm e uma altura de 5 mm, como ilustrado na Figura 11. A escolha desse formato de amostra se deve ao fato de que esta geometria toroidal permite a formação de um campo magnético confinado no interior da amostra, sendo utilizada como amostra padrão para todos os ensaios magnéticos já realizados pelo Laboratório de Materiais da UFSC (LabMat) em seus desenvolvimentos relacionados à SMCs.

Figura 11 - Geometria toroidal e dimensões das amostras para medição nos dispositivos desenvolvidos.



Fonte: Autoria própria.

3.2 DESENVOLVIMENTO DAS BANCADAS EXPERIMENTAIS

Na busca por identificar os materiais SMCs mais promissores, a avaliação das perdas magnéticas é fundamental, levando em consideração dois fatores cruciais: a resistividade elétrica e a permeabilidade magnética. A otimização desses dois parâmetros é essencial para minimizar as perdas do material.

Conforme abordado anteriormente, a medição da permeabilidade magnética oferece percepções significativas sobre o comportamento do material em relação às perdas magnéticas decorrentes da histerese, representadas pelo coeficiente K_H . Por outro lado, a resistividade elétrica está diretamente relacionada às perdas por corrente parasita e perdas excedentes, conhecidas como perdas dinâmicas e representadas pelo coeficiente K_D .

No entanto, é importante notar que a medição direta das perdas não é uma tarefa trivial, devido à complexidade dos circuitos eletrônicos necessários para esse tipo de controle. Nesse contexto, a principal motivação por trás do desenvolvimento dos dispositivos deste trabalho reside na obtenção de informações que afetam os coeficientes de perdas K_H e K_D com o uso de circuitos mais simples de construir e mensurar. Embora esses dispositivos não alcancem a complexidade requerida para medições diretas precisas, eles ainda desempenham um papel importante ao proporcionar dados relevantes que contribuem para análises comparativas e investigações relacionadas às propriedades magnéticas e elétricas dos materiais SMC, de maneira mais acessível e viável.

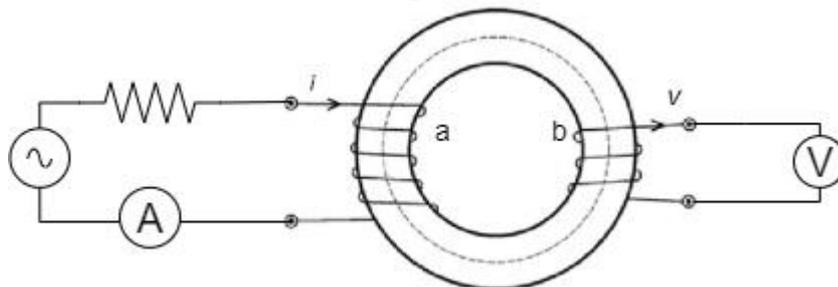
3.2.1 Bancada de Medição de Permeabilidade Magnética

A medição da permeabilidade magnética (μ) traz informações sobre o comportamento do material do ponto de vista das perdas por histerese. O dispositivo de medição desenvolvido utiliza um anel toroidal conhecido como "anel de Rowland".

Esse anel é coberto uniformemente por duas bobinas: uma bobina magnetizadora e uma bobina sensora. A corrente elétrica que flui nas espiras da bobina magnetizadora (enrolamento primário "a") gera um campo magnético no material do anel. Esse campo magnético H tem sua intensidade definida pela corrente elétrica aplicada ao enrolamento primário. Em resposta, no enrolamento secundário ("b") é gerada uma diferença de potencial proporcional à taxa de variação do campo magnético no anel. Em outras palavras, a tensão gerada no enrolamento secundário decorre da densidade de fluxo magnético B no núcleo do anel. Essa relação é uma aplicação da Lei de Faraday da indução eletromagnética.

O dispositivo foi projetado para realizar uma medição indireta da permeabilidade magnética do material da amostra. Isso é feito aplicando uma corrente controlada no enrolamento primário "a" e monitorando a tensão resultante no enrolamento secundário "b" (Figura 12), em um arranjo semelhante ao que seria utilizado para avaliação em uma bancada de precisão comercial. Para controlar a corrente no enrolamento primário, uma fonte de corrente foi utilizada. Essa fonte de corrente é composta por um regulador de tensão em série com uma resistência, o que permite ajustar a corrente elétrica que flui na bobina de magnetização, além de um amperímetro para leitura da corrente eficaz. A tensão eficaz V gerada no enrolamento secundário é medida por um voltímetro. Essa tensão está diretamente relacionada à densidade de fluxo magnético B no núcleo do anel de Rowland.

Figura 12 - Desenho esquemático do dispositivo desenvolvido para a avaliação de permeabilidade magnética.



Fonte: Autoria própria.

O dispositivo desenvolvido apresenta algumas limitações que devem ser consideradas em sua operação e interpretação dos resultados. Em primeiro lugar, a

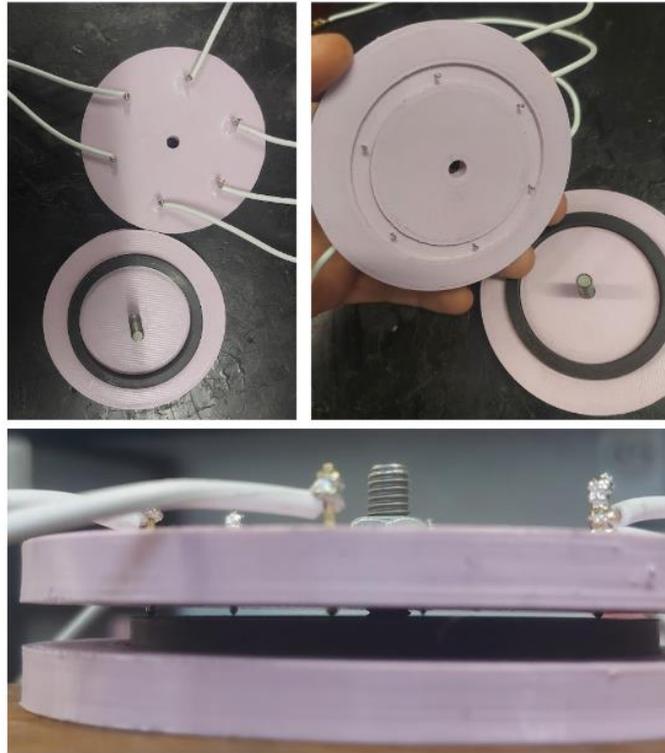
frequência de operação do dispositivo é fixa em 60 Hz, o que impede a variação da frequência do campo magnético aplicado, um parâmetro crítico em algumas análises magnéticas. Além disso, a coleta de dados se restringe aos valores eficazes das ondas de corrente e tensão ao longo de um ciclo de magnetização, o que limita a quantidade de informações disponíveis para análise, uma vez que não é possível monitorar a corrente e a tensão em todos os pontos ao longo do ciclo. Também é importante destacar que o dispositivo não possui controle para manter a corrente no enrolamento primário de forma a gerar um comportamento senoidal da tensão no bobinamento secundário, o que é fundamental para atender a padrões específicos de medição da norma NBR 5161. Dessa forma, a falta de monitoramento do fator de forma da tensão em relação às normas exigidas para medição de propriedades magnéticas é uma limitação significativa e que é essencial para determinar corretamente os valores de permeabilidade e de perdas em um ensaio de precisão. Por conta disso, tomou-se aqui a decisão de não realizar a conversão dos valores de corrente e tensão em campo aplicado e densidade de fluxo, respectivamente, a fim de evitar interpretações equivocadas sobre a capacidade de medição dos dispositivos desenvolvidos. Como resultado, o dispositivo é utilizado principalmente para comparações relativas entre amostras medidas da mesma maneira, permitindo identificar tendências ou diferenças nas propriedades magnéticas, mas não fornecer os valores absolutos dessas propriedades. Apesar das limitações, acredita-se que o dispositivo ainda se mostra bastante útil para rapidamente filtrar resultados potencialmente mais promissores em desenvolvimentos de materiais, além da possibilidade de implementação de sistemas de controle de qualidade, baseados no mesmo método de medição, aplicados em uma linha de produção.

3.2.2 Bancada de Medição de Resistividade Elétrica

As perdas dinâmicas podem ser interpretadas a partir da medição da resistividade elétrica (ρ). A resistividade elétrica é uma propriedade dos materiais que descreve sua capacidade de resistir ao fluxo de corrente elétrica. É uma medida importante para entender como um material conduz eletricidade. A resistividade é medida em ohms-metro ($\Omega \cdot m$) e varia de acordo com as características do material. O dispositivo desenvolvido (Figura 13) para medição da resistividade elétrica foi construído com auxílio de tecnologia de impressão 3D, o qual fixa a amostra toroidal, contendo 6 agulhas de testes de placas eletrônicas, as quais possuem molas na sua

construção de forma que permitem que as agulhas exerçam uma pressão de contato consistente sobre a amostra, o que é importante para obter resultados de medição repetíveis e confiáveis.

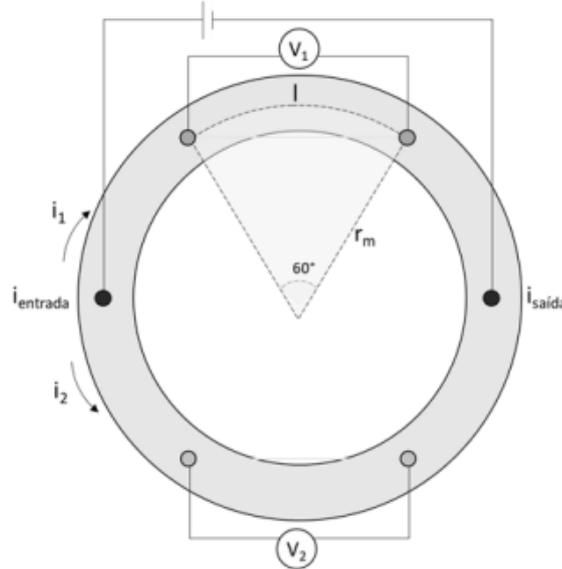
Figura 13 - Fotos do dispositivo desenvolvido para medição de resistividade elétrica.



Fonte: Autoria própria.

Para realizar a medição da resistividade elétrica da amostra, uma corrente elétrica fixa de 1 ampère (1 A) é aplicada entre os pontos externos próximos às bordas da amostra, indicados por $I_{entrada}$ e $I_{saída}$ na Figura 14. Isso cria um fluxo de corrente elétrica através da amostra. Enquanto a corrente elétrica está fluindo pela amostra, a diferença de potencial (tensão elétrica) é medida entre os pontos marcados como V_1 e V_2 . A diferença de potencial é uma medida da queda de tensão ao longo da amostra e é crucial para calcular a resistividade elétrica da amostra.

Figura 14 - Desenho esquemático do dispositivo desenvolvido para avaliação de resistividade elétrica.



Fonte: Autoria própria.

Haja vista que o SMC (material de amostra) é considerado isotrópico, isso significa que suas propriedades elétricas são uniformes em todas as direções. Essa é uma suposição importante para simplificar o processo de medição, uma vez que não há variação direcional nas propriedades elétricas do material. Além disso, considerando a geometria da amostra perfeitamente circular, pode-se dizer que o posicionamento entre os pontos de entrada e saída da corrente elétrica seguem uma distribuição simétrica da corrente. Isso significa que a corrente flui em igual intensidade pelos caminhos denotados por i_1 e i_2 na Figura 15. Assim sendo, com base na simetria da distribuição da corrente, assume-se que a corrente que passa entre os pontos monitorados por V_1 e por V_2 é igual e equivalente a 0,5 A. Dessa forma, a partir do valor conhecido da corrente aplicada e do valor tomado na queda de tensão entre os pontos monitorados pelo voltmímetro, calcula-se a resistência elétrica do volume de amostra entre aqueles pontos. A resistência elétrica é calculada usando a Lei de Ohm, que relaciona a tensão (queda de tensão) com a corrente e a resistência: Resistência (R) = Tensão (V) / Corrente (I). A resistividade ρ é dada pela Equação 10:

$$\rho = \frac{VA}{il} \quad (10)$$

onde V é a tensão, A é a área de seção transversal da amostra, i e a corrente elétrica e l é a distância do arco que liga os pontos em que é realizada a medida da tensão. No dispositivo desenvolvido, dada a distribuição angular simétrica

como apresentado na Figura 15, pode-se estimar o caminho percorrido pela corrente entre as sondas de medição de tensão (l) como mostrado na Equação 11.

$$l = \frac{60\pi r_m}{180} \quad (11)$$

Dada a característica isotrópica do material, é esperado que o valor de resistividade observado entre os pontos de tensão monitorados por V_1 sejam bastante aproximados daquele observado entre os pontos monitorados por V_2 . A partir da junção das Equações 10 e 11 e tomando A como a área da seção retangular do toroide (produto da altura h pela espessura b da amostra), podemos então calcular a resistividade elétrica em cada metade da amostra da seguinte maneira:

$$\frac{V_1}{i_1} = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho}{bh} \cdot \frac{60\pi r_m}{180} \quad (12)$$

Rearranjando os termos, chega-se na expressão para cálculo direto da resistividade:

$$\rho_1 = \frac{3V_1bh}{i_1\pi r_m} \sim \rho_2 = \frac{3V_2bh}{i_2\pi r_m} \quad (13)$$

A resistividade elétrica da amostra é então definida pela média das resistividades calculadas a partir de V_1 e de V_2 . Sendo que i_1 é tomado como igual à i_2 , que por padrão nos ensaios realizados são tomados com 0,5 A (metade da corrente de 1 A imprimida no sistema).

Em resumo, o dispositivo de medição desenvolvido permite medir a resistividade elétrica de uma amostra utilizando uma corrente elétrica conhecida e medindo a diferença de potencial resultante. Isso é fundamental para avaliar como o material conduz a eletricidade e entender suas propriedades elétricas.

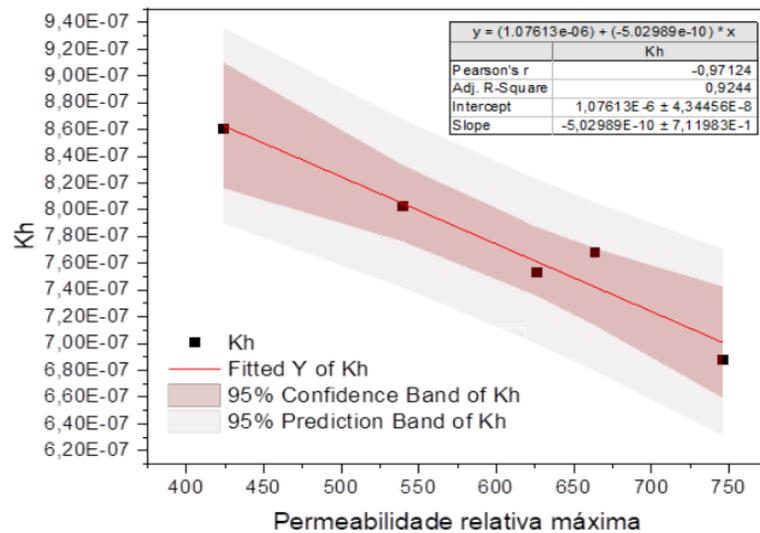
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram desenvolvidas bancadas para a avaliação de propriedades elétricas e magnéticas de amostras toroidais produzidas a partir de compósitos magnéticos moles. A apresentação dos resultados está dividida em três etapas. A primeira seção aborda a validação da bancada de medição de permeabilidade magnética. A validação é realizada através da comparação dos resultados obtidos no dispositivo desenvolvido com amostras de SMC comercial nas quais foram realizadas medições anteriormente em uma bancada comercial de precisão. Em seguida é apresentada a validação da bancada de medição de resistividade elétrica, a partir da correlação entre valores de resistividade de SMCs de dupla camada mensurados no equipamento desenvolvido e seu respectivo coeficiente de perdas dinâmicas (K_D), resultados também previamente obtidos a partir de dados obtidos em bancada comercial. A terceira e última seção deste capítulo abrange um estudo de caso no qual as bancadas desenvolvidas são utilizadas para realizar uma avaliação das propriedades elétricas e magnéticas dos SMCs de dupla camada, tendo como objetivo identificar e selecionar os materiais com maior potencial para aplicações magnéticas, com base nas medições realizadas.

4.1 VALIDAÇÃO DA BANCADA DE MEDIÇÃO DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Para validação do dispositivo de medição de permeabilidade magnética, conforme abordado anteriormente, foram utilizadas amostras de SMC comercial (Somaloy® 3P 700), com valores de permeabilidade magnética e K_H já conhecidos, avaliados através da bancada de precisão em estudos anteriores do LabMat. A Figura 15 apresenta a relação entre o coeficiente K_H e a permeabilidade magnética para as amostras utilizadas.

Figura 15 - Correlação entre K_H e permeabilidade magnética máxima.

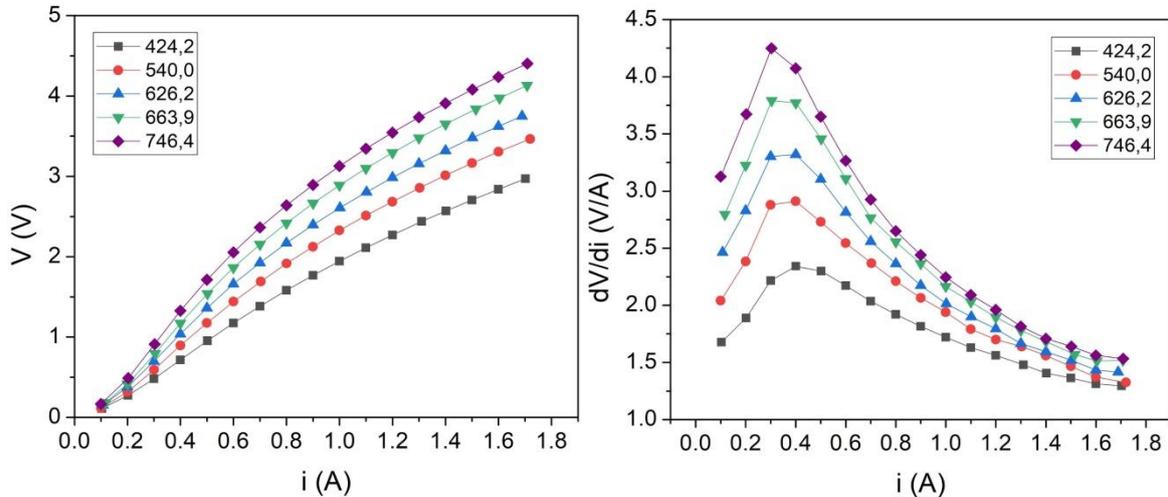


Fonte: Autoria própria.

A partir dessa correlação ilustrada no gráfico, observamos que amostras com maior permeabilidade magnética tendem a apresentar coeficientes K_H mais baixos, indicando menores perdas por histerese. A relação entre o coeficiente K_H e a permeabilidade magnética é significativa, uma vez que a permeabilidade magnética descreve a facilidade com que um material pode ser magnetizado em resposta a um campo magnético externo. Quando a permeabilidade magnética é elevada, o material é mais facilmente magnetizado e desmagnetizado, o que, por sua vez, resulta em coeficientes de perdas por histerese menores, visto que menos energia é dissipada durante esses processos.

As amostras de SMC comercial, cujas permeabilidades magnéticas são previamente conhecidas, foram submetidas à avaliação na bancada de teste desenvolvida neste trabalho. Os resultados das medições, representados na forma de curvas de tensão *versus* corrente, estão apresentados na Figura 16 (à esquerda), com os valores de permeabilidade magnética de cada amostra respectivamente indicado na legenda. Além disso, na mesma figura (à direita), é exibido o gráfico da primeira derivada da tensão em relação à corrente.

Figura 16 -Curvas de tensão no bobinamento secundário versus corrente aplicada ao bobinamento primário (à esquerda) e derivada da tensão em função da corrente aplicada (à direita) para amostras de SMC comerciais.



Fonte: Autoria própria.

O primeiro gráfico apresenta os valores de tensão eficaz medidos no bobinamento secundário versus os respectivos valores de corrente eficaz aplicada ao bobinamento primário para cada amostra. A medição da tensão eficaz (V) no bobinamento secundário está relacionada à taxa de variação da densidade de fluxo magnético no interior do anel, enquanto a corrente eficaz (i) aplicada ao bobinamento primário está relacionada à intensidade do campo magnético. A análise do gráfico de V em relação a i revela padrões que correspondem às características da chamada curva de magnetização inicial em uma bancada comercial. Enquanto a observação direta do gráfico de V em relação a i não fornece um valor quantitativo preciso da permeabilidade magnética, ela pode fornecer informações qualitativas e indicativas sobre como o material responde às variações no campo magnético.

A partir do gráfico da primeira derivada da tensão em relação à corrente é possível inferir que a taxa máxima de variação de tensão (dV/di máximo) é maior quando a permeabilidade máxima do material é maior. A relação entre a taxa de mudança de tensão elétrica e a permeabilidade magnética de um material está profundamente ligada aos princípios fundamentais do eletromagnetismo. A Lei de Faraday da Indução Eletromagnética estabelece que a variação do fluxo magnético (Φ) através de uma superfície fechada induzirá uma tensão elétrica (V) nessa superfície, e essa relação é representada matematicamente pela Equação 14.

$$V = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (14)$$

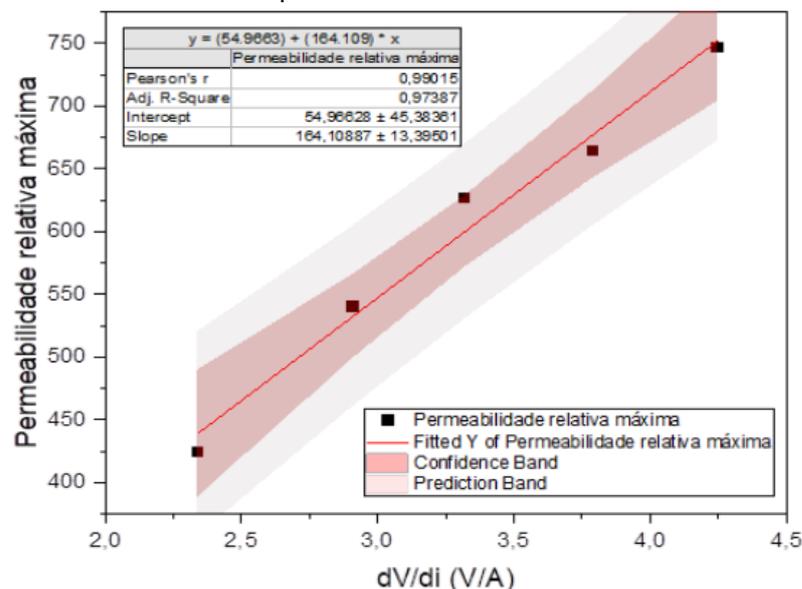
Onde V é a tensão e $d\Phi/dt$ é a taxa de variação do fluxo magnético ao longo do tempo.

A permeabilidade magnética, por sua vez, caracteriza a capacidade de um material de responder a um campo magnético aplicado, ou seja, quantifica a receptividade de um material ao estabelecimento do fluxo magnético. Quando a permeabilidade magnética de um material é maior, ele é mais suscetível a influências magnéticas, há uma maior facilidade de magnetização. Dessa forma, quando uma corrente elétrica varia em um material com alta permeabilidade, o campo magnético gerado pelo material também varia de maneira mais acentuada, resultando em uma taxa de variação de fluxo magnético ($d\Phi/dt$) mais elevada de acordo com a Lei de Faraday.

Em resumo, quando a permeabilidade magnética de um material é maior, ele responde mais intensamente a mudanças na corrente elétrica, resultando em uma taxa de mudança de tensão (dV/di) mais alta. Esse fenômeno é de extrema importância em dispositivos magnéticos, como transformadores e indutores, onde se busca controlar e otimizar a resposta magnética do material para fins específicos de amplificação ou sensibilidade.

A análise dos valores de dV/di máxima em cada curva revela uma boa correlação com os valores de permeabilidade máxima previamente obtidos na bancada de medição de precisão, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Correlação entre os valores obtidos para dV/di máximo de cada uma das amostras de SMC comerciais e seus valores de permeabilidade mensurados em bancada especializada.



Fonte: Autoria própria.

Os resultados indicam uma elevada correspondência entre as medições realizadas na bancada de precisão e aquelas obtidas através do dispositivo desenvolvido ($R^2=0,99$), validando o método para a realização de medidas comparativas de permeabilidade magnética.

4.2 VALIDAÇÃO DA BANCADA DE MEDIÇÃO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Sabe-se que a medição da permeabilidade magnética fornece informações valiosas sobre como um material responde a campos magnéticos em termos de sua capacidade de magnetização e desmagnetização, o que é crucial para entender as perdas por histerese. No entanto, para uma avaliação completa do comportamento do material magnético, especialmente em aplicações de alta frequência, é essencial considerar as perdas dinâmicas. Essas perdas estão relacionadas à dissipação de energia no material devido à circulação de correntes elétricas induzidas pela variação do campo magnético. A medição da resistividade elétrica é uma ferramenta valiosa para avaliar as perdas dinâmicas. Materiais magnéticos com alta resistividade elétrica tendem a ter menores perdas dinâmicas, pois a resistividade elétrica limita a circulação de correntes induzidas.

Para validação do dispositivo de medição de resistividade elétrica, conforme abordado anteriormente, foram medidas a resistividade de 11 amostras de SMC de dupla camada de pentóxido de nióbio e silicato de potássio, as quais já tiveram suas propriedades magnéticas mensuradas em bancada de precisão (SILVA, 2023).

Cada amostra foi submetida a medições de resistividade elétrica usando o dispositivo desenvolvido, seguindo o procedimento descrito na Seção 3.2.2. A resistividade em cada metade da amostra foi calculada de acordo com a Equação 13. Cinco medições independentes foram realizadas para cada amostra, e a média dos valores obtidos para resistividade em cada medição foi determinada. Os resultados das medições estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados das medições de resistividade das amostras de SMC de dupla camada para validação do dispositivo.

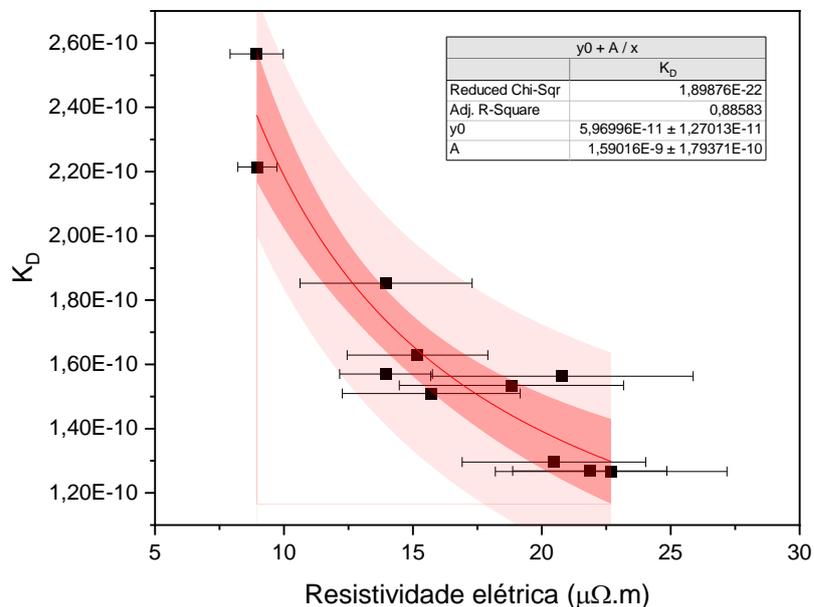
Amostras	Resistividade média ($\mu\Omega.m$)	Desvio padrão ($\mu\Omega.m$)
1	8,94	1,03
2	15,71	3,45
3	13,96	3,34
4	8,97	0,76
5	20,78	5,09
6	21,86	2,99

7	20,47	3,56
8	22,69	4,49
9	18,82	4,35
10	13,96	1,80
11	15,18	2,73

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 18, encontram-se os valores médios e o desvio padrão das medidas de resistividade elétrica das amostras, juntamente com a relação entre a resistividade medida e os valores conhecidos do coeficiente de perdas dinâmicas (K_D).

Figura 18 - Correlação entre resistividade elétrica e coeficiente de perdas dinâmicas K_D .



Fonte: Autoria própria.

Comparando os valores obtidos para resistividade elétrica das amostras de SMC de dupla camada com os valores conhecidos de K_D é possível identificar uma forte relação. Essa relação se baseia no princípio de que materiais com maior resistividade elétrica tendem a apresentar menores perdas por correntes parasitas e perdas excedentes.

As correntes parasitas, que são correntes elétricas induzidas em materiais condutores expostos a campos magnéticos variáveis, são responsáveis pelo aquecimento indesejado e perdas de energia nos componentes elétricos e magnéticos. Materiais com alta resistividade elétrica oferecem uma resistência significativa ao fluxo dessas correntes parasitas. Como resultado, a circulação dessas correntes dentro de materiais de alta resistividade é dificultada, levando a

correntes parasitas menos intensas e, portanto, a menores perdas de energia na forma de calor. Nesse sentido, materiais com alta resistividade apresentam menores coeficientes de perdas dinâmicas (K_D).

A correlação identificada neste contexto está em conformidade com o padrão de comportamento comumente observado em SMCs, conforme documentado em estudos anteriores (EVANGELISTA, 2020; MACHADO, 2020). Como resultado desse alinhamento entre os dados obtidos e o conhecimento prévio, o dispositivo de medição foi considerado validado para uso em futuras análises e aplicações.

4.3 ESTUDO DE CASO – USO DAS BANCADAS DESENVOLVIDAS PARA SELEÇÃO DE MATERIAIS SMC DE DUPLA CAMADA

Mediante a utilização dos novos dispositivos desenvolvidos neste trabalho, destinados à avaliação das propriedades elétricas e magnéticas de materiais, foi conduzido um estudo de caso envolvendo 14 amostras do SMC de dupla camada. Estas amostras foram fabricadas com revestimento de silicato de potássio, tendo sido alterada a porcentagem mássica da fração de sólidos contida na solução durante o processo de secagem, variando entre 0,5% e 3,0%.

Inicialmente, foi medido a resistividade elétrica das amostras, mensuradas um total de 3 vezes entre os pontos monitorados por V1 e mais 3 vezes entre os pontos monitorados por V2. As médias dos valores obtidos para resistividade de cada amostra estão apresentadas na Tabela 3, juntamente com a fração de sólidos utilizada na solução de silicato de potássio.

Tabela 3 - Resultados das medições de resistividade das novas amostras de SMC de dupla camada no dispositivo desenvolvido.

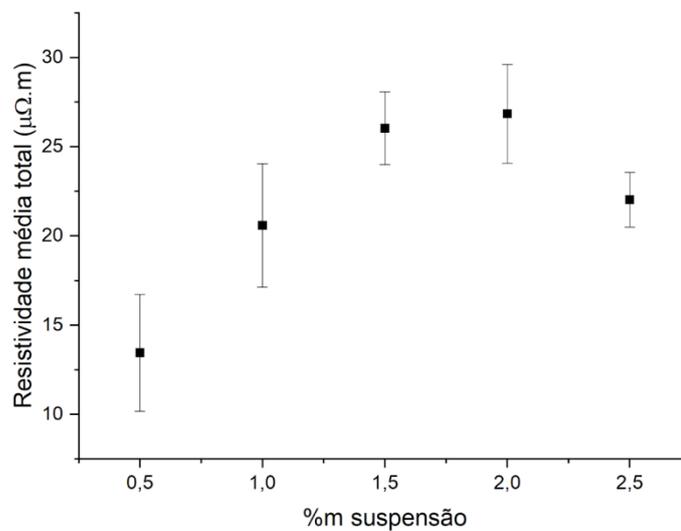
Amostras	%m suspensão	Resistividade média total ($\mu\Omega.m$)	Desvio padrão ($\mu\Omega.m$)
KS-1	2.5	23,71	1,66
KS-2	2.5	20,71	1,1
KS-3	2.5	21,65	2,22
KS-4	2	24,87	0,87
KS-6	2	28,8	2,61
KS-7	1.5	28,29	2,58
KS-8	1.5	24,33	2,38
KS-9	1.5	25,47	2,33
KS-10	1	23,04	2,61
KS-12	1	18,14	1,21
KS-13	0.5	12,52	1,38
KS-14	0.5	17,08	3,43

KS-15	0,5	10,73	2,02
KS-1*	3	24,10	2,31

Fonte: Autoria própria.

A fim de ilustrar melhor os resultados das medições de resistividade, a Figura 19 a seguir apresenta a relação entre a resistividade média total em função da concentração de sólidos de silicato de potássio. É possível observar que as amostras com teor de sólidos de 1,5 e 2,0 possuem as maiores resistividades elétricas neste estudo.

Figura 19 – Relação entre a resistividade média total em função da concentração de sólidos de silicato de potássio.

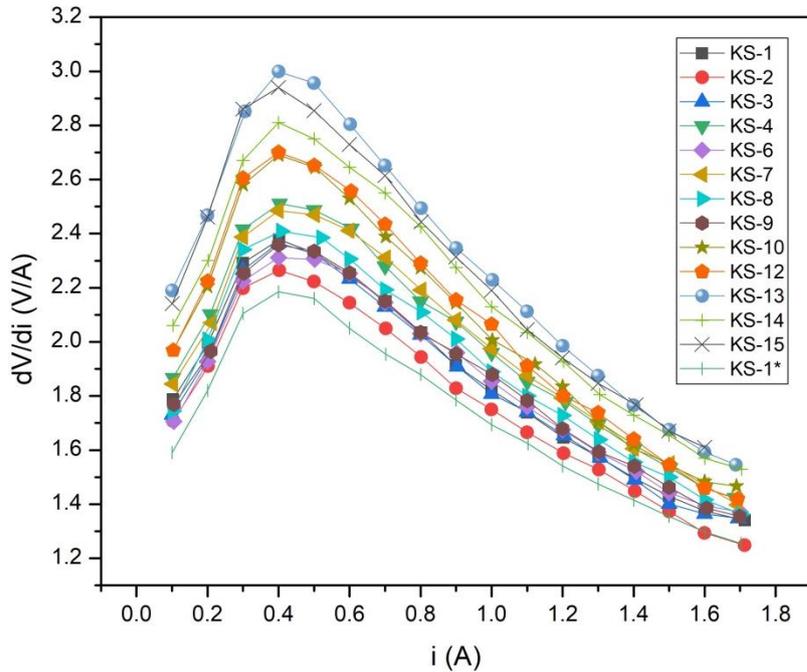


Fonte: Autoria própria.

Observa-se um aumento na resistividade elétrica do material com o aumento da proporção de silicato de potássio no SMC. Esse resultado é coerente no sentido de que uma camada isolante mais espessa permite um melhor isolamento elétrico entre as partículas ferromagnéticas, o que leva a uma redução das perdas dinâmicas. A redução da resistividade elétrica observada na amostra 2,5% carece de maior investigação, mas uma hipótese que pode justificar o comportamento observado se baseia em um fluxo viscoso mais intenso, podendo remover parte da primeira camada isolante (pentóxido de nióbio), deixando as partículas ferromagnéticas expostas novamente.

Em relação à permeabilidade magnética, os resultados das medições, representados na forma gráfico da primeira derivada da tensão em relação à corrente, estão apresentados na Figura 20.

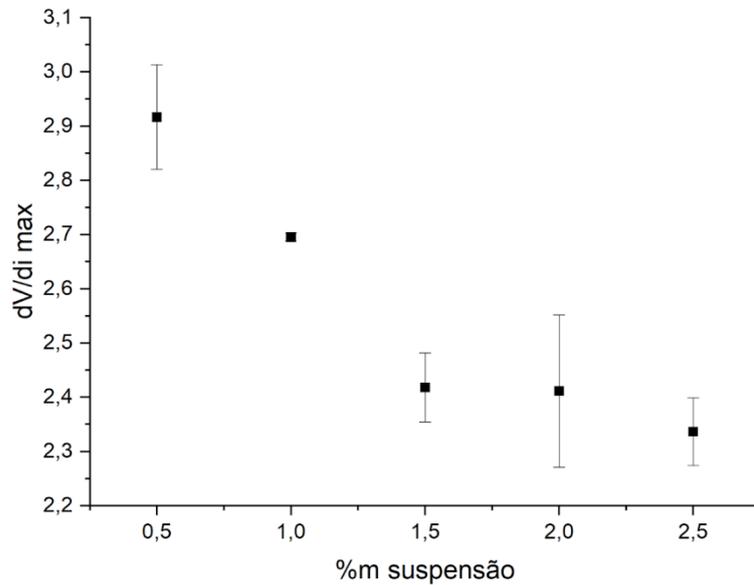
Figura 20 - Derivada da tensão em função da corrente aplicada para amostras de SMC de dupla camada.



Fonte: Autoria própria.

Ademais, a Figura 21 a seguir apresenta a relação entre a dV/di máxima em função da concentração de sólidos de silicato de potássio.

Figura 21 – Relação entre dV/di máxima em função da concentração de sólidos de silicato de potássio.



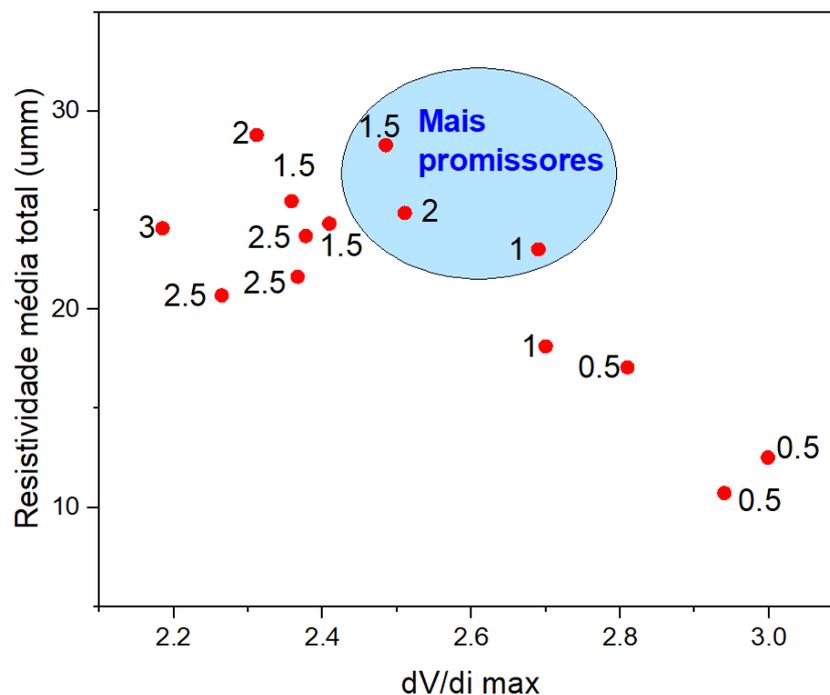
Fonte: Autoria própria.

Sabe-se que quanto maior o valor máximo de dV/di , maior a permeabilidade magnética da amostra. Sendo assim, é possível identificar que quanto menor a concentração de sólidos de silicato de potássio mais alta é a alta permeabilidade

magnética (alto dV/di máximo). Tal resultado é condizente com o esperado, pois quanto menor a espessura da camada isolante, maior a proximidade entre as partículas ferromagnéticas, aumentando a interação entre os domínios de partículas vizinhas, o que resulta em maior permeabilidade magnética.

A partir dos resultados obtidos e a fim de proporcionar uma avaliação abrangente das amostras, foi construído o gráfico da Figura 22, que compila os resultados de resistividade elétrica e permeabilidade magnética (dV/di máximo). Os rótulos de dados ao lado de cada ponto indicam a fração de sólidos utilizada na solução de silicato de potássio para produção das amostras. Tal representação gráfica possibilitou a identificação das amostras mais promissoras, ou seja, aquelas que exibem simultaneamente elevada resistividade elétrica e alta permeabilidade magnética (alto dV/di máximo).

Figura 22 - Compilado de resultados de resistividade elétrica e permeabilidade (dV/di) das amostras de SMC de dupla camada.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados obtidos, nota-se que as amostras tomadas como mais promissoras incluem amostras produzidas com fração de sólidos variando de 1 a 2%. Tais amostras serão futuramente medidas em bancada de precisão para confirmação do potencial desses materiais. Vale destacar que a rápida filtragem de amostras possibilitada pelos dispositivos desenvolvidos nesse trabalho permite acelerar o desenvolvimento de materiais como demonstrado pelo estudo de caso,

levando a necessidade de medições mais morosas e onerosas apenas de amostras mais promissoras.

Destaca-se ainda que por serem medidas extremamente rápidas, essas podem ser adaptadas para realização de controle de qualidade de componentes, mesmo que esses não possuam o formato toroidal padrão. Neste caso, o processo de medição de resistividade por quatro pontas poderia ser realizado em uma das faces planas do componente, enquanto o posicionamento do bobinamento de indução e medição para medição da máxima taxa de tensão em função da corrente deve ser avaliada de acordo com as geometrias do componente.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo principal o desenvolvimento de bancadas para a avaliação de propriedades elétricas e magnéticas de amostras toroidais produzidas a partir de compósitos magnéticos moles. Para tal, foi realizada a validação da bancada de medição de permeabilidade magnética, comparando os resultados obtidos com amostras de SMC comercial às medições anteriormente realizadas em uma bancada comercial de precisão. Posteriormente, foi conduzida a validação da bancada de medição de resistividade elétrica, fundamentada na correlação entre os valores de resistividade medidos nas amostras de SMCs de dupla camada utilizando o equipamento desenvolvido e seus respectivos coeficientes de perdas dinâmicas (K_D). Por fim, um estudo de caso foi implementado, empregando as bancadas desenvolvidas para efetuar uma avaliação ágil das propriedades elétricas e magnéticas de novos SMCs de dupla camada desenvolvidos no LabMat.

A partir dos resultados alcançados, pode-se concluir que:

- A correlação entre as medições realizadas na bancada de precisão para as amostras de SMC comercial e aquelas obtidas através do dispositivo desenvolvido para medição de permeabilidade magnética valida o método para realizar medidas comparativas de permeabilidade magnética;
- A validação do dispositivo de medição de resistividade elétrica é sustentada pela consistência da relação entre a resistividade elétrica das amostras de SMC de dupla camada avaliadas e os valores conhecidos de K_D . A validação do dispositivo de medição é corroborada pela consistência dessas correlações com o comportamento típico de SMCs documentado em estudos anteriores;
- A representação gráfica dos resultados do estudo de caso permitiu identificar amostras com alta resistividade elétrica e alta permeabilidade magnética, consideradas as mais promissoras. Esse achado é crucial para direcionar futuras pesquisas e aplicações na seleção de materiais com características ideais para fins magnéticos. Os resultados sugerem que amostras produzidas com revestimento de dupla camada com fase vítrea baseada em silicato de potássio com fração de sólidos variando de 1 a 2% são particularmente promissoras.

Por fim, é interessante destacar que a necessidade de desenvolver tais dispositivos surgiu em decorrência de problemas técnicos que impediram o uso da bancada de medição de precisão, normalmente empregada para a caracterização das propriedades magnéticas em projetos realizados no LabMat. Entretanto, os dispositivos desenvolvidos têm potencial para serem utilizados como protótipos de medição adaptáveis em uma linha de produção. Embora esses dispositivos não forneçam valores precisos, eles podem ser empregados como ferramentas comparativas. Um procedimento viável para uma qualificação em linha de produção seria medir um material com propriedades conhecidas e validadas como aceitáveis no dispositivo, estabelecendo assim uma referência confiável. Em seguida, esses valores de referência podem ser usados para pré-validar novas peças dentro de um limite de tolerância predefinido. Essa abordagem torna os dispositivos desenvolvidos uma alternativa acessível e viável para obtenção de valores de referência em linha de produção, contribuindo para aprimorar o controle de qualidade, a seleção de materiais, a otimização de processos e a validação de produtos.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Melhoria do sistema de medição simplificado com incorporação de um gerador de sinais e osciloscópio para melhorar o monitoramento de corrente e tensão.
- Utilizando o gerador de sinais, realizar avaliação do sistema para outras frequências e outras formas de onda de interesse.
- Avaliar em linha de produção piloto a utilização de dispositivos que se baseiam nos mesmos princípios de medição aplicados à qualificação de componentes.
- Avaliar outras formas de medição de resistividade elétrica das amostras, preferencialmente sem contato, para reduzir a dispersão de resultados por conta da influência da resistência de contato.

REFERÊNCIAS

- BARBOZA, J. S. **Caracterização de compósitos magnéticos macios desenvolvidos através da metalurgia do pó aplicados a núcleos de máquinas elétricas**. [s.l.] UFRGS, 2009
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 24, n. 1, p. 621–630, 1988.
- BOEHM, Andreas; HAHN, Ingo. Comparison of soft magnetic composites (SMCs) and electrical steel. In: **2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)**. IEEE, 2012. p. 1-6.
- CARDOSO, RF de A. **Influência do tamanho de grão e das adições de Al e Mn nas propriedades magnéticas dos aços elétricos de grão não orientado com 3% Si**. Dissertação (mestrado) - Ciência dos Materiais, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, p. 2171-2179, 2005.
- CALLISTER, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 8. ed. LTC, 2012.
- CSANYI, Edvard. **Materials with magnetic properties**. 2011. Disponível em: <https://electrical-engineering-portal.com/materials-with-magnetic-properti>. Acesso em: 30 set. 2020
- CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. Introduction to **Magnetic Materials**. 2. ed. Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2008.
- DE WULF, Marc *et al.* Magnetic properties and loss separation in iron powder soft magnetic composite materials. **Journal of applied physics**, v. 91, n. 10, p. 7845-7847, 2002.
- ENERDATA. **World Power consumption | Electricity consumption | Enerdata**. Disponível em: <https://yearbook.enerdata.net/electricity/electricity-domestic-consumption-data.html>. Acesso em: 3 nov. 2023.
- EVANGELISTA, Leandro Lima. **Estudo de compósitos magnéticos moles de partículas de ferro recobertas por nanopartículas de óxido de zinco e ácido bórico**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2020.
- FARGHALI, Mohamed *et al.* Strategies to save energy in the context of the energy crisis: a review. **Environmental Chemistry Letters**, p. 1-37, 2023.
- FARIA, Rubens N.; LIMA, Luis FCP. **Introdução ao magnetismo dos materiais**. Editora Livraria da Física, 2005.
- FIORILLO, F. **Characterization and Measurement of Magnetic Materials**. Torino: [s.n.].
- FIORILLO, Fausto *et al.* Soft magnetic materials. In: **Wiley Encyclopedia of Electrical and Electronics Engineering**. John Wiley & Sons, Inc., 2016. p. 1-42.

FISH, Gordon E. Soft magnetic materials. **Proceedings of the IEEE**, v. 78, n. 6, p. 947-972, 1990.

GAY, D. E. Soft magnetic composite materials for ac electrical applications. **Metal Powder Report**, v. 7, n. 53, p. 42, 1997.

GUTFLEISCH, Oliver *et al.* Magnetic materials and devices for the 21st century: Stronger, lighter, and more energy efficient. **Advanced Materials**, v. 23, n. 7, p. 821-842, dez. 2010.

HÖGANÄS AB. **Somaloy® 3P Material Data**. 2018. Disponível em: https://www.hoganas.com/globalassets/downloads/sp/library/somaloy_somaloy-3p-material-data_2273hog.pdf. Acesso em: 15 set. 2023.

JAYACHANDRAN, M. *et al.* Challenges in achieving sustainable development goal 7: Affordable and clean energy in light of nascent technologies. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 53, p. 102692, 2022.

KOLLÁR, P. *et al.* Power loss separation in Fe-based composite materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 327, p. 146–150, fev. 2013.

LALL, C. **Soft magnetism: Fundamentals for powder metallurgy and metal injection molding**. New Jersey: Metal Powder Industry, 1992.

LANDGRAF, Fernando José Gomes *et al.* Propriedades Magnéticas de aços para fins elétricos. **Aços: perspectivas para os próximos**, v. 10, p. 109-128, 2002.

MACHADO, Leticia Espíndola *et al.* **Desenvolvimento de revestimento isolante de partículas ferromagnéticas obtido a partir de nanoesferas de carbono e óxido de boro para aplicação em compósitos magnéticos moles**. 2020.

PÉRIGO, Elio Alberto *et al.* Past, present, and future of soft magnetic composites. **Applied Physics Reviews**, v. 5, n. 3, 2018.

PINHO, Luís Carlos Almeida Bastos de. **Materiais Magnéticos e suas Aplicações**. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Integrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.

RODRIGUES, V. I. DOS S. **Elaboração e caracterização de compósitos magnéticos**. Dissertação de Mestrado. UFRGS, 2009.

SILVA, B. S. **Avaliação de compósitos magnéticos moles baseados em partículas ferromagnéticas recobertas com pentóxido de nióbio nanoparticulado e fases vítreas**; Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais; Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis; 2023.

SHOKROLLAHI, H. E. J. K.; JANGHORBAN, K. Soft magnetic composite materials (SMCs). **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189, n. 1-3, p. 1-12, 2007.

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