

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS FLORIANÓPOLIS – CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Alexandre Censi Kuss

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE
FE-SI SUBMETIDAS A ESFORÇOS MECÂNICOS**

Florianópolis – SC, Brasil

Novembro de 2019

Alexandre Censi Kuss

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE
FE-SI SUBMETIDAS A ESFORÇOS MECÂNICOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.
Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Coorientadora : Eng^a. Indiara Pitta Côrrea da Silva

Florianópolis – SC, Brasil

Novembro de 2019

Ficha de identificação da obra

Kuss, Alexandre Censi

ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE FERRO
SUBMETIDAS A ESFORÇOS MECÂNICOS / Alexandre Censi Kuss
; orientador, Nelson Sadowski, coorientadora, Indiara
Pitta Corrêa Pitta da Silva, 2019.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, , Graduação em
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

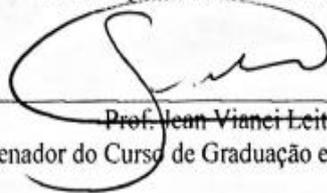
1. . 2. Estudo. I. Sadowski, Nelson. II. da Silva,
Indiara Pitta Corrêa Pitta. III. Universidade Federal de
Santa Catarina. Graduação em . IV. Título.

Alexandre Censi Kuss

**ANÁLISE DE CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS EM LÂMINAS DE FE-SI SUBMETIDAS A
ESFORÇOS MECÂNICOS**

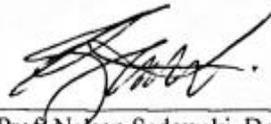
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 29 de novembro de 2019.

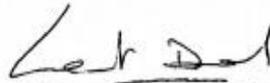


Prof. Jean Vianei Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Nelson Sadowski, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Laurent Daniel, Ph.D.
CentraleSupélec



Eng. Eletric. Ricardo de Araujo Elias, MSc.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a todos que fizeram parte de minha jornada durante a graduação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente aos meus pais, Carmen B. G. Censi Kuss e Joselito Paulo Kuss, por me apoiarem e pelo incentivo durante todo o processo. Agradeço ao meu orientador, professor Nelson Sadowski, pelas orientações, pelo aprendizado passado e por me aceitar como seu orientando. E agradeço também à Indiara Pitta Côrrea da Silva, coorientadora, pois me guiou desde os procedimentos iniciais, disponibilizou sua ajuda durante todos os ensaios e me ensinou muito. Agradeço também pelos materiais fornecidos da empresa WEG S.A. – Equipamentos Elétricos. De coração, obrigado por fazerem parte dessa caminhada.

RESUMO

O presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de obter um estudo sobre os efeitos que esforços mecânicos causam nas propriedades magnéticas (Efeito de Villari ou magnetostricção inversa), como permeabilidade e perdas, de lâminas Fe-Si. Foram feitos ensaios de duas amostras de chapas ferromagnéticas, uma delas com alívio térmico de tensões e a outra sem. Nesses ensaios, foram utilizadas as bancadas Brockhaus MPG-200 e a bancada de esforços mecânicos desenvolvida no GRUCAD/UFSC. Os ensaios realizados na Brockhaus foram utilizados como referência nas comparações. Na bancada de esforços mecânicos, foi possível aplicar diversos níveis de tensões, em tração e em compressão, e a partir de instrumentos virtuais de aquisição e tratamento de dados desenvolvidos no software Labview, foram obtidas as informações necessárias para avaliar as mudanças nas características magnéticas.

Palavras-chave: Magnetostricção inversa. Perdas Magnéticas. Tensões Mecânicas.

ABSTRACT

The present work was developed with the objective of obtaining a study on the effects that mechanical stresses cause on magnetic properties (Villari effect or inverse magnetostriction), such as permeability and losses, of Fe-Si sheets. Two samples of ferromagnetic sheets were tested, one with thermal stress relief and the other without it. In these tests two machines were used, the Brockhaus MPG-200 to obtain base tests and the mechanical stress bench developed at GRUCAD / UFSC. Thus, it was possible to apply different stress levels, traction and compression, and from the virtual instruments of data acquisition and treatment on Labview, the necessary information was obtained to evaluate the changes in the magnetic characteristics.

Keywords: Magnetostriction. Losses. Tensions.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Efeito do campo magnético de ímãs em limalha de ferro	15
Figura 2 – Separação de perdas	18
Figura 3 – Momento Magnético de um Átomo	20
Figura 4 – Processo inicial da curva de magnetização	21
Figura 5 – Ciclo de histerese de um material ferromagnético	22
Figura 6 – Laços BxH medidos a 1 Hz e 50 Hz.....	23
Figura 7 – Correntes induzidas em Núcleo Sólido X Núcleo Laminado.....	24
Figura 8 – Correntes induzidas na lâmina de aço elétrico	25
Figura 9 – Efeito de magnetostricção em material ferromagnético.....	28
Figura 10 – Efeito do carregamento mecânico na magnetização do Níquel.....	29
Figura 11 – Efeito do carregamento mecânico na magnetização do 68-Permalloy.....	30
Figura 12 – Magnetostricção inversa do ferro puro e policristalino.....	30
Figura 13 – Curvas de Histerese para Fe-3%Si sob tração.....	31
Figura 14 – Processo de estampagem	33
Figura 15 – Altura das rebarbas baseado no número de estampagens.....	34
Figura 16 – Diferença nas perdas em lâminas com e sem alívio térmico de tensões	36
Figura 17 – Influência das micro-soldas no pacote de um estator.....	37
Figura 18 – Single Sheet Tester da máquina Brockhaus MPG200.....	39
Figura 19 – Circuito magnético da bancada de esforços mecânicos	40
Figura 20 – Diagrama da bancada de esforços mecânicos	41
Figura 21 – Bancada de esforços mecânicos	44
Figura 22 – Ensaio fabricante A E230 sem alívio de tensões em 50 Hz.....	51
Figura 23 – Ensaio amostra Fabricante B E230 em 50 Hz	52
Figura 24 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 1 Hz.....	54
Figura 25 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 10 Hz.....	54
Figura 26 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 50Hz.....	55
Figura 27 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 100 Hz.....	55
Figura 28 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 1 Hz	57
Figura 29 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 10 Hz	57
Figura 30 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 50 Hz	58
Figura 31 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 100 Hz	58

Figura 32 – Perdas magnéticas nas amostras com e sem alívio térmico E230B a 1 T e 0,5 T e 1 Hz.....	60
Figura 33 – Comparação de Perdas COM x SEM tratamento térmico em 1 Hz	61
Figura 34 – Comparação de Perdas COM x SEM tratamento térmico em 50 Hz	61
Figura 35 – Permeabilidade relativa, amostra COM alívio de tensões em 1 Hz	63
Figura 36 – Permeabilidade relativa, amostra COM alívio de tensões em 50 Hz	63
Figura 37 – Permeabilidade relativa, amostra SEM alívio de tensões em 1 Hz	64
Figura 38 – Permeabilidade relativa, amostra SEM alívio de tensões em 50 Hz	65
Figura 39 – Laço de histerese em 1 T e 1 Hz amostra COM alívio térmico	66
Figura 40 – Laço de histerese em 1 T e 1 Hz amostra SEM alívio térmico	67
Figura 41 – Comparação laço de histerese COM x SEM alívio térmico sob compressão	68
Figura 42 – Comparação laço de histerese COM x SEM alívio térmico sob traçã	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Tensões mecânicas e frequências elétricas de ensaios.....	45
Tabela 2 - Induções máximas e mínimas nos ensaios.....	47
Tabela 3 - Variação do comprimento sob esforços mecânicos.....	48
Tabela 4 - Dados construtivos das amostras testadas.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	Objetivo Geral	14
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	CONCEITOS DE MAGNETISMO E FERROMAGNETISMO	15
2.1.1	Campo Magnético	16
2.1.2	Equações de Maxwell	16
2.2	PERDAS MAGNÉTICAS	17
2.2.1	Perdas por Histerese	19
2.2.2	Perdas Dinâmicas	24
2.2.3	Perdas Excedentes	26
2.3	ACOPLAMENTO MAGNETOMECÂNICO	26
2.3.1	Acoplamento Magnetoelástico e Magnetostricção	27
2.4	ORIGEM DO CARREGAMENTO MECÂNICO NAS CHAPAS DE AÇO ELÉTRICO	32
2.4.1	Laminação e Estampagem	32
<u>2.1.1.1</u>	<i>Revestimento</i>	33
2.4.2	Tratamento Térmico	35
2.4.3	Montagem do Núcleo Magnético	37
3	METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS	38
3.1	BROCKHAUS MPG200	38
3.2	BANCADA DE ESFORÇOS MECÂNICOS	39
3.3	PROCEDIMENTO DE ENSAIOS NA BANCADA.....	44
3.3.1	Preparação e Montagem da Bancada	45
3.3.2	Acionamento da Bancada e Aquisição de Dados	45
3.4	AMOSTRA DE FE-SI	48

4	RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	50
4.1	RESULTADOS DE PERDAS MAGNÉTICAS.....	52
4.1.1	Amostra com alívio térmico	53
4.1.2	Amostra sem alívio térmico.....	56
4.1.3	Comparação de resultados de perdas magnéticas entre amostras com alívio e sem alívio térmico	59
4.2	RESULTADOS DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA	62
4.2.1	Amostra com alívio térmico	62
4.2.2	Amostra sem alívio térmico.....	64
4.3	LAÇOS DE PERDAS MAGNÉTICAS.....	65
5	CONCLUSÃO	70
5.1	TRABALHOS FUTUROS	72
	REFERÊNCIAS	73

1 INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna as máquinas elétricas tornaram-se essenciais para manter e melhorar a qualidade de vida do ser humano. Dentre elas, têm-se os motores, geradores e transformadores. A função delas é a transformação de energia, energia elétrica em mecânica nos motores e energia mecânica em elétrica no caso dos geradores. Atualmente, as máquinas elétricas ocupam cerca de 47% do consumo global de energia elétrica [7], e como nenhum processo que ocorre na natureza é ideal, essas máquinas estão suscetíveis a perdas. A constante melhora no rendimento dessas máquinas é imprescindível para se reduzir a parcela de consumo devido às perdas no processo de conversão eletromecânica de energia.

O funcionamento das máquinas elétricas deve-se, principalmente, à presença de campos magnéticos. Dependendo da forma que a máquina é projetada (gerador ou motor), o campo magnético formado tem funções diferentes, no caso do gerador o movimento do rotor exposto a um campo magnético varia o fluxo gerando uma tensão, e para o motor, o fluxo magnético varia devido ao campo girante formado por tensões, e essa variação gera força que o faz girar [5]. Para gerar ou induzir um campo magnético nas condições de operação desejadas são necessários materiais magnéticos que possuam as características específicas para esse fim. Para máquinas elétricas serem mais eficientes, são necessários materiais que além de orientar as linhas de fluxo magnético de maneira desejada, levem em conta fatores como custo e que possuam baixos valores de perdas magnéticas [2].

Como o objetivo das indústrias que fabricam as máquinas elétricas a partir dos materiais ferromagnéticos é melhorar o rendimento, ao mesmo tempo em que reduzem seu peso e tamanho, é necessário conhecer através de análise, as perdas nos materiais ferromagnéticos durante a fabricação e a operação. As perdas magnéticas nesses materiais podem ser separadas em parcelas de perdas dinâmicas e de perdas por histerese. As perdas por histerese têm relação com a ciência do material, já as perdas dinâmicas são proporcionais às correntes induzidas que ocorrem no material.

Existem diversos processos que influenciam diretamente nas perdas energéticas. Dentre eles, estão os processos de laminação, de estampagem das chapas de aço, a prensagem que é feita para obtenção do pacote de lâminas, como também o tratamento térmico. O processo de tratamento térmico é feito em último estágio para aliviar os esforços aplicados pelas outras

etapas na hora de fabricação das chapas de aço. Isso ocorre, pois este recozimento¹ final tem função de aliviar as tensões durante o processo de corte, recristalização, crescimento dos grãos e redução do teor de carbono devido à atmosfera oxidante [4].

As tensões ou esforços mecânicos gerados pelos processos de fabricação dos materiais ou pela própria operação das máquinas alteram características das chapas ferromagnéticas, como permeabilidade, e por consequência, as perdas energéticas. Desse modo, vê-se relevância na realização de análises do ponto de vista prático e teórico para avaliar características magnéticas de materiais com diferentes processos de fabricação (com e sem alívios de tensões, por exemplo) quando submetidos a esforços mecânicos de trações e/ou compressões. Ter conhecimento das mudanças ocorridas nas características de materiais devido a esforços mecânicos pode ser usado para melhorar o rendimento, quando utilizadas em projetos de máquinas, por exemplo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo do trabalho é a ampliação de estudos em materiais, como o aço elétrico, com o intuito de possibilitar estudos que possam aprimorar os equipamentos em que eles são utilizados.

1.1.1 Objetivos Específicos

O objetivo específico deste trabalho consiste em realizar ensaios em amostras de Fe-Si com e sem alívio térmico quando submetidas a esforços mecânicos de diferentes intensidades e a partir dos resultados, analisar e comparar as propriedades magnéticas, como perdas e permeabilidade relativa nesses dois tipos de amostras.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho será dividido em 5 capítulos. No primeiro capítulo é introduzido o contexto e explicação do porquê realizar este estudo. O segundo capítulo engloba os conhecimentos teóricos para auxiliar na compreensão do trabalho. O Capítulo 3 trata da metodologia e dos equipamentos usados. No quarto capítulo estão os resultados experimentais obtidos e o quinto capítulo conclui o trabalho e aborda trabalhos futuros.

¹ Nomenclatura para o tratamento térmico de aço para fins elétricos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

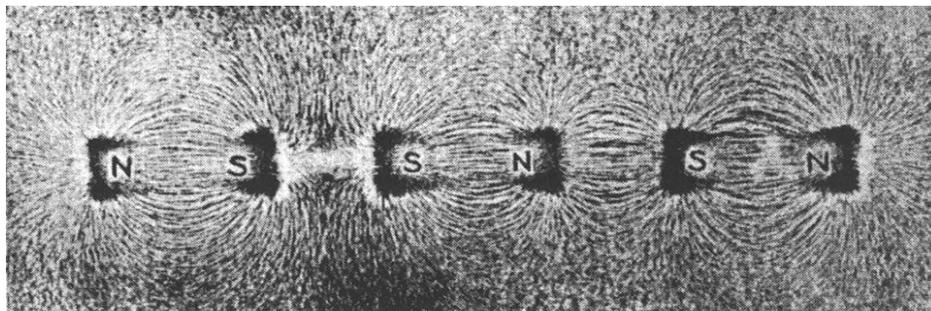
Neste capítulo serão abordados conceitos de magnetismo e ferromagnetismo, perdas magnéticas, acoplamento magnetomecânico e origem da aplicação de esforços na fabricação de lâminas Fe-Si de forma que auxilie na compreensão do trabalho.

2.1 CONCEITOS DE MAGNETISMO E FERROMAGNETISMO

O magnetismo é um fenômeno físico que é conhecido desde o início do desenvolvimento da humanidade. Diversas civilizações relataram o efeito de pedras que podiam atrair metal, e observou-se que variando a forma em que as pedras eram aproximadas, elas tinham uma força de atração ou repulsão entre si. Manuscritos da Grécia antiga mencionavam pedras que tinham esse efeito de atração ou repulsão em cidades como *Magnesia ad Syphilum* e *Heraclea*, como também um autor chinês Guanzhong (?-645 A.C.) descreveu rochas que atraíam metais [3]. Quando limalhas de ferro são colocadas sobre um material magnético, como um ímã, elas tendem a se depositar nos locais denominados de polos e evidenciam as linhas de fluxo magnético. Os ímãs são extremamente úteis na descrição dos fenômenos magnéticos, pois auxiliam na quantificação de magnitude de campo magnético e intensidade de magnetização [1].

Um pedaço de ferro será atraído por um ímã mesmo que eles não estejam em contato. Ao aproximar um ímã a uma quantidade de limalha de ferro obtém-se uma visualização das linhas de fluxo magnético convergindo em direção aos polos. Polos diferentes se atraem, enquanto que polos iguais se repelem com uma força que varia inversamente proporcional ao quadrado da distância entre eles [1].

Figura 1 – Efeito do campo magnético de ímãs em limalha de ferro.



Fonte: [1].

2.1.1 Campo magnético

Campos magnéticos são produzidos por correntes elétricas, isso ocorre devido ao deslocamento de cargas elétricas, as quais criam vetores de campo \vec{H} de acordo com a lei de Amperè exibida em seguida na equação (1) [10]. Em 1820, foi descoberto por Hans-Christian Oersted que um fio com corrente elétrica passando por ele produz um campo circular que desvia a direção da ponta de uma bússola próxima ao fio. Pouco tempo depois, Dominique-François Arago e Andrè-Marie Ampère demonstraram que passando corrente em uma bobina, o comportamento dela torna-se igual ao de um ímã. Além disso, esse comportamento da região próxima a um campo magnético foi correlacionado a um fluxo formado por infinitas linhas de indução magnética, descrito por Faraday. Essas linhas atravessam o material magnetizado saindo pelo polo norte para o meio em que se encontra, retornam ao polo sul, e por fim por dentro do material retornam ao polo norte mantendo um ciclo fechado. Se for selecionada uma área perpendicular às linhas de fluxo, as linhas de indução que atravessam essa seção são iguais à densidade de fluxo dessa área, ou seja, o fluxo por unidade de área ou densidade de fluxo magnético representado pelo símbolo B . Michael Faraday também mostrou que forças elétricas e magnéticas poderiam ser geradas por campos elétricos e magnéticos. Esse conceito foi o que levou a descoberta da indução magnética. Foi a partir desses trabalhos experimentais que moveram James Clerk Maxwell's a unir as teorias de magnetismo e eletricidade [1][11].

2.1.2 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell foram, e são essenciais para o entendimento do comportamento eletromagnético. A partir de contribuições de grandes nomes da ciência como Carl Gauss, André Marie Ampère, Michel Faraday, Emil Lenz entre outros, James Clerk Maxwell proporcionou a formação de um grupo de equações que descrevem o comportamento físico das grandezas eletromagnéticas. Com a introdução do conceito de corrente de deslocamento, por Maxwell, e o estudo precursor de análise vetorial feito por Oliver Heaviside, têm-se as equações as chamadas equações de Maxwell (numeração de (1) a (4)). Abaixo, tem-se as equações sob forma local. Com elas, pode-se descrever todas as grandezas eletromagnéticas definidas no espaço e no tempo de um sistema [10].

$$\text{rot}\vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\text{div}\vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\text{rot}\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \quad (3)$$

$$\text{div}\vec{D} = \rho \quad (4)$$

A equação (1) trata da formação do campo magnético devido ao deslocamento de cargas elétricas, como uma corrente passando por um fio condutor, de forma que \vec{H} é o vetor de campo magnético, \vec{J} é o vetor densidade de corrente, \vec{D} é o vetor de indução elétrica. \vec{B} é o vetor de indução magnética, e a segunda equação (2) trata da conservação de campo magnético, também chamada de Lei de Gauss para o magnetismo. A terceira equação, chamada de Lei de Faraday, mostra que a variação de indução magnética pode criar um campo elétrico, onde \vec{E} é o vetor campo elétrico. A equação (4) exibe que o fluxo de campo elétrico tem relação direta com a carga elétrica de um volume observado [10].

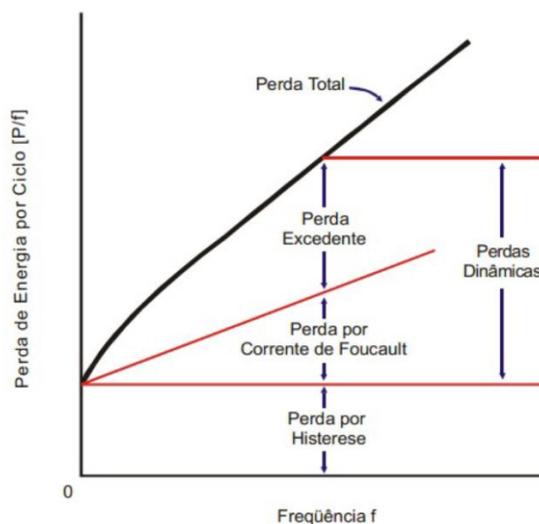
2.2 PERDAS MAGNÉTICAS

O principal objetivo das indústrias que fabricam máquinas elétricas é obter alto desempenho nos equipamentos com baixo custo. Dessa forma, os materiais utilizados na produção dessas máquinas devem possuir características que minimizem as perdas, e consequentemente, aumentem o desempenho. É necessário conhecer através de análise, as perdas que ocorrem nos materiais ferromagnéticos durante a fabricação e operação. De maneira geral, as perdas podem ser divididas em dois grupos: no núcleo magnético e nos condutores. As perdas nos condutores normalmente são chamadas de perdas no cobre, pois é desse material que os enrolamentos de excitação de grande parte dos dispositivos elétricos industriais e comerciais são constituídos. As perdas no núcleo são comumente referidas como perdas no ferro [12]. O modelo usualmente utilizado de perdas magnéticas no material magnético divide-as em três componentes de naturezas distintas: perdas por histerese, perdas por correntes

induzidas ou correntes de Foucault, e perdas excedentes ou anômalas. O aço elétrico do núcleo de máquinas girantes é utilizado de forma laminada com o objetivo de que as correntes induzidas sejam atenuadas, visto que essas estruturas são submetidas a campos variáveis no tempo [3].

Na Figura 2, é apresentado um esquema que mostram curvas de perdas (energia por ciclo) em função da frequência. São expostas as componentes das perdas totais, perdas dinâmicas e por histerese, além de demonstrar a relação das perdas com a frequência de excitação.

Figura 2 – Separação de perdas.



Fonte: [8].

Por norma e por costumes comerciais, as lâminas de aço-silício são identificadas sob um forma de indução (usualmente) senoidal e pelas perdas máximas nos níveis de indução. Os níveis são: induções máximas na região de saturação, de aproximadamente 1,5 T, e/ou próximo ao “joelho” da curva de magnetização, aproximadamente 1 T, em frequências comerciais (50/60 Hz) [9]. Contudo, os dispositivos que fazem uso dessas lâminas, máquinas girantes por exemplo, operam em diferentes regimes de fluxo magnético, como também sob frequências diferentes das comerciais dependendo da situação (operação com inversor de frequência). Por isso, as características de perdas das lâminas são apresentadas no pior caso. No presente trabalho serão utilizadas para teste as chapas de Ferro-Silício E230 de cerca de 0,5 mm de espessura, 300 mm de comprimento e 100 mm de largura².

² Dados das amostras utilizadas nos ensaios da bancada de esforços mecânicos que será detalhada no capítulo 3.

As perdas nesses equipamentos podem ser obtidas através de vários equipamentos. No presente trabalho os aparelhos utilizados foram o Single Sheet Tester (SST) da Brockhaus MPG200 e a bancada de esforços mecânicos desenvolvida por Mailhé [3] e disponível no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) da UFSC.

Para efetuar o cálculo do campo magnético $H(t)$ (5) e da indução no material $B(t)$ (6) a ser analisado, serão necessários os aspectos físicos do núcleo. Ou seja, é preciso conhecer a corrente no enrolamento primário $i_p(t)$, a tensão no secundário $V_s(t)$, a seção magnética efetiva S do caminho magnético médio l_m como também N_p e N_s que correspondem ao número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, respectivamente.

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} \cdot i_p(t) \quad [\text{A/m}] \quad (5)$$

$$B(t) = \frac{1}{N_s \cdot S} \int V_s(t) dt \quad [\text{T}] \quad (6)$$

A partir dos valores de indução em Tesla [T] e Campo Magnético em amperes por metro [A/m] obtidos das equações acima, é possível calcular a magnitude das perdas magnéticas totais no dispositivo em J/m^3 (7.1) ou J/kg (7.2), onde m_v é a densidade específica do material em kg/m^3 . Para fins industriais, é utilizado com frequência o valor de perdas em W/kg , bastando multiplicar pela frequência de teste f (8).

$$W_t = \int_0^B H \cdot dB \quad [\text{J/m}^3] \quad (7.1)$$

$$W_t = \frac{1}{m_v} \int_0^B H \cdot dB \quad [\text{J/kg}] \quad (7.2)$$

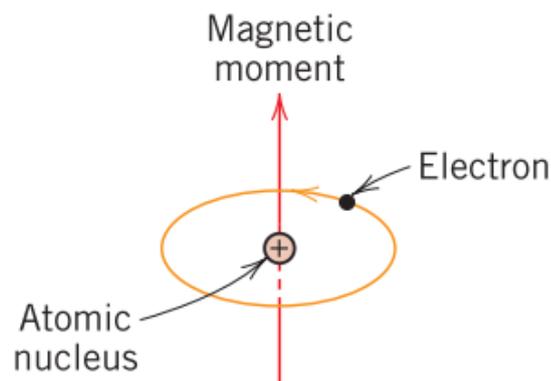
$$P_t = W_t \cdot f \quad [\text{W/kg}] \quad (8)$$

2.2.1 Perdas por histerese

De acordo com a teoria atômica de Rutherford e Bohr, o efeito de rotação de um elétron pertencente a um átomo é semelhante à uma corrente elétrica em forma de anel. Essa corrente

acaba por produzir um campo magnético, segundo a Lei de Ampère (equação (1)), obtendo um momento magnético ou dipolo magnético perpendicular ao plano de rotação [2]. Dessa forma, conclui-se que os materiais possuem internamente campos magnéticos relativamente ordenados, já que são compostos por átomos com seus elétrons girando em torno do núcleo. Apesar do efeito de um único elétron ser mínimo, ao somar os momentos magnéticos de uma infinidade de átomos que formam o material, tem-se o fenômeno da magnetização. As regiões em que os momentos magnéticos estão alinhados são chamadas de domínios magnéticos, enquanto que os limites dessas regiões são denominados paredes dos domínios magnéticos [9]. Na figura 3, é apresentada uma ilustração da rotação de um elétron em relação ao núcleo de seu átomo, o que gera um momento magnético satisfazendo a Lei de Ampère [2].

Figura 3 – Momento Magnético de um Átomo.

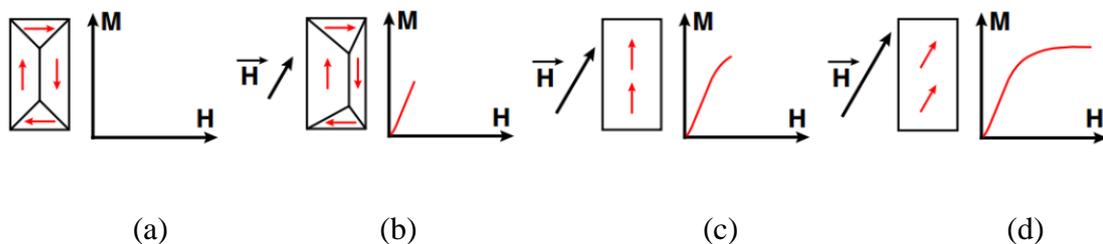


Fonte: [2].

Existem diferentes tipos de classificação em relação às características magnéticas de um material, sendo elas, o diamagnetismo, o paramagnetismo e o ferromagnetismo. Os materiais diamagnéticos ($\mu_r < 1$) apresentam uma forma fraca de magnetismo que só permanece enquanto um campo magnético é aplicado sobre eles (exemplo: cobre). Os materiais paramagnéticos ($\mu_r > 1$) também apresentam uma magnetização fraca, porém eles se alinham preferencialmente com o sentido do campo magnético (exemplo: alumínio), diferente dos diamagnéticos [2]. Como o foco do trabalho é voltado para a análise de materiais ferromagnéticos, os materiais diamagnéticos e ferromagnéticos não serão estudados de maneira aprofundada.

Materiais ferromagnéticos possuem momentos magnéticos permanentes, como também desenvolvem grande magnetização quando excitados por um campo magnético. A figura 4 ilustra os fenômenos de magnetização do material e reorganização dos domínios magnéticos. Na Figura 4(a), tem-se o esquema de um material em seu estado desmagnetizado. Ao excitar este tipo de material com um campo magnético \vec{H} , como por exemplo, de sentido indicado na Figura 4(b), as paredes dos domínios magnéticos sofrem alterações (Figura 4(b) e Figura 4(c)). Quando a excitação se aproxima da região de saturação (Figura 4(d)), começa a ocorrer rotação dos domínios que ainda não estão alinhados com o campo magnético [2][3].

Figura 4 – Processo inicial da curva de magnetização.



Fonte: [13].

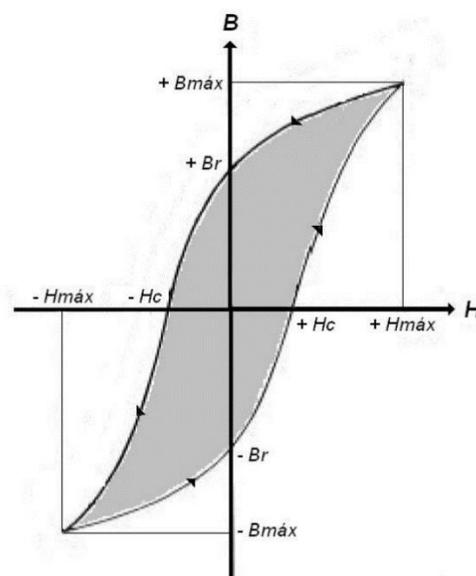
As perdas por histerese estão diretamente relacionadas à energia empregada para deslocar as paredes dos domínios magnéticos. Em lâminas de 0,5 mm de espessura e até aproximadamente 400 Hz, o efeito pelicular de distribuição da indução é desprezível, portanto se o fluxo magnético no interior do material é homogêneo. Para medi-las é mais indicado um regime quase estático, ou seja, com frequência em torno de 1 Hz, por exemplo. Esta técnica é utilizada para reduzir ao máximo as componentes correspondentes às perdas dinâmicas, que são dependentes da frequência [2][4][9].

Analisando sob ponto de vista metalúrgico, as perdas por histerese estão relacionadas com tamanho, volume, orientação dos cristais, distribuição de impurezas, carregamento sofrido pelo material e outras características microestruturais. Isso ocorre, pois as discontinuidades elementares das paredes dos domínios magnéticos dependem das características microestruturais do material [4][9]. Outros fatores que influenciam nas perdas, de maneira geral, são os esforços térmicos e mecânicos que ocorrem durante a produção, carregamento e excitação

dos materiais ferromagnéticos. Esses efeitos são o foco do trabalho e as influências deles serão descritas na seção 2.3.

O ciclo de histerese é um gráfico que representa um ciclo completo de magnetização de um material, e a partir dele é possível inferir informações relevantes sobre as características de materiais ferromagnéticos, inclusive sobre as perdas. A palavra histerese tem sua origem do grego antigo e significa retardo. Materiais ferromagnéticos com propriedades histeréticas têm por definição a capacidade de manter parte da sua magnetização mesmo quando o campo magnético de excitação é extinto. A preservação dessa magnetização residual após o corte do campo de excitação acontece, pois os domínios magnéticos do material sofrem uma penalização energética durante o aumento da excitação H . Isso faz com que os domínios não retornem às suas configurações originais, mantendo um histórico de magnetização. Por isso, o caminho percorrido pela magnetização inicial difere do caminho de desmagnetização. O processo para obter o ciclo de histerese ocorre através de variações na excitação do campo magnético H . Primeiramente o material é excitado até a região de saturação (B_{max} e H_{max}), logo em seguida a amplitude do campo é extinta e os domínios retornam à posição energética mais estável (B_r). A partir desse ponto, é aplicado um campo magnético de sinal contrário ao inicial até a indução magnética chegar a zero, obtendo então o ponto do campo coercitivo ($-H_c$). Depois disso, é repetido o mesmo processo para a orientação de campo magnético ($-H$), concluindo assim o ciclo de histerese exposto pela figura 5 [3][15].

Figura 5 – Ciclo de histerese de um material ferromagnético.

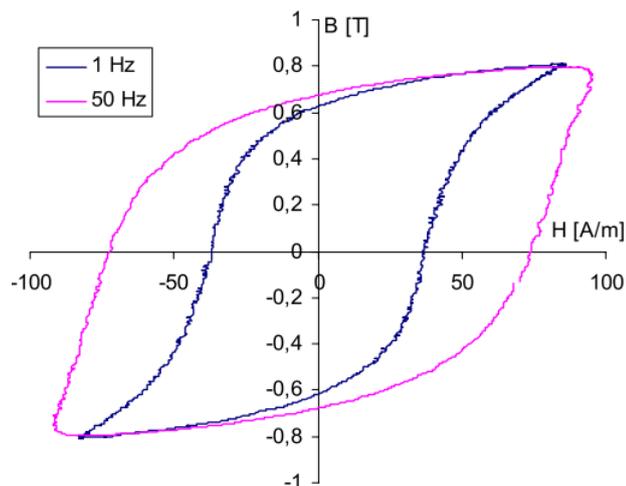


Fonte: [16].

O gráfico do laço BxH exibe a quantidade de energia necessária para elevar a indução de um ponto ao outro. Assim, há relação direta entre as perdas histeréticas de um material com a área do ciclo de histerese. Outro fato importante a ser analisado é o campo magnético coercitivo H_c . O campo coercitivo possui correlação com o tamanho dos grãos do material. Grãos finos implicam em um aumento no número de ligações no material, intensificando a amarração das paredes de domínios, e conseqüentemente, aumentando o H_c . Mas apesar de grãos maiores reduzirem o campo coercitivo, eles também tendem a aumentar as correntes induzidas. Isto ocorre devido ao tamanho dos domínios magnéticos, que aumentam com grãos maiores, tornando o efeito de movimentação das paredes dos domínios mais relevante, o que induz correntes maiores [9].

O gráfico do laço BxH obtido a uma frequência de 1 Hz para o aço silício pode ser chamado de gráfico de histerese, visto que corresponde aproximadamente à perda por histerese, pois o efeito das perdas dinâmicas não é significativo para tal frequência. Já a curva BxH em frequência de operação de máquinas elétricas, como 50 Hz ou 60 Hz, possui perdas dinâmicas consideráveis [4]. Na Figura 6, nota-se a influência das componentes das perdas dinâmicas. Como elas são diretamente proporcionais a frequência, e o laço BxH também possui relação direta com as perdas de um material magnético, observa-se que quanto maior a frequência, maior a forma do laço. Nesta figura, o laço externo refere-se a 50 Hz e o laço interno é o laço de histerese.

Figura 6 - Laços BxH medidos a 1 Hz e 50 Hz.



Fonte: [4].

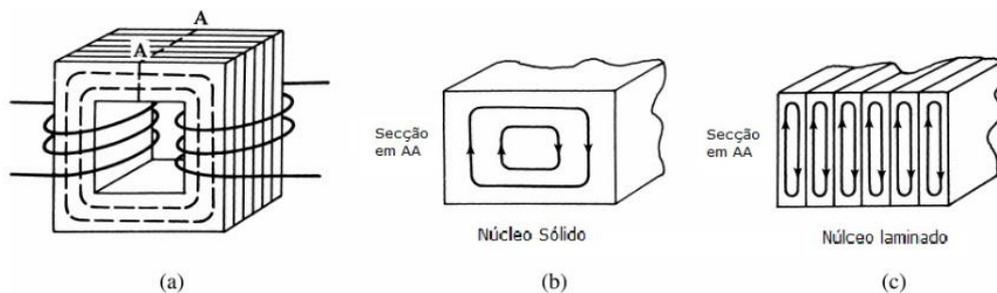
Na seguinte seção, será realizada uma revisão sobre as perdas dinâmicas.

2.2.2 Perdas dinâmicas

A análise das perdas dinâmicas parte da lei de Faraday (equação (3)), que enuncia que a variação de fluxo magnético através de um caminho fechado produz um campo elétrico no material exposto a esse fluxo. Como esse “caminho” no material possui uma condutividade elétrica σ , são formadas correntes induzidas.

Por sua vez, essas correntes induzidas ou correntes de Foucault apresentam perdas, e aquecem o material. Tomando uma lâmina de aço elétrico para análise, aplicando um fluxo paralelo a sua direção, haverá a formação de correntes induzidas no plano perpendicular ao do fluxo magnético. Caso a face da lâmina, na qual as correntes estão sendo induzidas, possua grande área, uma maior quantidade de “caminhos” estarão disponíveis. Dessa forma, será induzida uma maior quantidade de correntes de Foucault, aumentando as perdas. Por isso, os núcleos das máquinas elétricas são formados por várias lâminas, isoladas entre si, e mais finas possíveis. Tem-se um exemplo comparativo entre o surgimento de correntes induzidas em um núcleo maciço e um núcleo laminado na Figura 7. A Figura 7(a) mostra o núcleo completo e o local da seção de corte AA. Observa-se comparando a Figura 7(b) e a Figura 7(c) que a área ou caminho disponível para as correntes induzidas percorrerem é maior no núcleo sólido do que no núcleo laminado.

Figura 7 – Correntes induzidas em Núcleo Sólido X Núcleo Laminado.

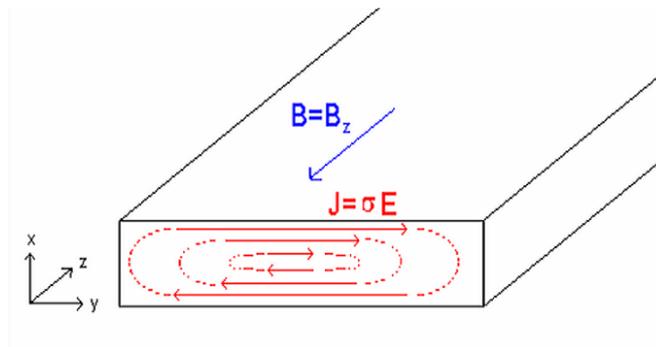


Fonte: [8].

Outro fator que auxilia na redução das perdas dinâmicas é o aumento da resistência do material. Isso pode ser feito pela inserção de silício ao aço, diminuindo a condutividade da lâmina e assim, diminuindo a densidade de corrente.

No caso de uma lâmina de largura y maior que a espessura x (como exemplificado na Figura 8), considera-se que a corrente possua apenas componente y (a componente x é desprezada). Quando a lâmina que é submetida a uma indução magnética B (de direção z indicada em destaque pela seta na cor azul), pode-se chegar à equação de perdas (9) através de manipulações nas fórmulas (3) e (6) [4]. Em (9), T equivale a um período da indução de fluxo magnético, x espessura da lâmina e σ é a condutividade elétrica do material.

Figura 8 – Correntes induzidas na lâmina de aço elétrico.



Fonte: [4].

$$P_f = \frac{\sigma \cdot x^2}{12 \cdot m_v} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad [\text{W/kg}] \quad (9)$$

Neste trabalho, a análise será limitada à indução senoidal pura, desconsiderando as harmônicas. Substituindo $B(t)$ por $B_p \cdot \text{sen}(\omega t)$ e realizando algumas manipulações algébricas, obtém-se as formulações para as perdas P_f (10) e das perdas energéticas W_f (11), onde B_p é a indução de pico. Com estas equações, observa-se a dependência linear das perdas dinâmicas com a frequência e que as perdas por corrente de Foucault são diretamente proporcionais ao quadrado da espessura da chapa ferromagnética x , justificando a laminação dos núcleos de ferro.

$$P_f = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot x)^2}{6 \cdot m_v} \cdot B_p^2 \cdot f^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (10)$$

$$W_f = \frac{\sigma \cdot (\pi \cdot x)^2}{6 \cdot m_v} \cdot B^2 \cdot f \quad [\text{J/kg}] \quad (11)$$

A seguir, será vista uma explicação sobre as perdas excedentes.

2.2.3 Perdas excedentes

As perdas excedentes foram introduzidas ao modelo inicial de separação de perdas (inicialmente considerava-se que as perdas magnéticas no material eram apenas função de duas parcelas: as perdas dinâmicas e as perdas por histerese), pois os valores obtidos em medições realizadas eram diferentes dos estimados pela soma dos valores obtidos com o método clássico de cálculo das perdas dinâmicas e dos valores de perdas por histerese. Por algum tempo, inclusive, esse tipo de perdas foi chamado de perdas anômalas[8]. Hoje, sabe-se que esta parcela de perdas engloba a presença e movimentação dos domínios magnéticos. Ainda que com tantos estudos acerca deste tema, há dificuldade em se mensurar a influência dos domínios magnéticos. Alguns fatores que possuem impacto na estrutura e na movimentação dos domínios magnéticos são o tamanho do grão, condutividade elétrica e campo coercitivo [4][8]. A equação (12) expressa uma aproximação das perdas excedentes em função de um coeficiente k_e , da frequência f e da indução de pico B_p . O coeficiente k_e , é função de um coeficiente de atrito de objetos magnéticos e valor de campo coercitivo. Esta equação permite o cálculo desse tipo de perdas para uma forma de onda de fluxo senoidal [4]. O estudo aprofundado deste tema não será realizado neste trabalho.

$$W_e = k_e \cdot \sqrt{f} \cdot B_p^{1,5} \quad [\text{J/kg}] \quad (12)$$

2.3 ACOPLAMENTO MAGNETOMECAÂNICO

Acoplamento magnetomecânico trata da influência e dependência mútua entre as características mecânicas e magnéticas dos materiais, afetando consideravelmente as propriedades dos materiais ferromagnéticos. Há duas formas gerais de dividí-lo, o acoplamento

magnetoplástico, e o acoplamento magneto elástico. O primeiro ocorre quando o material sofre um carregamento superando a força de escoamento, ou seja, excedendo o limite elástico do material aplicando uma deformação plástica. Esse efeito, o qual ocorre normalmente durante a fabricação dos materiais, não será o foco do trabalho, pois após os processos que deformam de maneira plástica os materiais, as propriedades não “retornam” ao ponto prévio da deformação plástica. Já o acoplamento magnetoelástico acontece em níveis menores de carregamento, abaixo da força de escoamento, e conseqüentemente, abaixo do limite elástico do material [3].

A partir desse conhecimento é possível perceber como um estudo para iniciar a compreensão desses efeitos é importante, visto que muitos equipamentos elétricos fazem uso de chapas ferromagnéticas em sua construção. Estes dispositivos são suscetíveis a ambas formas de acoplamento magnetomecânico, sendo o magnetoplástico mais frequente durante a fabricação da chapa, e o magnetoelástico está presente desde a fabricação e processamento do material até o funcionamento do equipamento elétrico, uma máquina girante, por exemplo. Dessa maneira, avaliar efeitos nas características magnéticas dos materiais pode resultar potencialmente numa forma de prever essas alterações usando métodos numéricos. E com isso reduzir as perdas, e como resultado, melhorar a eficiência de máquinas elétricas. Como os ensaios realizados não tinham como objetivo deformação plástica nos materiais, será discutido mais sobre as influências do acoplamento magnetoelástico.

2.3.1 Acoplamento magnetoelástico e magnetostricção

Como mencionado previamente, o acoplamento magnetoelástico trata da interdependência das propriedades mecânicas e magnéticas de um material acometido por carregamento abaixo do limite elástico. Assim, será discutido como esforços mecânicos afetam em ambas as características histeréticas e não-histeréticas de materiais ferromagnéticos, o que conseqüentemente, resultam em mudanças nas perdas.

Em 1842, foi descoberto por Joule que quando um material é submetido a um campo magnético, suas dimensões se alteram. Este efeito foi chamado de magnetostricção. Essa mudança de dimensões é expressa por λ (13) e representa a deformação do material [8]. A magnetostricção pode ser dividida em duas categorias: magnetostricção direta ou livre e magnetostricção inversa (ou efeito Villari). A magnetostricção direta trata da deformação mecânica espontânea de um material quando submetido a um campo magnético. Enquanto que

magnetostricção inversa é a mudança das propriedades magnéticas de materiais quando acometidos por carregamento ou deformações mecânicas.

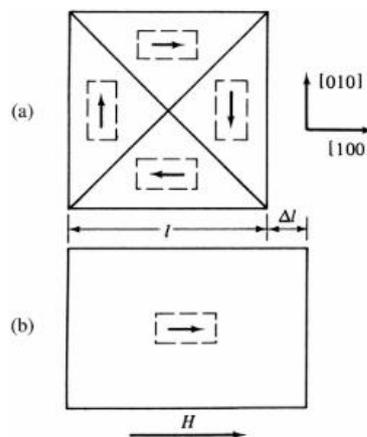
De acordo com as mudanças dimensionais nos materiais, classifica-se a magnetostricção direta como positiva e como negativa. A magnetostricção direta positiva é definida como a tendência desses materiais se estenderem, enquanto que magnetostricção direta negativa é a propensão de se comprimirem quando submetidos a um campo magnético de excitação.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (13)$$

- Se $\lambda > 0$, Magnetostricção Positiva.
- Se $\lambda < 0$, Magnetostricção Negativa.

Na Figura 9, tem-se um esquema de um material com um conjunto de domínios magnéticos desmagnetizados e comprimento inicial l (Figura 9(a)). Após a aplicação de um campo magnético H de sentido $[100]$, possui somente componentes na direção horizontal (Figura 9(b)), o material magnetizado exibe um variação em seu comprimento, no sentido do campo, demonstrando o efeito de magnetostricção direta positiva.

Figura 9 – Efeito de magnetostricção em material ferromagnético.

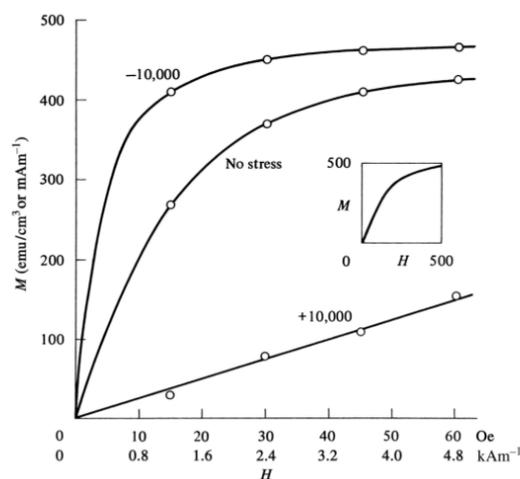


Fonte: [8].

Os efeitos mais relevantes para estudo neste trabalho, são os relativos a magnetostricção inversa. Como mencionado, a magnetostricção inversa aborda as mudanças de propriedades magnéticas, como permeabilidade e perdas magnéticas, em um material acometido por carregamento mecânico. Materiais que apresentam magnetostricção positiva ao longo da direção de magnetização ($\lambda > 0$), quando submetidos a tração paralela ao campo de magnetização, exibem melhora nas propriedades magnéticas. Porém, se submetidos à compressão, eles apresentam maiores perdas e queda de permeabilidade magnética. Já para os materiais que possuem magnetostricção negativa ($\lambda < 0$), o resultado observado quando submetidos a esforços mecânicos é o contrário daqueles com magnetostricção positiva. Nas figuras 10 e 11, tem-se um exemplo do comportamento de uma liga pura de níquel, a qual possui magnetostricção negativa, e do 68-Permalloy, um material magnético mole composto por 68% de níquel e 32% de ferro, que possui magnetostricção positiva.

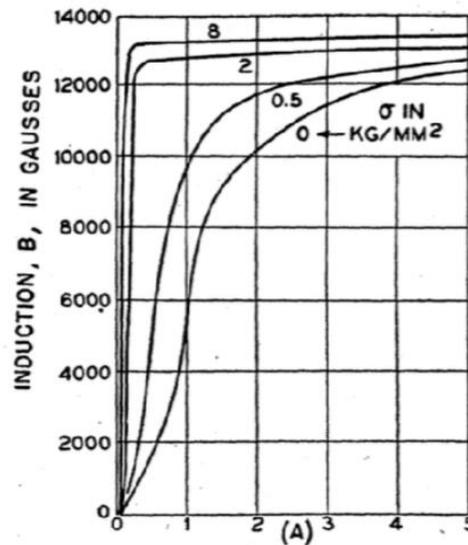
Na Figura 10, é possível notar a melhora das propriedades magnéticas de níquel puro quando submetido a uma tensão de $-10000 \text{ lb/in}^2 \approx -69 \text{ Mpa}$ (compressão), visto que a curva necessita de menor campo para atingir a saturação. Entretanto, quando a amostra é submetida à tração de 69 Mpa , nota-se grande queda nas propriedades magnéticas. Já para o caso do 68-Permalloy (Figura 11), o qual possui magnetostricção positiva, há melhora nas propriedades magnéticas quando a amostra é submetida à tração na direção de magnetização. Isso pode ser visto na Figura 10 para diferentes tensões, de $+0,5 \text{ kg/mm}^2 \approx 5 \text{ Mpa}$ até $+8 \text{ kg/mm}^2 \approx 79 \text{ Mpa}$.

Figura 10 – Efeito do carregamento mecânico na magnetização do Níquel.



Fonte: [3].

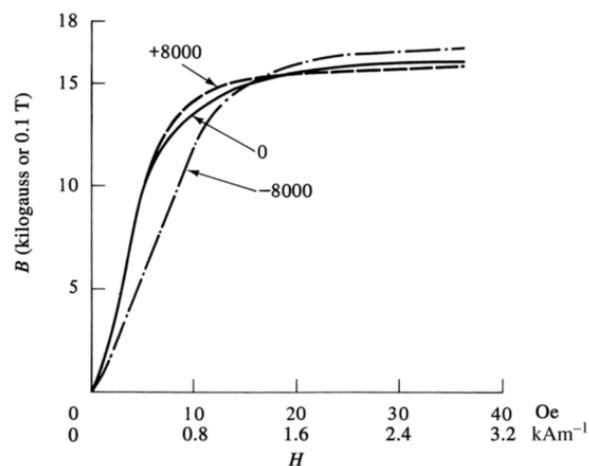
Figura 11 - Efeito do carregamento mecânico na magnetização do 68-Permalloy.



Fonte: [1].

Existem também comportamentos de ligas metálicas que dependem do nível de campo aplicado, como é o caso para uma amostra pura e policristalina de ferro. Este tipo de amostra exibe melhora das propriedades magnéticas, sob tração, até atingir maiores amplitudes de campo. Em maiores valores de campo de excitação, a amostra de ferro tem suas características magnéticas pioradas sob tração. Para o caso da compressão, é evidenciado o comportamento inverso, que pode ser notado na imagem abaixo de ferro puro sob tensões de $\pm 8000 \text{ lb.in}^2 \approx 55 \text{ MPa}$.

Figura 12 – Magnetostricção inversa do ferro puro e policristalino.



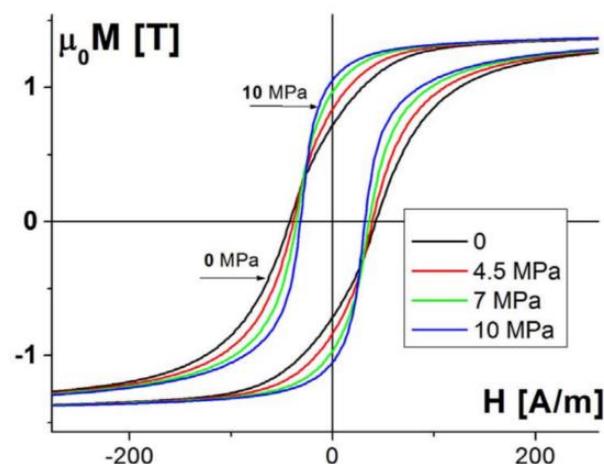
Fonte: [8].

É importante lembrar que o carregamento mecânico não altera a saturação do material em si, visto que essa característica depende das propriedades subatômicas e da temperatura do mesmo. Porém, o que ocorre é a mudança de características como a permeabilidade, que está relacionada com a taxa de magnetização do material. Ou seja, essa alteração resulta na habilidade de um material alcançar a saturação para um campo magnético de valor pequeno (aumento na permeabilidade), assim como pode ser necessário um campo mais forte para atingir a saturação (redução na permeabilidade magnética) [3].

Os esforços mecânicos também possuem influência em outras características dos materiais ferromagnéticos além da permeabilidade. Entre elas, estão as propriedades histeréticas como o campo coercitivo e a indução residual do material. É por causa da alteração dessas características que é possível confirmar o impacto significativo que o carregamento mecânico possui nas perdas histeréticas [3].

Na Figura 13, é apresentado um laço de histerese de Fe-3% sem esforços e sob diferentes níveis de tração. O laço na cor preta indica o caso sem esforços (0 MPa) e o laço na cor azul indica a maior tração aplicada (10 MPa). Para o caso do Fe-3%, material de magnetostricção positiva, espera-se a redução nas perdas quando submetido a trações na direção de excitação de campo. Como o campo coercitivo tem relação direta com as perdas magnéticas, (a Figura 13 exibe uma redução em largura), ou seja, redução no valor de H_c para níveis de tração.

Figura 13 – Curvas de Histerese para Fe-3%Si sob tração.



Fonte: [18].

2.4 ORIGEM DO CARREGAMENTO MECÂNICO NAS CHAPAS DE AÇO ELÉTRICO

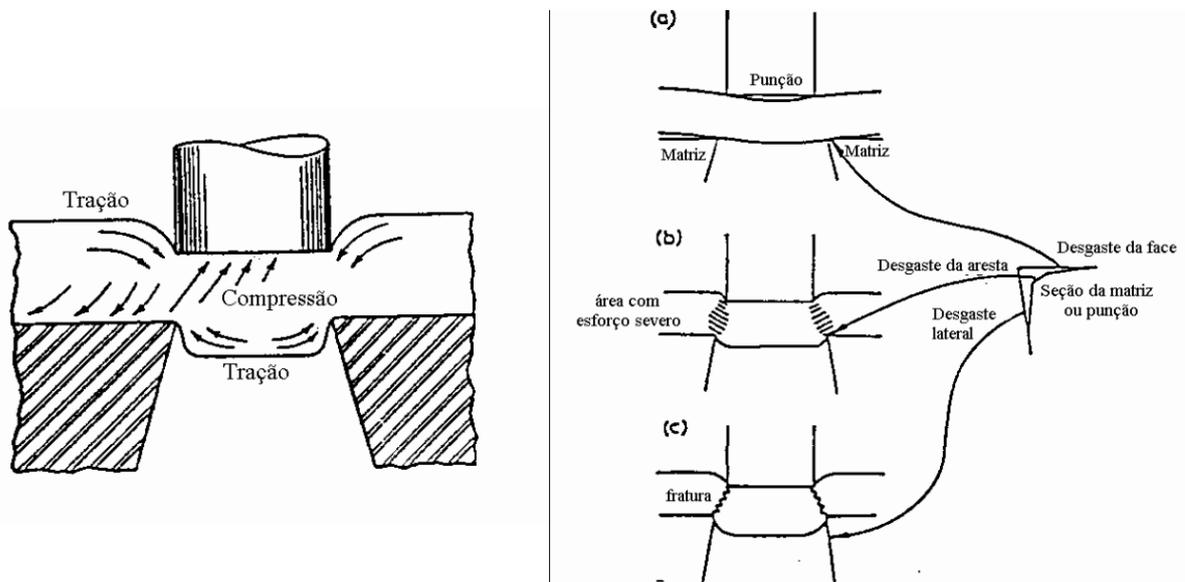
No processo de fabricação das lâminas do núcleo magnético, tanto do rotor como do estator, existem diversas etapas que aplicam esforços mecânicos nas chapas ferromagnéticas. Elas também podem sofrer por esforços mecânicos durante a montagem do pacote de lâminas e até do próprio uso em uma máquina girante por causa de forças aplicadas durante a rotação do rotor, por exemplo. Assim, os esforços mecânicos são classificados em duas categorias: carregamento residual e carregamento aplicado externamente. A seguir, são apresentados diferentes processos efetuados durante a manufatura de lâminas ferromagnéticas.

2.4.1 Laminação e estampagem

A laminação consiste na aplicação de grandes tensões de compressão em um material até obter como resultado uma lâmina com a espessura desejada. Já a estampagem, é o método de corte das lâminas de aço elétrico no desenho desejado (medidas da ranhura, raio da lâmina, coroa do estator e etc.) para posteriormente montagem do pacote. Em ambas as técnicas, as chapas sofrem com carregamento residual ao fim dos processos, visto que eles alteram as microestruturas do material, como tamanho do grão e homogeneidade de grãos na lâmina [3][4].

Na Figura 14 é apresentado um esquema do processo de estampagem de uma lâmina. Observa-se nesta figura, em destaque pela letra (a) que acontece a deformação da chapa pela introdução da ferramenta de corte, em (b) a chapa começa a romper dando início ao corte, e (c) é o ponto em que ocorre a fratura da chapa.

Figura 14 – Processo de estampagem.



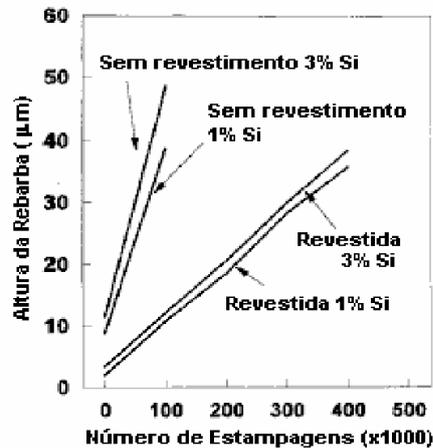
Fonte: [4].

2.4.1.1 Revestimento

Quando o corte é efetuado durante o processo de estampagem, a lâmina passa por três etapas, as quais são: deformação plástica, corte e ruptura. Esse efeito que a ferramenta exerce na chapa acaba por deixar resíduos chamados de rebarbas. Estas saliências provocam uma deterioração da estrutura cristalina dos domínios magnéticos próximos à região de corte. Dessa forma, os domínios magnéticos (ou grãos) deixam de ter uma distribuição homogênea na lâmina e há aumento das perdas por histerese. Uma forma de reduzir a criação de rebarbas no corte da chapa é o revestimento, tanto orgânico quanto inorgânico. Estudos mostraram que a redução de silício na composição do material (elemento adicionado para redução das perdas dinâmicas, pois aumentam a resistividade do material) auxilia na redução da formação de rebarbas[4][17]. A Figura 15 apresenta um gráfico da altura das rebarbas de um material em função do número de estampagens para materiais com 1% e 3% de Si com e sem revestimento. Neste gráfico, nota-se comparando as amostras sem revestimento, que o decremento de silício (de 3% para 1%) resultou em uma diminuição das rebarbas. Por exemplo, em 100 estampagens, com 3% de Si, o material sem revestimento apresentou aproximadamente 50 μm de altura de rebarba, enquanto que para o mesmo número de estampagens, a amostra de 1% teve cerca de 40 μm .

Comparações semelhantes podem ser realizadas com as comparações das curvas das amostras de 3% e 1% com revestimento.

Figura 15 – Altura das rebarbas em função do número de estampagens.



Fonte: [17].

O revestimento de materiais em lâminas ferromagnéticas pode ser classificado em alguns tipos, denominados C-0, C-2, C-3, C-4 e C-5 [4].

- **C-0:** É o tipo de revestimento obtido a partir do tratamento térmico que forma camadas naturais e superficiais de óxidos.
- **C-2:** Trata-se de uma camada de isolamento inorgânica formada durante o temperamento hidrogenado em altas temperaturas do aço-silício de grão orientado. Resultado da aplicação de silicato e MgO na superfície do aço.
- **C-3:** É uma isolamento inorgânica de verniz ou esmalte. Este tipo de revestimento é perdido durante o tratamento térmico.
- **C-4:** Para superfícies de lâminas que necessitam de elevada resistência de isolamento, é utilizado este tipo de revestimento. Ele consiste em um tratamento químico ou aplicação de superfície de fosfato.
- **C-5:** Similar a C-4, mas possui enchimentos de cerâmica para aumentar a resistência interlaminar. Normalmente aplicada sobre C-2 em aços de grão orientado.

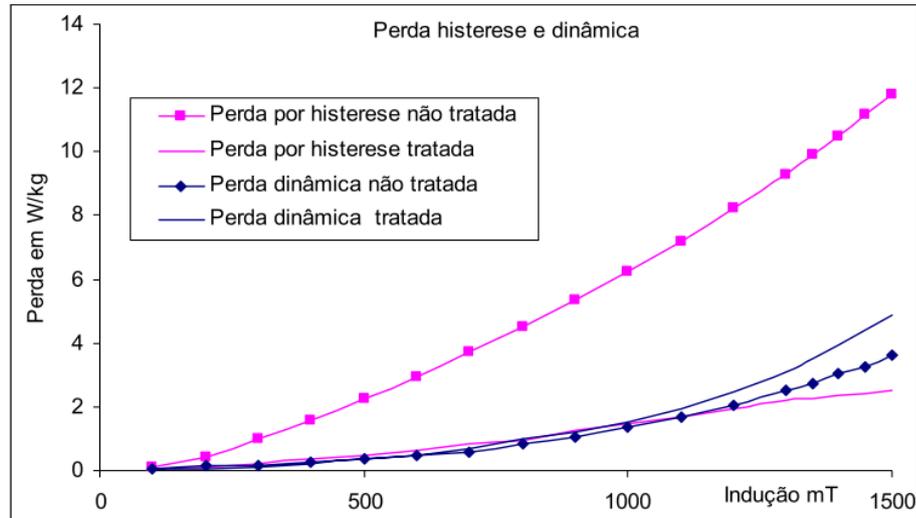
2.4.2 Tratamento térmico

O tratamento térmico é um método utilizado para minimizar os esforços residuais durante a fabricação de uma lâmina de aço elétrico. O aço elétrico que recebe este tratamento térmico, também chamado de recozimento, é dito como aço totalmente processado. Já o aço elétrico que não recebe o recozimento no fim da fabricação é denominado de aço semiprocessado. Levando em conta os efeitos que o tratamento térmico aplica no aço elétrico, tem-se: alívio de tensões residuais (introduzidas pela laminação e estampagem), recristalização, redução do teor de carbono, crescimento do grão (reduz amarração das paredes dos domínios e forma a camada superficial dielétrica (revestimento **C-0** ou azulamento)). Ou seja, a função principal do recozimento é o alívio de tensões, principalmente aquelas introduzidas pelo corte, ou processo de estampagem, do material [4].

A Figura 16 mostra uma comparação de valores de perdas magnéticas (curvas de perdas em função da indução magnética) em duas amostras, uma em que foi realizado o processo de alívio térmico de tensões e outra sem este procedimento. Observa-se que o tratamento térmico tem influência significativa nos valores de perdas magnéticas, principalmente nas perdas por histerese. A curva com maiores valores de perdas (curva na cor rosa com quadrados) refere-se às perdas por histerese da amostra sem alívio térmico e as curvas com menores valores (curva na cor rosa contínua) indicam as perdas por histerese na amostra com alívio. O efeito contrário (aumento das perdas dinâmicas do material após o tratamento térmico) pode ser observado através das curvas azul com losangos (sem tratamento) e azul contínua (com tratamento). Mas (apesar de não estar exposta nesse gráfico), conclui-se que as perdas globais do material (perdas dinâmicas mais perdas por histerese)³ diminuem com o tratamento térmico.

³ Conceitos de separação de perdas serão vistos mais adiante.

Figura 16 – Diferença nas perdas em lâminas com e sem alívio térmico de tensões.



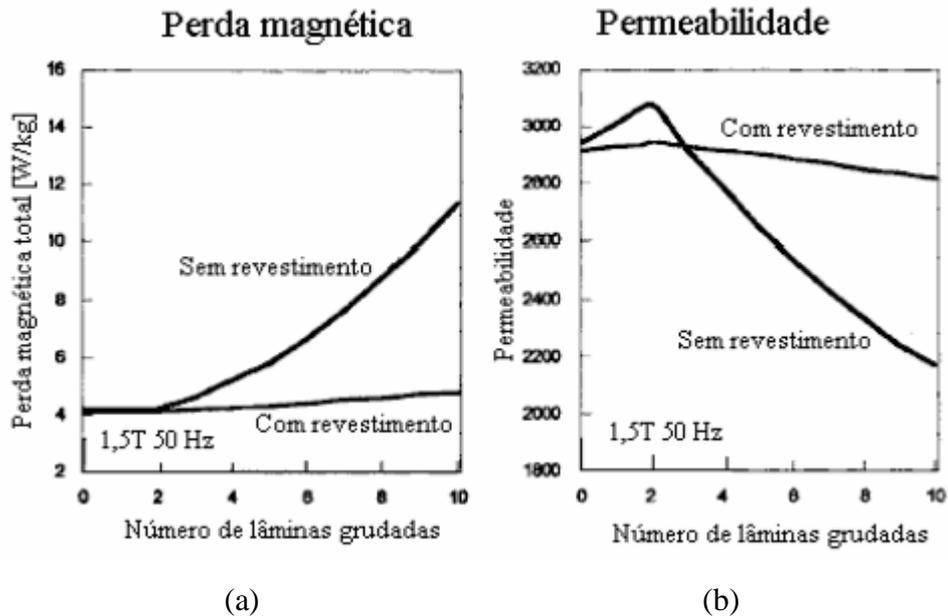
Fonte: [4].

Por modificar a estrutura dos grãos magnéticos o tratamento é de suma importância na redução das perdas por histerese do material. Porém, ele deve ser realizado em um ambiente controlado, e também são necessários conhecimentos de termodinâmica, química e metalurgia para executá-lo de maneira correta. Isso porque existem diferentes métodos de aquecimento e de resfriamento do material, e se mal executados (esfriar muito rapidamente ou esquentar demais o material) poderiam acarretar resultados opostos aos esperados [3][4].

No processo de montagem de um pacote de lâminas para o estator de um motor, também são aplicadas tensões que podem impactar em carregamento residual no material. Dessa forma, também é comum o tratamento térmico no pacote formado pelas chapas de aço elétrico. Apesar deste processo reduzir o carregamento residual na montagem das lâminas, pode acontecer o efeito de soldagem intralaminar ou “*stick together*”. Este efeito surge quando o recozimento desgasta o isolamento entre lâminas criando micro-soldas. As micro-soldas aumentam os caminhos para as correntes induzidas no núcleo, pois curto-circuitam as lâminas, e conseqüentemente, aumentam as perdas dinâmicas. Por isso, é necessário ter um bom controle no tratamento térmico. A Figura 17 apresenta curvas de perdas (Figura 17(a)) e de permeabilidade (Figura 17(b)) magnéticas de materiais com e sem revestimento em função do número de lâminas acometidas pelo efeito “*stick together*”. Na Figura 17(a), observa-se que as perdas magnéticas com revestimento não sofreram mudanças significativas (com relação ao material sem revestimento) mesmo com um aumento no número de lâminas grudadas. Na

Figura 17(b), nota-se que a partir de três lâminas que sofreram por efeito de microsoldas, a permeabilidade sofre uma queda significativa para lâminas sem revestimento [4][17].

Figura 17 – Influência das micro-soldas no pacote de um estator.



Fonte: [17].

2.4.3 Montagem do núcleo magnético

Após os processos de fabricação, modelagem e tratamento das lâminas ferromagnéticas, é necessária a junção delas para a formação de um núcleo magnético de uma máquina girante. Existem diversos tipos de processos para a montagem de um pacote de lâminas, como grampeamento, soldagem, colagem, prensagem e aparafusamento. Todos esses métodos podem ser fontes de esforços externos, sejam eles de origem plástica ou elástica, causando impactos nas propriedades magnéticas do conjunto. Uma solução para reduzir o efeito dos esforços aplicados durante a montagem do núcleo magnético é o tratamento térmico ou recozimento. Porém, como mencionado previamente, ele também pode impactar na criação de micro-soldas no pacote, que aumentam as correntes induzidas. Portanto, para a seleção do tipo de montagem é necessário ter bom conhecimento do processo para minimizar os esforços aplicados ao pacote. E caso seja de interesse aplicar um tratamento térmico, é preciso ter bom controle da atmosfera do processo e também ter aplicado o revestimento que crie a menor quantidade possível de micro-soldas, reduzindo o curto-circuito interlaminar.

3 METODOLOGIA E EQUIPAMENTOS

Os ensaios deste trabalho foram realizados em lâminas de Fe-Si E230 com e sem alívio térmico, e laminação na direção longitudinal. As bancadas utilizadas para medição das características magnéticas foram o *Single Sheet Tester*, da bancada Brockhaus MPG200⁴, e a bancada de esforços mecânicos desenvolvida no GRUCAD [3]. Foram comparadas amostras com alívio térmico e sem alívio térmico ensaiadas nas duas bancadas, para o caso sem esforços mecânicos. As chapas utilizadas em cada uma das bancadas possuíam dimensões diferentes, devido aos equipamentos serem diferentes. Apesar de as amostras não serem as mesmas, e do cálculo do campo magnético ser diferente nas duas bancadas (na Brockhaus, o campo magnético é calculado de maneira indireta, através da medição de correntes e na bancada de esforços mecânicos o campo magnético é calculado de maneira direta, através da extrapolação do campo magnético obtido pela medição de tensão em três sensores bobina-H [3] próximos à lâmina), espera-se que os valores para lâminas em condições iguais de ensaio sejam semelhantes. Outro fator que influencia nos resultados obtidos é a condição em que a lâmina se encontra, se está muito oxidada ou enferrujada, como também se já passou por muitos esforços mecânicos deixando o material fatigado.

A seguir será discorrido de maneira mais detalhada sobre as duas bancadas utilizadas nos ensaios, assim como os procedimentos executados e as decisões tomadas em relação aos testes das chapas de Fe-Si.

3.1 BROCKHAUS MPG200

Um dos equipamentos utilizados para efetuar os ensaios sem esforços mecânicos e obter as características magnéticas das amostras, para serem posteriormente comparadas com os resultados da bancada de esforços mecânicos, foi o *Single Sheet Tester* (SST) da bancada Brockhaus MPG200. O SST segue padrões definidos pela norma IEC 60404-3 e é utilizado para testes, como o nome já diz, em uma única lâmina de aço elétrico. Inserindo a lâmina o circuito magnético é fechado pelo próprio SST, que possui um núcleo interno (*duplo-yoke*), como também uma bobina de excitação e outra de medição. É necessário inserir os dados físicos

⁴ Bancada disponível no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD).

da amostra (seção transversal, densidade e peso), com uma boa precisão [19]. Na Figura 18, é apresentada uma foto do SST da Brockhaus.

Figura 18 – Single Sheet Tester da máquina Brockhaus MPG200.



Fonte: do Autor.

A Brockhaus-MPG200 pode operar numa grande faixa de frequência dependendo do equipamento utilizado (de 3 Hz até 20 kHz).

3.2 BANCADA DE ESFORÇOS MECÂNICOS

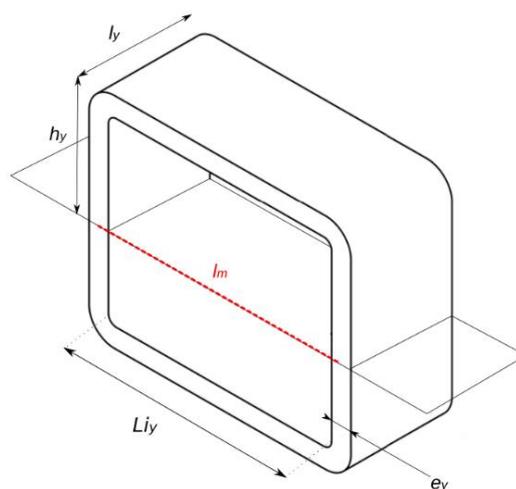
Para avaliar os impactos de esforços mecânicos nas propriedades magnéticas de lâminas de Fe-Si, foi utilizada uma bancada experimental [3] em que é possível realizar a imposição de esforços mecânicos uniaxiais e controle da indução magnética na chapa. O funcionamento da imposição da excitação e controle da forma de onda do fluxo magnético é baseado em um inversor para gerar a excitação em um *Single Sheet Tester* modificado, juntamente com um controle analógico não linear em malha fechada. Esse sistema de controle, baseado na teoria dos modos deslizantes, permite que a partir de uma referência definida pelo usuário, seja possível obter o valor da tensão controlada no enrolamento do secundário do dispositivo. A realização do controle e da excitação utilizada na bancada de esforços mecânicos foi desenvolvida por Batistela [14]. A bancada de excitação e controle faz o controle da excitação por meio da tensão induzida no secundário, como recomendado por padrões internacionais, ao invés de realizar o controle pela corrente imposta no primário. Ela permite que a amplitude e a forma de onda da indução sejam impostas pelo usuário por uma tensão de

referência V_{ref} . O sinal é gerado por um instrumento virtual ou VI (*Virtual Instrument*) criado no software LabVIEW, e nele são definidas as características transmitidas para a malha de controle. Depois, a informação é transmitida do *software* para o *hardware*, e vice e versa, por uma placa da *National Instruments*. Dessa forma, o erro entre a tensão induzida no secundário v_{ind} e a tensão de referência v_{ref} é calculado, e a corrente de magnetização do primário I_p é aplicada de maneira a reduzir o erro entre os dois sinais de tensão.

A imposição dos esforços mecânicos na amostra é realizada através de um equipamento de tração/compressão universal (Mecmesin 2500 N) que aplica forças unidirecionais de até 2500 N. Este equipamento está acoplado ao SST modificado (composto por dois *yokes* em formato C) em que a amostra é inserida e estão três sensores bobina-H de campo magnético localizados em distâncias diferentes das lâmina [3]. Nos ensaios em que se realiza imposição de tensões de compressão, existe a possibilidade de ocorrer flambagem da lâmina, por isso, a lâmina é inserida dentro de uma “caixa” anti-flambagem desenvolvido por Mailhé [3].

A Figura 19 exibe o circuito magnético do SST da bancada de esforços mecânicos e seu caminho magnético médio l_m , os quais foram adequados para atingir padrões internacionais de construção de SST's e na precisão das medidas (ASTM, 2015; IEC, 2010; JIS, 2015). Também foi projetado para funcionar em campos magnéticos de baixa intensidade e para minimizar as perdas e não linearidades do material [3].

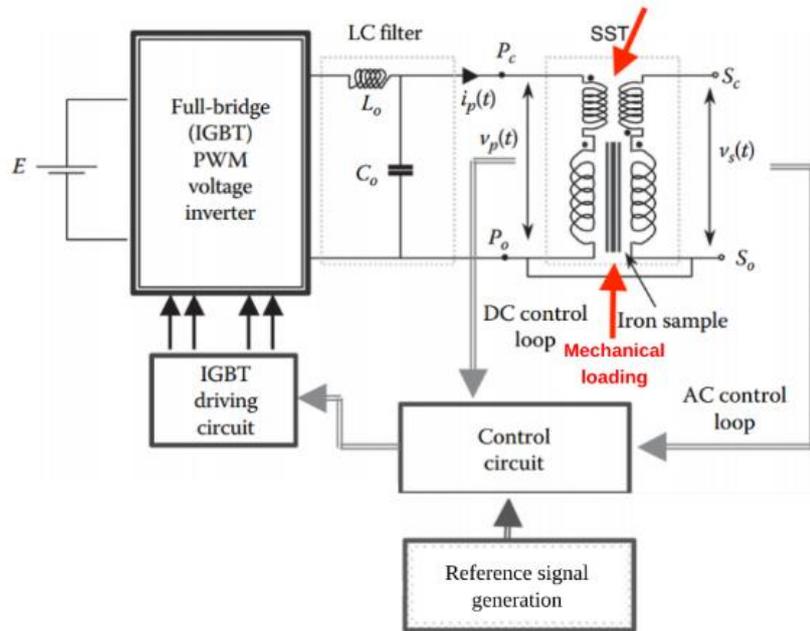
Figura 19 – Circuito magnético da bancada de esforços mecânicos.



Fonte: [3].

Na Figura 20, tem-se o diagrama experimental da bancada de esforços mecânicos. Nesta figura, são exibidos em blocos os componentes principais da bancada, o inversor de frequência, o SST, o controle de circuito e o gerador do sinal de referência v_{ref} para controlar a tensão do secundário.

Figura 20 – Diagrama da bancada de esforços mecânicos.



Fonte: [3].

Para analisar as propriedades magnéticas de um material é preciso obter duas grandezas principais, o campo magnético percebido pela amostra \vec{H} e a resposta dela a essa excitação \vec{B} . A partir dessas grandezas é possível descrever o comportamento magnético do material. A obtenção do valor de indução é calculada a partir da tensão medida v_{ind} pelo sensor indutivo (enrolamento secundário) aplicada na equação (14). A forma de onda senoidal da tensão induzida é verificada pelo fator de forma de onda que para uma onda senoidal é igual a $\frac{\pi}{2\sqrt{2}} \approx 1,1107$ [3].

$$B(t) = -\frac{1}{N_s \cdot S} \int_0^t v_{ind}(t') dt' \quad (14)$$

No VI de tratamento utilizado, o campo magnético é calculado através do método direto e indireto. O método indireto mede de forma global o campo magnético e depende da

corrente de magnetização do enrolamento primário (equação (15)) [3]. Os valores de campo magnético obtidos indiretamente são calculados apenas para comparações, não sendo utilizados nos resultados deste trabalho.

$$H(t) = \frac{N_P}{l_m} \cdot i_P(t) \quad (15)$$

O método direto mede o valor do campo magnético de maneira local. Ele é realizado através da medição da tensão nos enrolamentos ou bobinas-H (equação (16)), na qual o valor de v_H é a tensão induzida nos terminais do sensor, N_H é o número de voltas da bobina H e S_H é a seção média da bobina [3]. A partir de (16), pode-se chegar na equação do campo magnético $H(t)$ (17). Os valores de campo magnético são calculados nas três bobinas-H dispostas próximas à lâmina (três posições distintas) e o campo magnético na superfície da lâmina é calculado através da extrapolação desses três valores. Os valores de campo magnético extrapolados são utilizados nas comparações realizadas neste trabalho.⁵

$$v_H(t) = -N_H \cdot \mu_0 \cdot S_H \frac{dH(t)}{dt} \quad (16)$$

$$H(t) = -\frac{1}{N_H \cdot \mu_0 \cdot S_H} \int_0^t v_H(t') dt' \quad (17)$$

Para adquirir os dados necessários, tensão do secundário e corrente do primário, e efetuar os cálculos descritos acima, foram adquiridas as tensões nas três bobinas-H, após passarem por um sistema de amplificação de tensão (de 1035 vezes) e filtragem⁶, uma ponteira de corrente da Tektronix modelo A622, uma placa de aquisição de sinais (NI-6212) e por fim, dois instrumentos virtuais no LabVIEW (um de aquisição e outro de tratamento de dados). O VI de aquisição permite o registro de 5 períodos dos sinais, além de salvar os dados obtidos em arquivo de texto. Os valores adquiridos consistem na corrente de excitação, tensão do secundário e nas tensões dos três sensores de campo magnético). A partir dos dados adquiridos, realizam-se os cálculos desejados no VI de tratamento. Dentre outras operações, neste VI,

⁵ Análises mais detalhadas sobre a metodologia de extrapolação do campo magnético nesta bancada podem ser encontrados em [3].

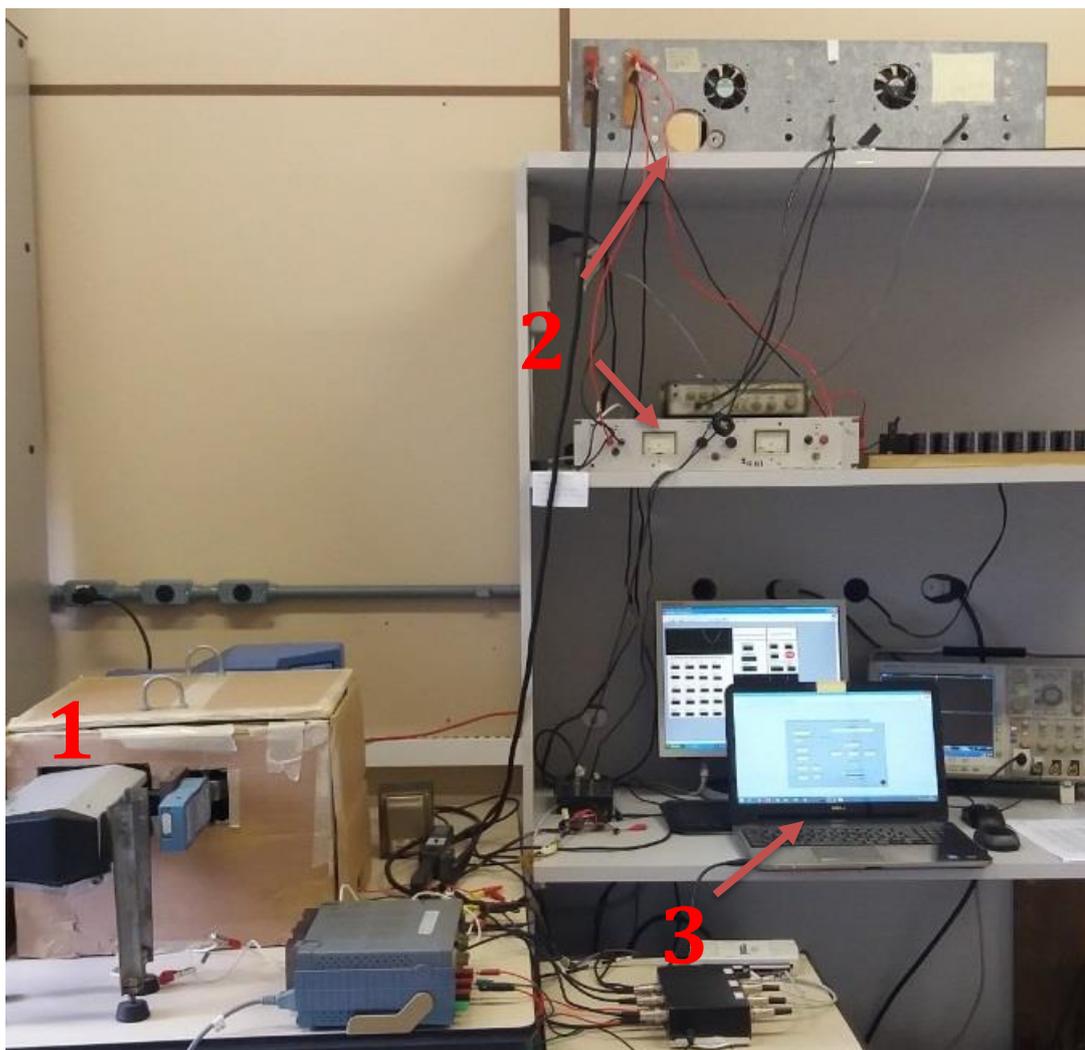
⁶ Os diagramas das placas de amplificação e filtragem utilizadas podem ser encontradas em [3].

realizam-se os cálculos de (14), (15) e (17) , a extrapolação do campo magnético a partir dos valores de campo magnético nos três sensores, assim como o cálculo de perdas e permeabilidade equação (18). Na equação da permeabilidade são utilizados os valores de pico da indução magnética B_p e do campo magnético H_p , como também a permeabilidade magnética no vácuo μ_0 ($4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m). Por último, o usuário pode exportar os arquivos com os resultados.

$$\mu_r = \frac{B_p}{H_p * \mu_0} \quad (18)$$

Na Figura 21, é apresentada uma foto da bancada de esforços mecânicos. Nesta figura, o número 1 indica a máquina Mecmesin com o SST onde são aplicados os esforços. O número 2 exibe o inversor que faz o controle e excitação da bancada e o número 3 a amplificação e aquisição de dados.

Figura 21 – Bancada de esforços mecânicos.



Fonte: Cortesia de Indira P. C. da Silva.

3.3 PROCEDIMENTO DE ENSAIOS NA BANCADA

A partir do uso da bancada de esforços mecânicos é possível obter valores de perdas e permeabilidade para quantizar o efeito de magnetostricção inversa ou efeito de Villari das chapas de aço elétrico. Os ensaios foram realizados utilizando tensão mecânica constante ao longo das medições e seguem nas próximas seções os procedimentos.

3.3.1 Preparação e montagem da bancada

Para poder iniciar os testes é necessário realizar várias medições nas características dimensionais das lâminas como peso, seção transversal e comprimento, de forma que a média desses valores seja usada posteriormente durante a aquisição de dados. Depois, é necessário escolher as condições do teste, frequência e nível de carregamento mecânico, além de calcular a tensão de referência v_{ref} que será utilizada para controlar a tensão induzida no secundário v_{ind} . Após esses procedimentos de preparação, é necessária a montagem da bancada com a amostra escolhida. Primeiro, a lâmina é colocada na “caixa” anti-flambagem, em seguida, esse conjunto é posicionado nas prensas da máquina de tração/compressão. Com a montagem pronta, são feitas as conexões dos sensores na placa de aquisição, secundário é conectado no malha de controle, e o primário na bancada que faz a excitação do sistema. Caso o ensaio seja com aplicação de tensão mecânica, ela já é aplicada logo após a conexão dos sensores.

Os ensaios realizados na bancada com o intuito de observar os efeitos de esforços mecânicos nas propriedades magnéticas das chapas de aço elétrico foram feitos nas frequências elétricas e tensões mecânicas apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Tensões mecânicas e frequências elétricas de ensaios.

Frequência (Hz)	Tensões (MPa)			
	Compressão e Tração			
1	0	5	10	20
10	0	5	10	20
50	0	5	10	20
100	0	5	10	20

3.3.2 Acionamento da bancada e aquisição de dados

A bancada é ligada acionando o controle por modos deslizantes. Em seguida, liga-se o gerador de sinais, o qual gera o sinal de referência para a comutação das chaves do inversor. Depois o computador com o VI que controla o sinal de referência e coleta os dados dos sensores é acionado. E por último a fonte que fornece a tensão para o barramento de tensão contínua do inversor da bancada é ligada.

Para adquirir os dados, é feita uma desmagnetização da amostra para evitar que possua alguma indução residual o que pode influenciar nos resultados obtidos. Dessa forma, a indução é elevada até um ponto próximo à saturação do material ou ao limite em que a bancada ainda consegue efetuar o controle da tensão induzida no secundário. Ao chegar nesse ponto, começa o processo de redução da indução em passos discretizados para desmagnetizar o material, feito através do ajuste da tensão de referência v_{ref} . Feita a desmagnetização é possível iniciar o teste em busca das medições. Novamente, a indução é elevada até o nível próximo da saturação do material ou limite da bancada, e a partir daí, os dados são gravados em passos de 50 mT pelo VI de aquisição. Através do VI de aquisição de dados, os pontos obtidos são avaliados e registrados quando for necessário. E, por fim, quando o material chega a uma indução próxima a zero, a bancada é desligada.

Caso seja de interesse do usuário efetuar um novo teste em outra frequência ou nova tensão mecânica, é preciso que ele execute novamente todos os passos desde o ponto de ligar a bancada até a desmagnetização do material.

Na Tabela 2, são apresentados os níveis de indução mínimos e máximos obtidos durante os ensaios da amostra sem alívio térmico ($B_{Smín}$ e $B_{Smáx}$) e da amostra com alívio térmico ($B_{Cmín}$ e $B_{Cmáx}$) do fabricante B.

Tabela 2 – Induções máximas e mínimas nos ensaios.

Níveis de induções nos ensaios					
	Frequência (Hz)	B _S mín (mT)	B _S máx (mT)	B _C mín (mT)	B _C máx (mT)
Compressão 20 Mpa	1	50	1400	50	1400
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	950	50	1000
Compressão 10 Mpa	1	50	1475	50	1475
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1000	50	1050
Compressão 5 Mpa	1	50	1500	50	1500
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1040	50	1050
Sem Carregamento Mecânico	1	50	1500	50	1500
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1050	50	1050
Tração 5 Mpa	1	50	1500	50	1500
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1050	50	1050
Tração 10 Mpa	1	50	1500	50	1500
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1050	50	1050
Tração 20 Mpa	1	50	1500	50	1500
	10	50	1400	50	1400
	50	50	1200	50	1200
	100	50	1050	50	1050

Na Tabela 3, são apresentados os deslocamentos aplicados pelo equipamento de tração/compressão universal quando ensaiada a amostra do fabricante B, com e sem alívio térmico, quando submetidas às tensões de ensaio (5 MPa, 10 MPa e 20 MPa) tanto em tração quando em compressão.

Tabela 3 – Variação do comprimento sob esforços mecânicos.

Tensões (MPa)	Amostra COM Alívio Térmico		Amostra SEM Alívio Térmico	
	Tração	Compressão	Tração	Compressão
	ΔL (mm)		ΔL (mm)	
5	0,32	0,91	0,27	0,83
10	0,6	1,22	0,52	1,16
20	1,22	1,91	1,11	1,91

Na próxima seção, são apresentadas as características das amostras ensaiadas.

3.4 AMOSTRA DE FE-SI

Para realização dos ensaios, foram escolhidas amostras de Fe-Si E230 de grão não orientado (GNO) de dois fabricantes (A e B) com alívio e sem alívio.

Os dados dimensionais das amostras (peso, seção transversal, comprimento e densidade) ensaiadas na bancada de esforços mecânicos estão expostos na Tabela 4. Foram testadas duas amostras sem alívio térmico de tensões do fabricante A e duas amostras, uma com alívio e outra sem, do fabricante B:

Tabela 4 – Dados construtivos das amostras testadas.

	Fabricante A E230 Sem Alívio Térmico (1)	Fabricante A E230 Sem Alívio Térmico (2)
Peso (g)	124,57	122,10
Seção Transversal (mm²)	50,93	52,09
Comprimento (mm)	300	300
Densidade (kg/m³)	8152	7814
	Fabricante B E230 Sem Alívio Térmico	Fabricante B E230 Com Alívio Térmico
Peso (g)	115,89	116,74
Seção Transversal (mm²)	49,75	51,75
Comprimento (mm)	300	300
Densidade (kg/m³)	7765	7519

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

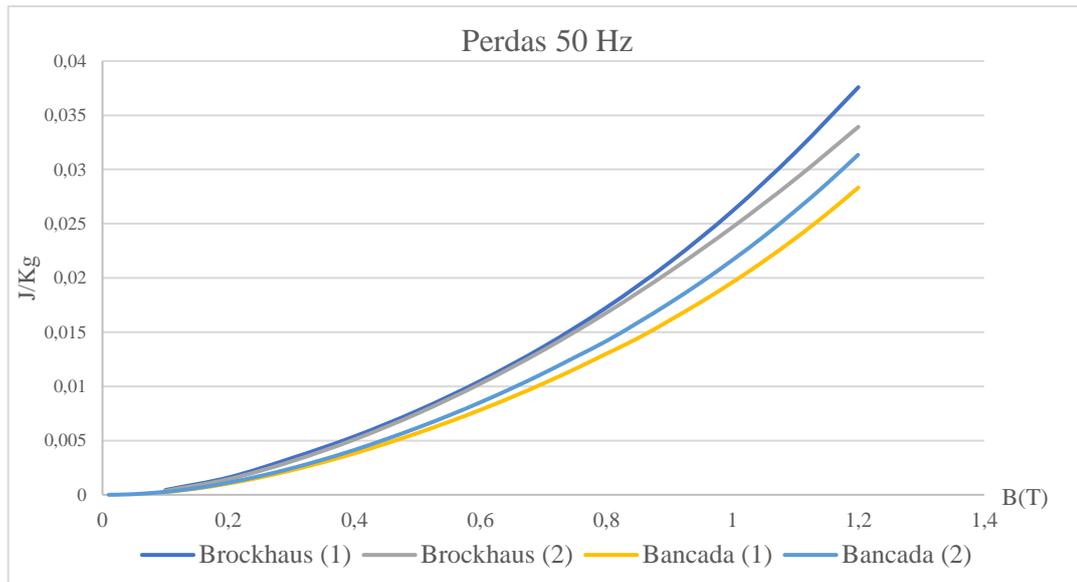
A fim de analisar e comparar as propriedades magnéticas das amostras de Fe-Si com e sem alívio térmico quando submetidas a esforços mecânicos, foram ensaiadas amostras de dois fabricantes (denominadas A e B).

Inicialmente foram ensaiadas as chapas de aço elétrico do fabricante A E230 sem alívio térmico. Esta amostra foi escolhida, pois já haviam sido realizados ensaios neste tipo de amostra com alívio térmico no desenvolvimento de um mestrado em andamento no GRUCAD e seriam utilizadas para comparar os resultados.

Definida a amostra E230A, realizaram-se ensaios sem esforços mecânicos no SST da Brockhaus e na bancada de esforços mecânicos a fim de validar os resultados obtidos com a bancada de esforços mecânicos. Em um primeiro momento, realizaram-se ensaios em uma amostra sem alívio térmico na Brockhaus e em uma amostra na bancada de esforços e compararam-se as curvas de perdas magnéticas a 50 Hz. Os resultados foram divergentes (vide Figura 22, curva azul escuro – ensaio na Brockhaus – e curva amarela – ensaio na bancada) As diferenças relativas entre as duas curvas de perdas mencionadas foram na faixa de 25%. A fim de investigar se a variação encontrada entre os ensaios das duas bancadas (para uma amostra de mesmo material – E230A sem alívio) foram resultados de divergências provenientes das realizações dos ensaios/bancadas ou de diferenças das próprias amostras, repetiu-se o procedimento de ensaios em mais uma amostra na Brockhaus (Brockhaus (2)) e em mais uma amostra na bancada de esforços (bancada (2)). As curvas de perdas do segundo conjunto de ensaios (na Brockhaus e na bancada) são apresentadas na Figura 22 nas cores cinza e azul claro, respectivamente. Observa-se que os conjuntos de ensaios realizados na Brockhaus continuaram bastante divergentes do conjunto de ensaios na bancada. Os dois ensaios na Brockhaus também apresentaram diferenças (até 10%) a partir de 0,8 T (curvas azul escuro e cinza) bem como os dois ensaios na bancada, onde as diferenças foram de até 11% a partir de 0,4 T (curvas nas cores azul clara e amarela).

Um dos motivos para as diferenças encontradas pode ser que as amostras sofreram fadiga devido a carregamento e/ou deterioração por oxidação das lâminas de Fe-Si. Ou ainda, as diferenças podem ser ocasionadas por fatores dimensionais, nota-se a diferença de densidade das amostras (Tabela 4), que derivam de deformações plásticas já ocorridas nas amostras.

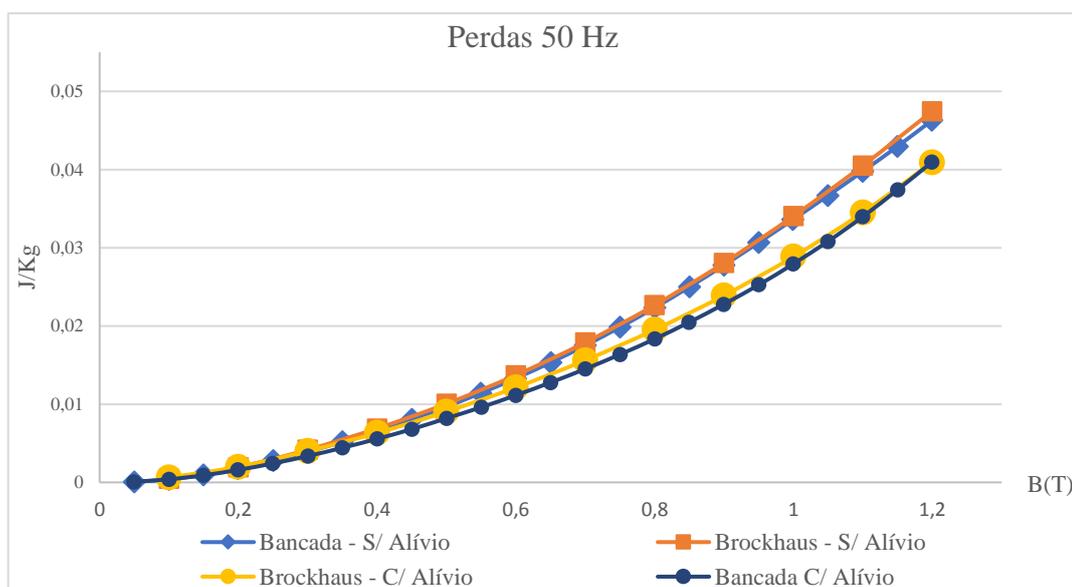
Figura 22 – Ensaio fabricante A E230 sem alívio de tensões em 50 Hz.



Fonte: do Autor.

Devido variação encontrada entre ensaios de diferentes amostras (E230A sem alívio) em uma mesma bancada de medição, decidiu-se investigar se essas diferenças seriam por as amostras serem muito distintas (o que dificulta uma avaliação comparativa com outros resultados). Por isso, escolheram-se amostras sem alívio térmico e com alívio térmico do tipo E230 da fabricante B e realizaram-se novos ensaios (em 0 MPa) na Brockhaus e na bancada de esforços mecânicos. Na Figura 23, são apresentados resultados comparativos de curvas de perdas magnéticas entre uma amostra E230B sem alívio ensaiada na Brockhaus (curva na cor laranja) e uma amostra ensaiada na bancada (curva na cor azul). Observa-se que ambas as curvas de amostras sem alívio medidas nas duas bancadas agora são praticamente coincidentes (diferenças máximas de 1,4%). A mesma comparação foi realizada para amostras com alívio térmico: as curvas nas cores amarelo e azul escuro indicam os resultados de perdas magnéticas para a amostra com alívio ensaiada na Brockhaus e na bancada de esforços, respectivamente. As curvas nesses casos também foram bastante próximas, onde as diferenças relativas de perdas para as amostras com alívio ensaiadas nas duas bancadas foram de 12%.

Figura 23 – Ensaio amostra Fabricante B E230 em 50 Hz.



Fonte: do Autor.

Como os resultados de perdas magnéticas na amostra E230B (com alívio e sem alívio térmico) obtidos com a Brockhaus e com a bancada de esforços mecânicos foram próximos⁷, escolheu-se as amostras E230B para realizar os ensaios com carregamentos mecânicos e realizar as análises comparativas deste capítulo de resultados.

A partir do conhecimento obtido sobre o desempenho de lâminas sob carregamento mecânico, o qual foi percorrido nas seções 2.3 e 2.4, esperava-se que lâminas de ferro-silício laminadas na direção longitudinal iriam apresentar um aumento significativo de perdas magnéticas quando submetidas a compressões colineares ao campo de excitação e uma redução significativa na permeabilidade magnética. E quando submetidas a trações colineares ao campo de excitação, haveria uma redução de perdas magnéticas inicial para níveis até 10 MPa e um aumento (ainda que menor que o caso sem esforços) em 20 MPa e aumento de permeabilidade (até 10 MPa com uma pequena redução em 20 MPa) [3][21].

4.1 RESULTADOS DE PERDAS MAGNÉTICAS

Nesta seção, serão apresentados os resultados de perdas magnéticas obtidos para as amostras com e sem alívio térmico E230B. Os resultados serão divididos em três partes. Na

⁷ Resultados de valores de perdas obtidos na Brockhaus (MPG 100 e MPG200) e esta bancada de esforços mecânicos foram semelhantes nos trabalhos de Mailhé [3] e Silva [21].

primeira parte serão apresentadas curvas de perdas magnéticas em função do nível de carregamento imposto (0 MPa, 10 MPa e 20 MPa de tração e compressão) para a amostra com alívio térmico nas frequências de 1 Hz, 10 Hz, 50 Hz e 100 Hz. Na segunda parte, apresentam-se os resultados de perdas magnéticas da amostra sem alívio térmico nas frequências ensaiadas e, na terceira parte, são apresentadas comparações entre valores de perdas magnéticas das duas amostras.

4.1.1 Amostra com alívio térmico

Na Figura 24, tem-se o gráfico de perdas da amostra com alívio térmico do fabricante B. Nesta figura, estão contidas as curvas de perdas para os diferentes níveis de tensões testados em 1 Hz. Nota-se que para esta amostra, as perdas são reduzidas para os níveis de tração em relação ao caso sem esforços (curva na cor amarela). Quando aplicada uma tração de 20 MPa obteve-se a maior redução de perdas (curva na cor cinza). Já, na aplicação de compressão as perdas aumentaram, e o aumento mais significativo deu-se em 20 MPa de compressão (linha azul escura). Nota-se também uma diferença significativa entre as curvas de 5 MPa e 10 MPa de compressão (curvas nas cores azul claro e verde).

Os comportamentos das curvas de perdas magnéticas para amostra E230B com alívio térmico nas demais frequências analisadas foram bastante semelhantes aos obtidos na frequência de 1 Hz (Figura 24). Nas figuras 25, 26, 27 são apresentadas as curvas de perdas magnéticas nas frequências de 10 Hz, 50 Hz e 100 Hz, respectivamente.

Na Figura 25, é possível notar que a indução máxima obtida é menor que para os ensaios a 1 Hz (Figura 24), isso ocorre devido a dificuldade da bancada de controlar a tensão para frequências elevadas. O valor máximo de indução adquirido para os ensaios em 10 Hz foi de 1,4 T e de 1 Hz foi de 1,5 T. Nas frequências de 50 Hz e 100 Hz, as induções alcançadas nos ensaios foram menores (1,2 T em 50 Hz e 1,05 T em 100 Hz), expondo a influência das perdas dinâmicas para maiores frequências devido aos limites da bancada. Isto também ocorreu nos ensaios das amostras sem alívio de tensões. A elevação da frequência nos ensaios aumenta o valor das perdas dinâmicas, que pouco se alteram devido ao carregamento mecânico, tornando menos significativas as diferenças entre os valores de perdas nos ensaios de 10 Hz, 50 Hz e 100 Hz. Isso ocorre para ambas as amostras, com alívio térmico e sem alívio térmico.

Figura 24 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 1 Hz.

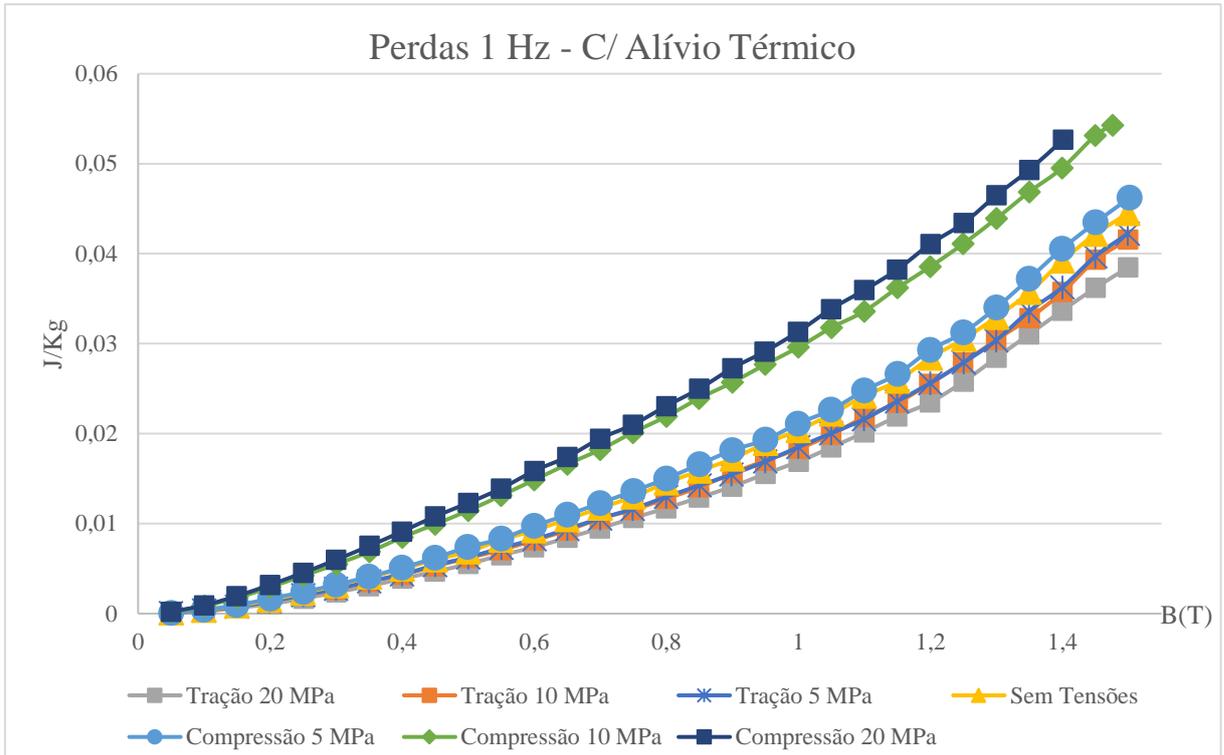


Figura 25 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 10 Hz.

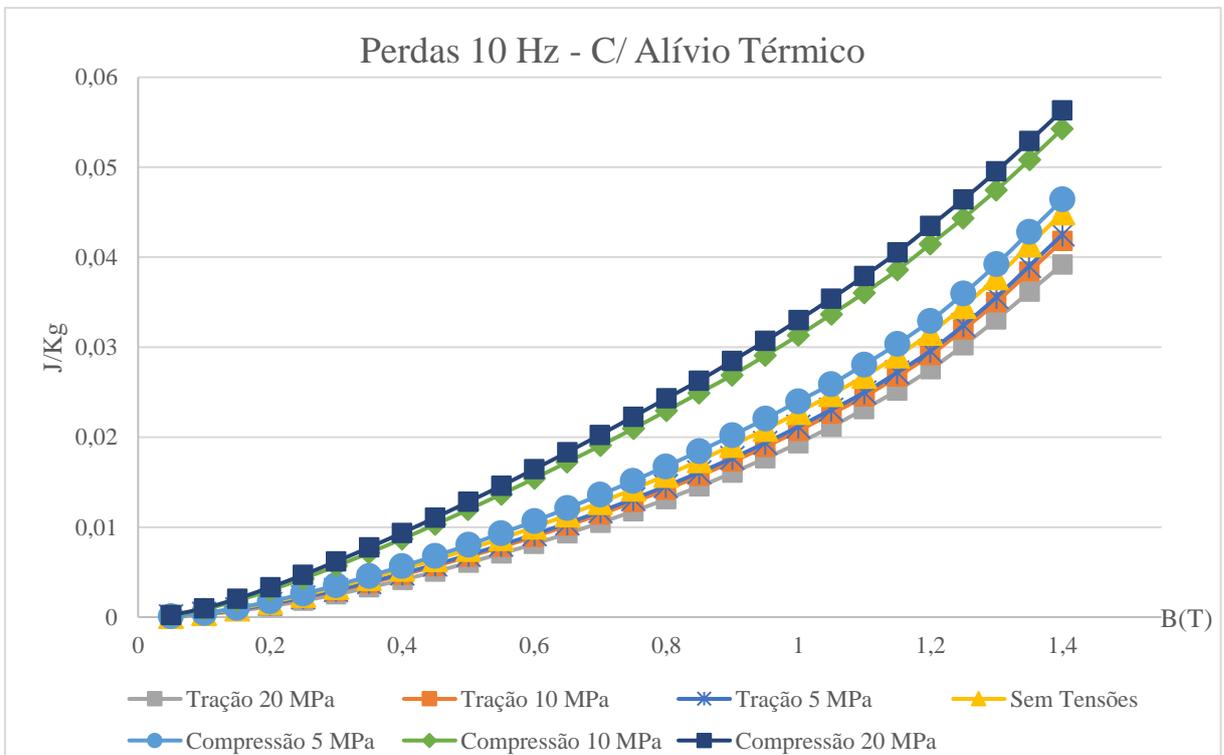


Figura 26 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 50 Hz.

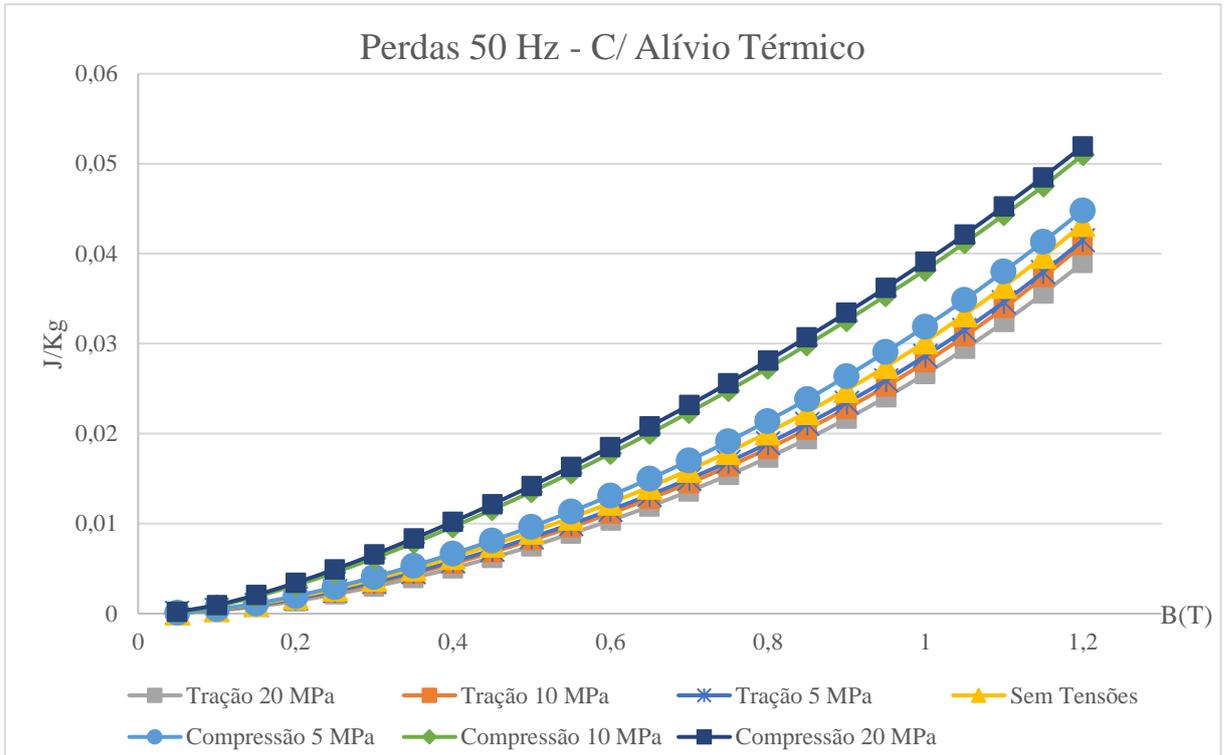
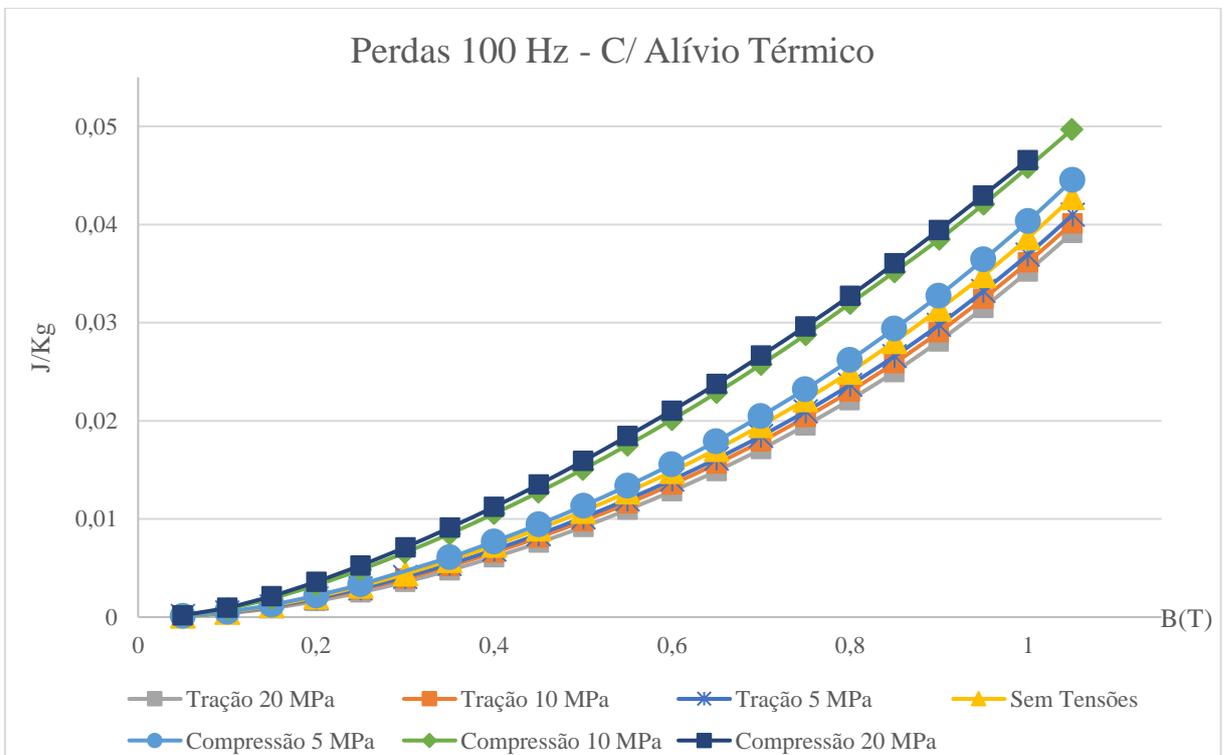


Figura 27 – Perdas na amostra COM alívio térmico de tensões a 100 Hz.



Na próxima seção, são apresentados os resultados de perdas magnéticas para as amostras E230B sem alívio de tensões.

4.1.2 Amostra sem alívio térmico

Na Figura 28, é apresentado um gráfico com as curvas de perdas magnéticas da amostra sem tratamento térmico do fabricante B para os diferentes níveis de tensões testados em 1 Hz. Nota-se que para esta amostra, as perdas são reduzidas para os níveis de tração em relação ao caso sem esforços (curva na cor amarela). Quando aplicada uma tração de 20 MPa, obteve-se a maior redução de perdas (curva na cor cinza). Já, na aplicação de compressão as perdas aumentaram, e o aumento mais significativo deu-se em 20 MPa de compressão (linha azul escura). Entretanto, as diferenças entre as curvas de 5 MPa e 20 MPa de compressão (curvas nas cores azul claro e azul escuro) não foram tão significativas como no caso da amostra com tratamento térmico.

Os comportamentos das curvas de perdas magnéticas para amostra E230B sem alívio térmico nas demais frequências analisadas também foram e semelhantes aos obtidos na frequência de 1 Hz (Figura 28). Nas figuras 29, 30, 31 são apresentadas as curvas de perdas magnéticas nas frequências de 10 Hz, 50 Hz e 100 Hz, respectivamente. Também é possível notar, para todas as frequências de ensaios, que a diferença nas perdas dos ensaios de 5 MPa de tração (linha azul com asteriscos) foi pequena em comparação aos ensaios de 10 MPa de tração (linha laranja com quadrados).

Figura 28 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 1 Hz.

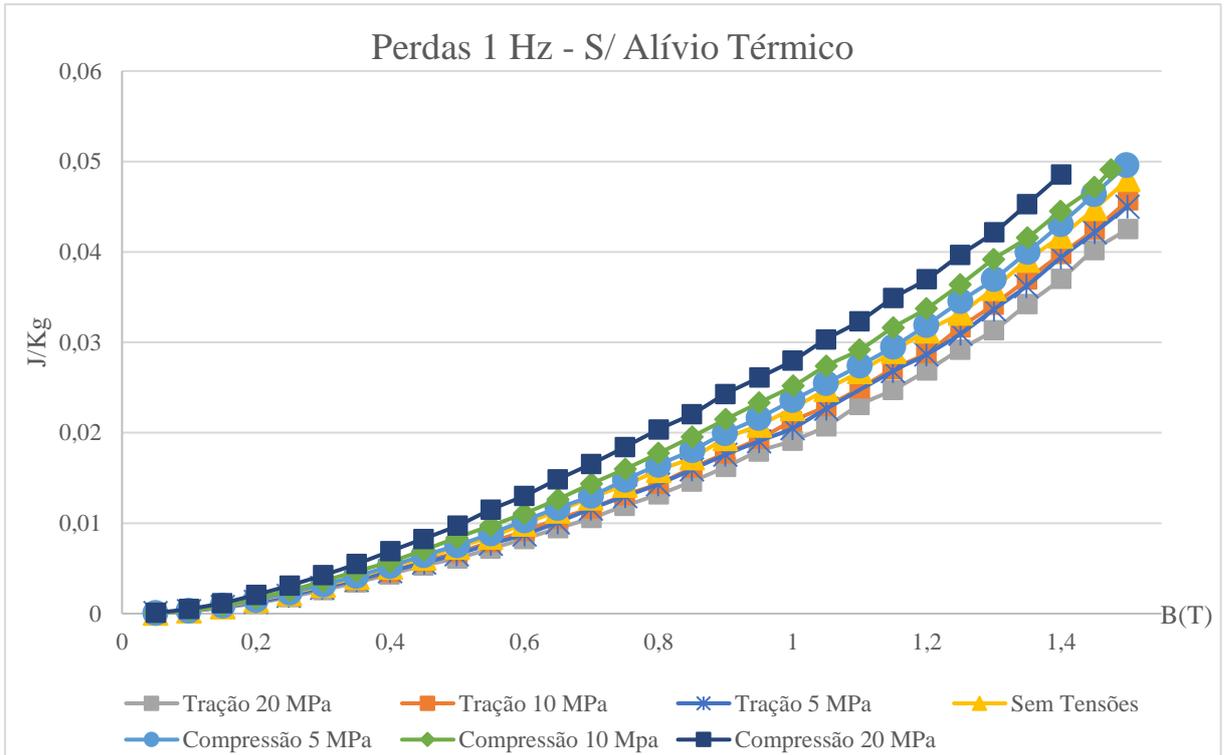


Figura 29 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 10 Hz.

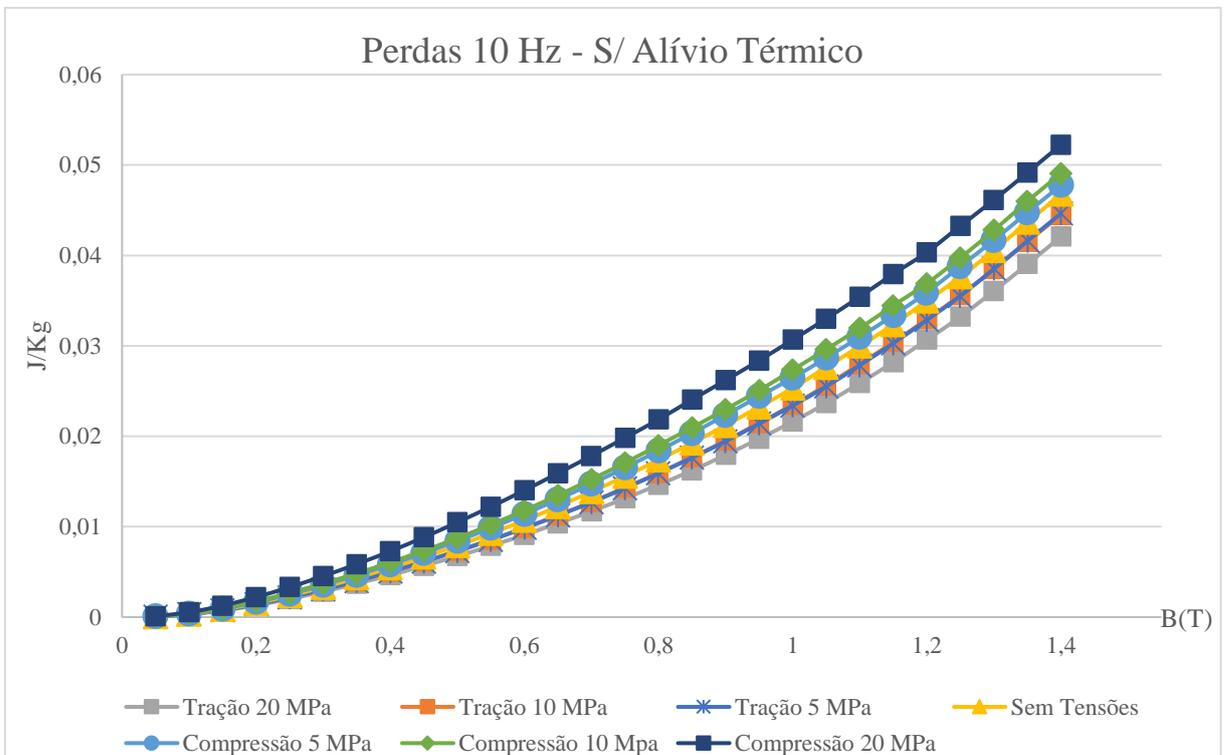


Figura 30 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 50 Hz.

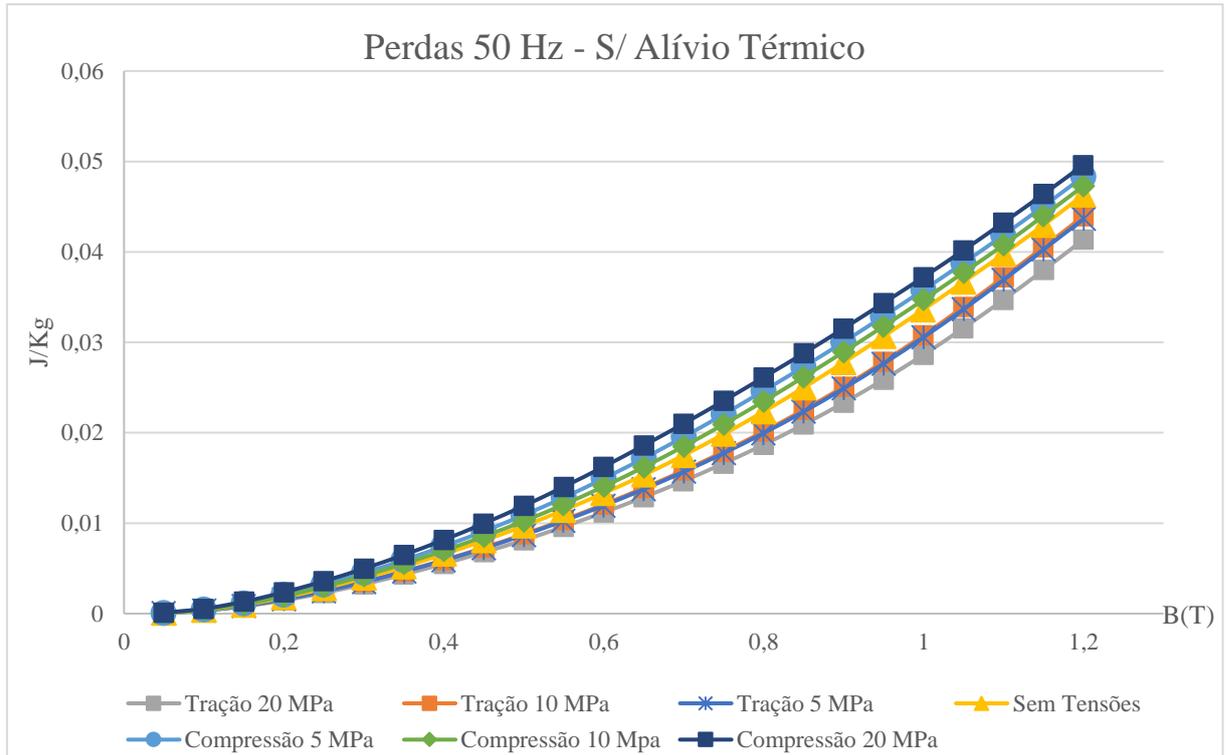
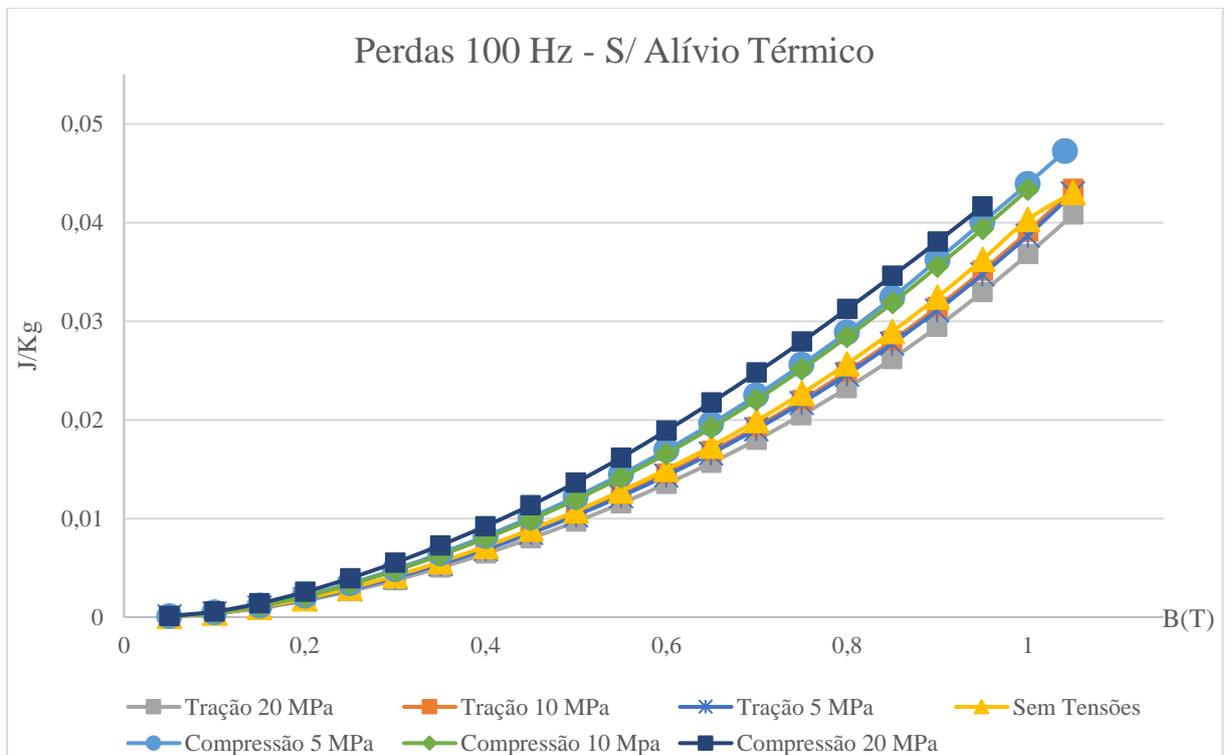


Figura 31 – Perdas na amostra SEM alívio térmico de tensões a 100 Hz.



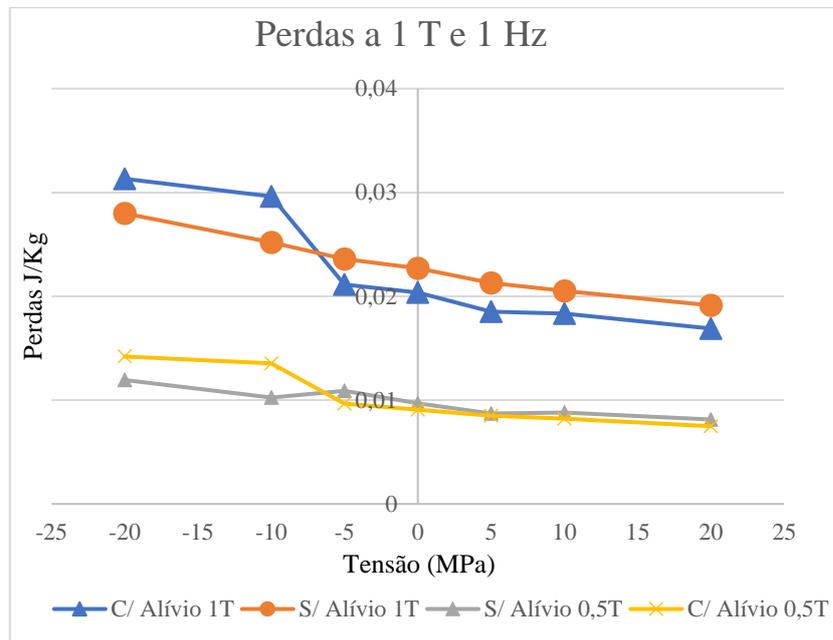
Realizadas análises nas curvas de perdas magnéticas das amostras com alívio e sem alívio de tensões, é realizada uma comparação simultânea entre alguns resultados de perdas dessas duas amostras.

4.1.3 Comparação de resultados de perdas magnéticas entre amostras com alívio e sem alívio térmico

Na Figura 32, tem-se resultados de perdas magnéticas em 1 T e 0,5 T e 1 Hz das amostras E230B sem alívio e com alívio quando submetidas a carregamentos mecânicos. As curvas azul e laranja se referem as perdas em 1 T (amostras com alívio e sem alívio, respectivamente) e as curvas amarela e cinza representam os valores de perdas em 0,5 T (amostras com alívio e sem alívio, respectivamente). Nota-se que em ambas as induções magnéticas há uma redução progressiva de perdas para tração e aumento em compressão. Para compressões acima de 10 MPa, as perdas da amostra com alívio térmico foram maiores que da amostra sem alívio térmico.

Este aumento nos valores de perdas magnéticas, nos níveis de compressão (10 MPa e 20 MPa), da amostra com tratamento térmico com relação ao respectivo valor de perda da amostra que não passou pelo mesmo tratamento, não era esperado. Apesar de ambas apresentarem resultados esperados em relação ao seu tipo de magnetostrição (maiores perdas conforme se elevam os níveis de compressão), eram esperadas maiores perdas na amostra sem alívio térmico de tensões. Uma suposição sobre o porquê desse resultado, visto que a lâmina com alívio térmico de tensões passou por mais procedimentos em sua produção, seria a possível fadiga sofrida pelo material, a qual somente seria acentuada durante os esforços pouco favoráveis as características dele (magnetostrição negativa). Dito isso, não houve maior aprofundamento em estudos com esse foco, pois não se tem maiores informações sobre o processamento deste material. Não foram realizados novos ensaios nas condições acima. Este comportamento também será exposto nos laços de histerese da seção 4.3.

Figura 32 – Perdas magnéticas nas amostras com e sem alívio térmico E230B a 1 T e 0,5 T e 1 Hz.



Fonte: do Autor.

Nas figuras 33 e 34, são feitas comparações das curvas de perdas entre as amostras, com e sem alívio térmico, para compressão 20 MPa, sem tensão e tração de 20 MPa. Nota-se que para ensaios sem tensões (com alívio térmico curva vermelha, sem alívio térmico curva amarela) ou com tração de 20 MPa (com alívio térmico curva cinza, sem alívio térmico curva laranja), as perdas da amostra com alívio térmico são menores que a amostra sem alívio térmico. Mas, para o caso de compressão em 20 MPa (com alívio térmico curva verde, sem alívio térmico curva azul escuro), os valores de perdas da amostra sem alívio que são menores.

Figura 33 – Comparação de Perdas COM x SEM tratamento térmico em 1 Hz.

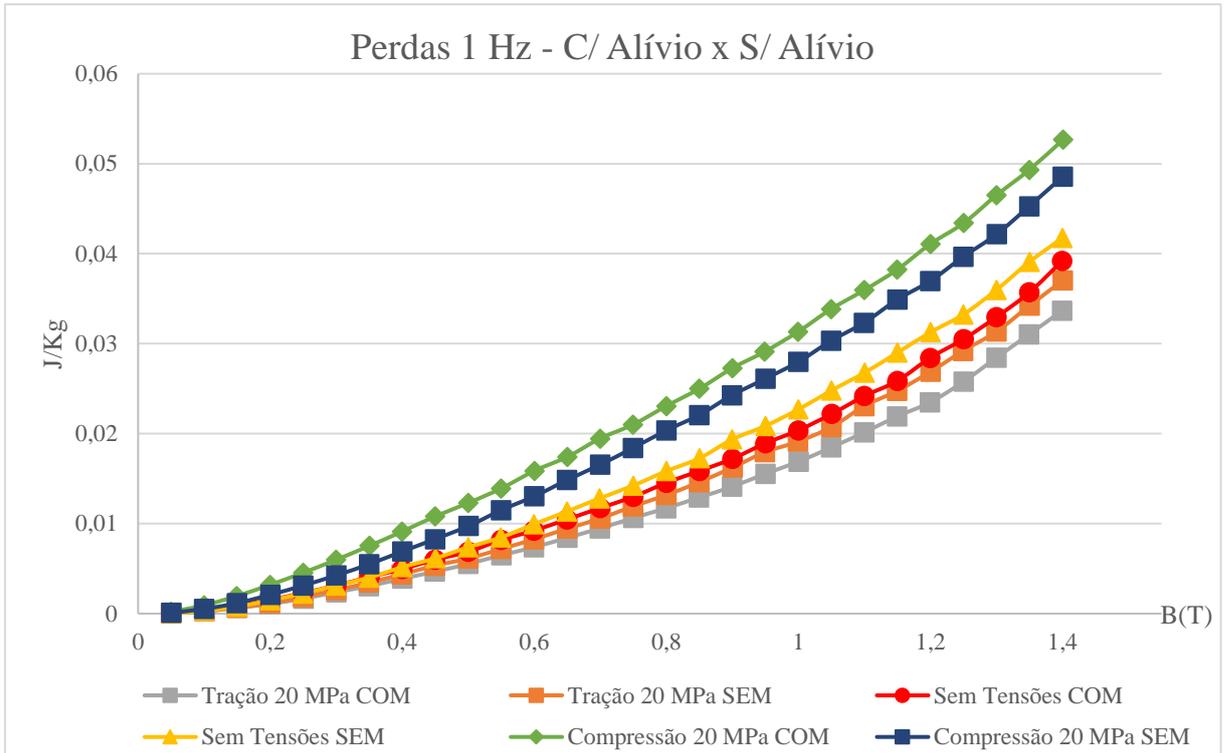
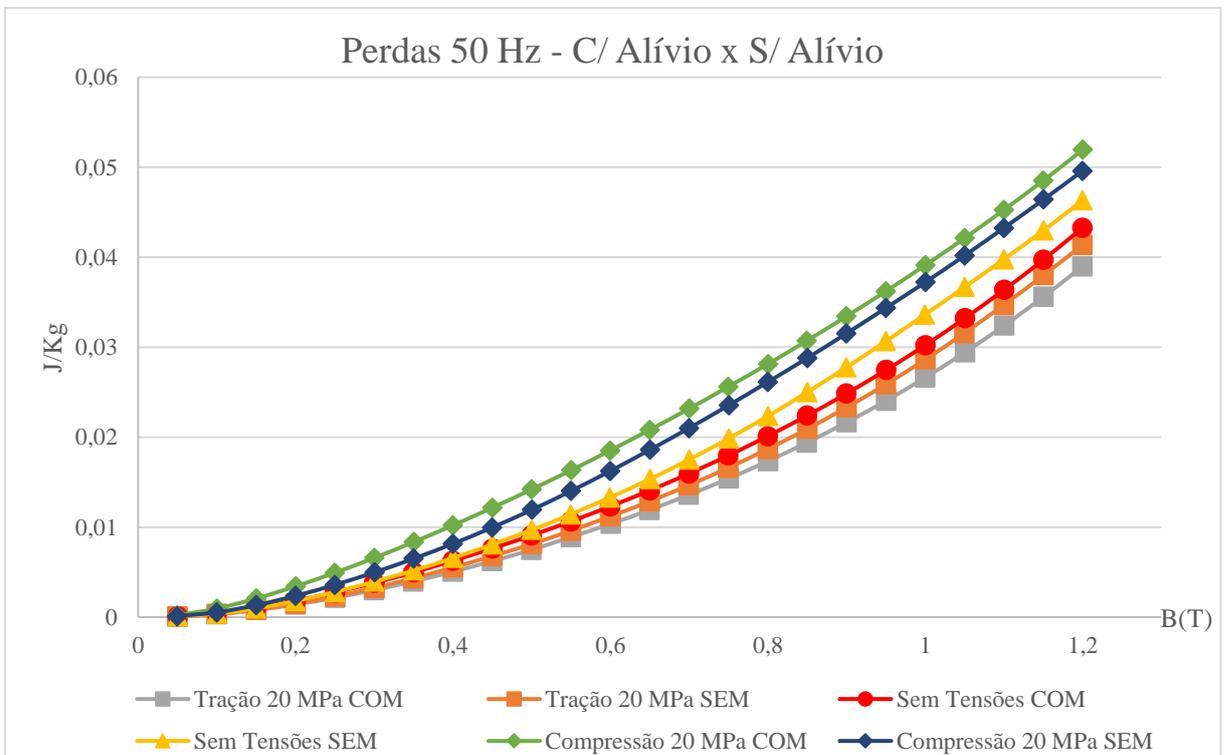


Figura 34 – Comparação de Perdas COM x SEM tratamento térmico em 50 Hz.



4.2 RESULTADOS DE PERMEABILIDADE MAGNÉTICA

Nesta seção, serão apresentados os gráficos de permeabilidade relativa nas amostras com alívio térmico (Figuras 35 e 36) e sem alívio térmico (Figuras 37 e 38).

Em relação aos gráficos de permeabilidade relativa, é visível a diferença entre os valores para os diferentes níveis de carregamentos aplicados. Dessa forma, nota-se a coerência entre os ensaios, pois os testes que apresentaram um aumento em permeabilidade sob carregamento tiveram redução no valor das perdas. Isso ocorre porque é necessário um campo magnético menor para atingir a saturação do material, ou seja, os domínios magnéticos necessitam realizar um esforço menor para se alinhar com o campo de excitação.

4.2.1 Amostra com alívio térmico

Nas figuras 35 e 36, as curvas de permeabilidade ficaram semelhantes para os ensaios de 10 MPa (linha laranja com círculos) e 20 MPa de tração (linha azul com quadrados). A redução de permeabilidade relativa entre a curva de compressão de 20 MPa (curva azul claro) e a curva sem carregamentos mecânicos (curva amarela) foi de até 66,3% em 1 Hz e 60,8% em 50 Hz. Comparando-se as variações nos valores de permeabilidade em tração com relação à curva sem tensões (curva amarela), nota-se que houve uma melhora considerável na permeabilidade quando aplicados 5 MPa (curva na cor cinza) e que as curvas de permeabilidade relativa em tração de 10 MPa (curva laranja) e de 20 MPa (curva azul com quadrados), foram próximas. As diferenças obtidas entre as curvas de 10 MPa e 0 MPa foram de até 36,5% em 1 Hz e 29,4% em 50 Hz.

Figura 35 – Permeabilidade relativa, amostra COM alívio de tensões em 1 Hz.

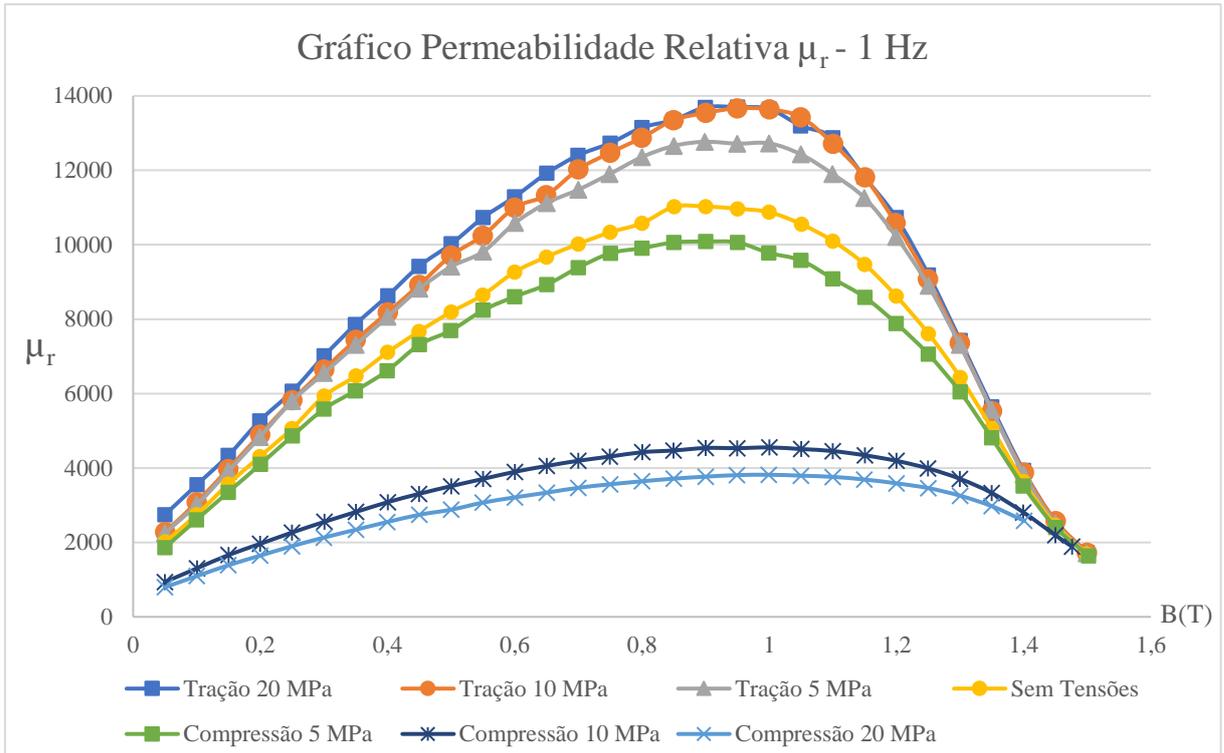
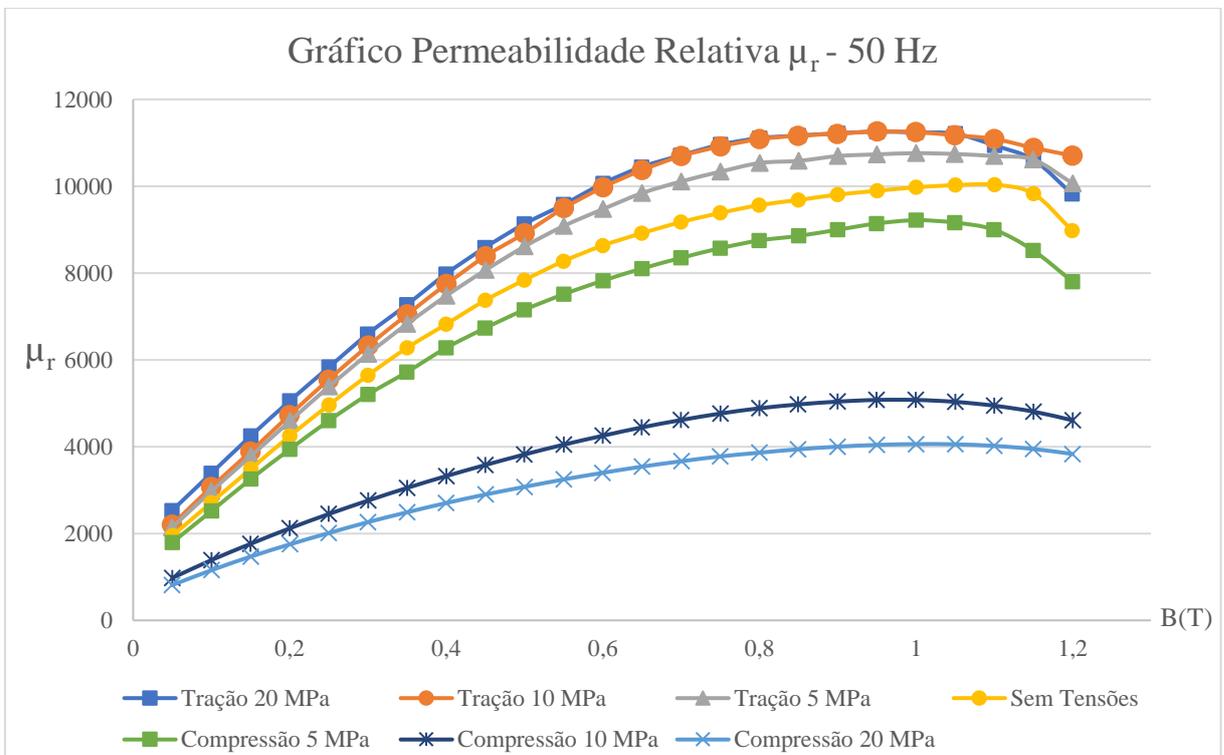


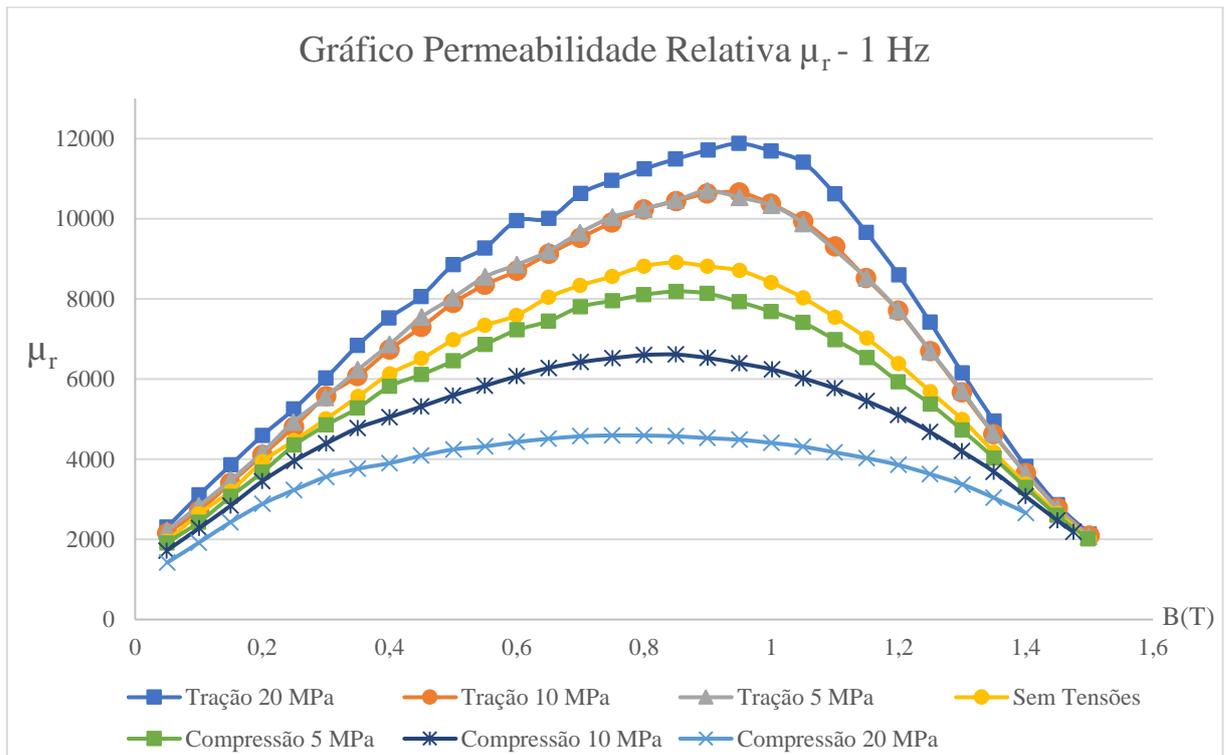
Figura 36 – Permeabilidade relativa, amostra COM alívio de tensões em 50 Hz.



4.2.2 Amostra sem alívio térmico

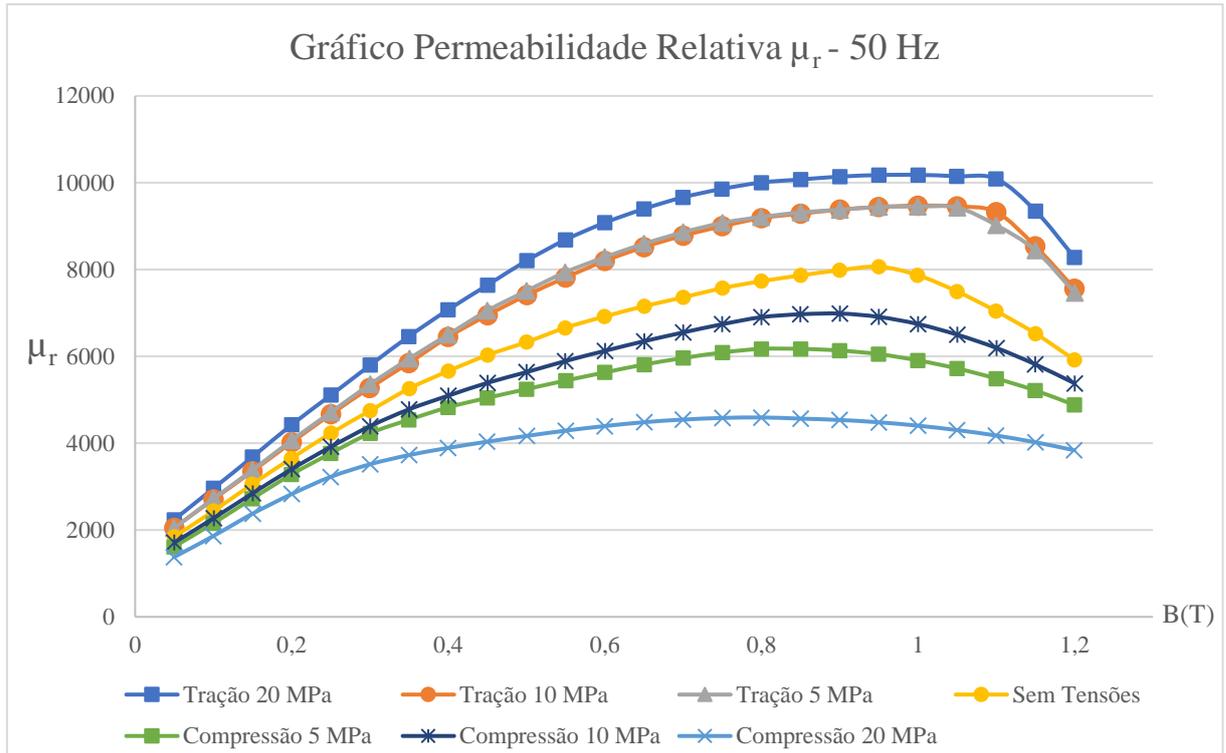
Para a amostra sem alívio térmico, a redução de permeabilidade relativa entre a curva de compressão de 20 MPa (curva azul claro) e a curva sem carregamentos mecânicos (curva amarela), foi de até 48,7% em 1 Hz e 44,4% em 50 Hz. Nesta amostra, também houve um aumento significativo nos valores de permeabilidade relativa entre as curvas em 5 MPa (linha cinza com triângulos). Entretanto, neste caso, as curvas de 5 MPa e 10 MPa (linha laranja com círculos) de tração ficaram próximas (vide figuras 37 e 38). As diferenças obtidas entre as curvas de 20 MPa e de 0 MPa em tração foram de até 42,2% em 1 Hz e 43,3% em 50 Hz.

Figura 37 – Permeabilidade relativa, amostra SEM alívio de tensões em 1 Hz.



Fonte: do Autor.

Figura 38 – Permeabilidade relativa, amostra SEM alívio de tensões em 50 Hz.



Notou-se nos gráficos das amostras E230B, que não houve deterioração das propriedades magnéticas das curvas em tração de 20 MPa quando comparadas aos valores das curvas em tração de 10 MPa, como indica literatura [3] sobre as características das amostras [3][20]. Assim, um estudo mais aprofundado sobre as amostras da fabricante B E230 deve ser realizado.

4.3 LAÇOS DE PERDAS MAGNÉTICAS

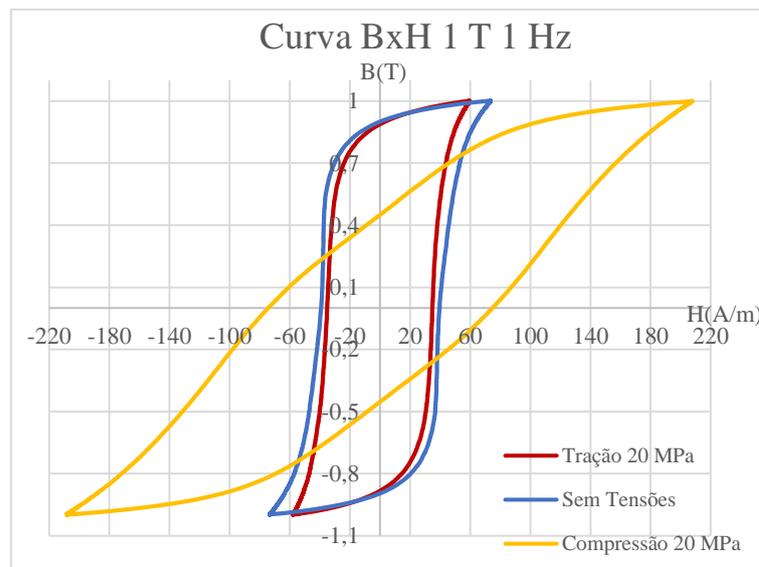
Nesta seção, são apresentados laços de perdas magnéticas das amostras com alívio térmico e sem alívio térmico.

Na Figura 39, têm-se laços de histerese a 1 T da amostra com alívio térmico em 20 MPa de tração, 20 MPa de compressão e no caso sem esforços. Observa-se que houve um aumento na forma do laço quando as amostras sofreram compressão (curva na cor amarela) e uma redução quando tração é aplicada (curva na cor vermelha) em relação ao caso sem esforços (curva na cor azul). Como visto no capítulo 3, uma curva de histerese de um material tem influência direta no valor de perdas dele. Uma das grandezas que o laço de histerese exibe é o

campo coercitivo (valor do campo magnético quando a indução magnética é zero) que é relacionada à quantidade de energia necessária para o material superar sua magnetização espontânea e/ou magnetização residual. Dessa forma, é notada a redução do campo coercitivo nos gráficos a seguir, o que corrobora com a característica magnetostritiva positiva das amostras. Nesta figura, o campo coercitivo do laço sem esforços mecânicos (curva azul) da amostra com alívio térmico é de aproximadamente 39,7 A/m, do laço em 20 MPa de tração (curva vermelha) é cerca de 34,7 A/m e em compressão de 20 MPa (curva amarela) por volta de 75,0 A/m.

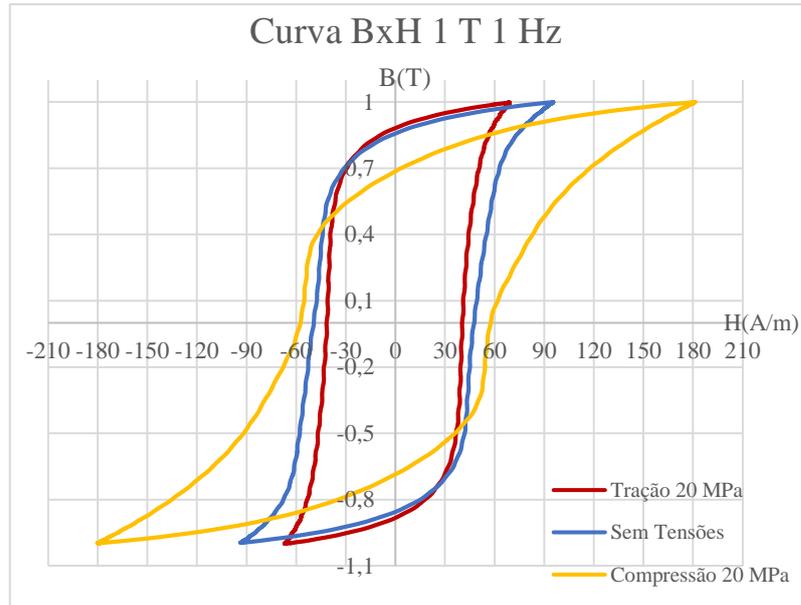
Na Figura 40, realizou-se uma comparação para a amostra sem alívio térmico, semelhante a da Figura 39. Nota-se que na tração de 20 MPa (curva vermelha) a largura do laço diminuiu, enquanto que na compressão houve aumento. O campo coercitivo do laço sem esforços mecânicos (curva azul) da amostra sem alívio térmico é de aproximadamente 46,7 A/m, do laço em 20 MPa de tração (curva vermelha) é cerca de 40,5 A/m e em compressão de 20 MPa (curva amarela) por volta de 56,1 A/m. O aumento na largura do laço em compressão de 20 MPa para a amostra sem alívio em relação ao caso sem esforços não foi tão significativo quanto na amostra com alívio. Além disso, as formas das curvas em compressão nas duas amostras foram diferentes.

Figura 39 – Laço de histerese em 1 T e 1 Hz amostra COM alívio térmico.



Fonte: do Autor.

Figura 40 – Laço de histerese em 1 T e 1 Hz amostra SEM alívio térmico.



Fonte: do Autor.

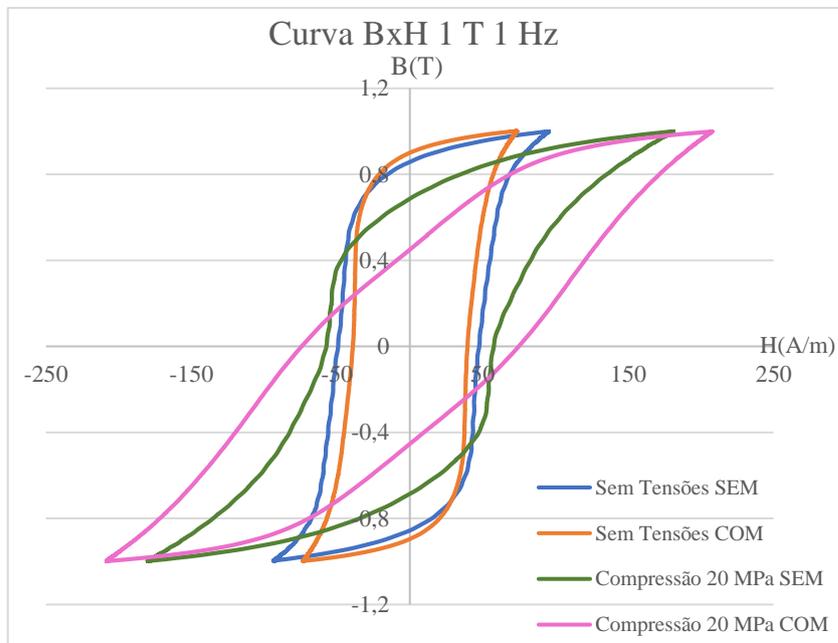
Para realizar uma análise mais detalhada das diferenças dos laços de perdas magnéticas entre as amostras com e sem alívio de tensões são apresentadas as figuras 41 e 42. Na Figura 41, são apresentados os laços de histerese sem esforços e em 20 MPa de compressão das duas amostras e, na Figura 42, são apresentados os laços de histerese sem esforços e em 20 MPa de tração de ambas as amostras.

Nota-se, na Figura 41, que na ausência de tensões, o laço é menor para a amostra com alívio (linha laranja), e para compressão de 20 MPa o laço da amostra sem alívio térmico é menor (linha verde). Como laço de histerese tem relação direta com as perdas, essa imagem corrobora o que foi visto nos gráficos de perdas e permeabilidade previamente (maiores valores de perdas e menores valores de permeabilidade relativa na amostra com alívio térmico do que na amostra sem alívio térmico). Observando-se os laços de perdas dessa figura, nota-se que no caso sem aplicação de esforços mecânicos, o campo coercitivo da amostra sem alívio térmico (curva azul) é superior ao da amostra com alívio térmico (curva laranja): 46,7 A/m e 39,7 A/m, respectivamente. Em 20 MPa de compressão, este fato se inverte: o campo coercitivo da amostra com alívio térmico (curva rosa) é superior ao da amostra sem alívio térmico (curva verde): 75 A/m e 56,10A/m, respectivamente.

Já na Figura 42, observa-se que a amostra com alívio exibe laços mais estreitos que a sem alívio térmico. A diferença entre as curvas é menor que na Figura 41. Nota-se que no caso

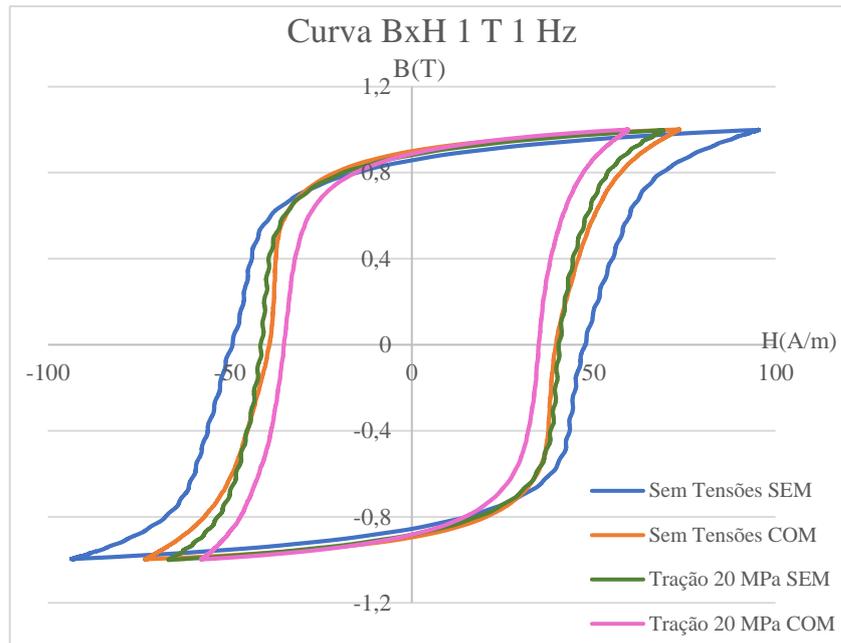
sem aplicação de esforços mecânicos, o campo coercitivo da amostra sem alívio térmico (curva azul) é superior ao da amostra com alívio térmico (curva laranja): 46,7 A/m e 39,7 A/m, respectivamente. Em 20 MPa de tração, o campo coercitivo da amostra com alívio térmico (curva rosa) também é inferior ao da amostra sem alívio térmico (curva verde): 40,5 A/m e 34,7 A/m, respectivamente. O campo máximo necessário para se atingir a indução de 1 T no ensaio em 20 MPa de tração foi de cerca de 90 A/m para a amostra sem alívio de tensões e 70 A/m para a amostra com alívio de tensões, enquanto que nos ensaios de compressão, foi necessário um campo de aproximadamente 205 A/m para a amostra com alívio e 180 A/m para a amostra sem alívio.

Figura 41 – Comparação laço de histerese COM x SEM alívio térmico sob compressão.



Fonte: do Autor.

Figura 42 – Comparação laço de histerese COM x SEM alívio térmico sob tração.



Fonte: do Autor.

5 CONCLUSÃO

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo principal de realizar um estudo sobre o impacto de carregamento mecânico nas propriedades magnéticas de lâminas de Fe-Si de grão não orientado (GNO), com e sem alívio térmico. Para auxiliar na busca por desse objetivo, foram utilizadas as bancadas MPG-200 da Brockhaus e a bancada de esforços mecânicos [3] para obter medições das propriedades magnéticas aplicando esforços mecânicos nas amostras (também no caso sem esforços).

Com os métodos de medições definidos, foi necessário um estudo para entender os processos que abrangem o impacto de tensões mecânicas em materiais magnéticos. Esse estudo englobou desde o princípio de magnetismo, assim como o conceito de perdas magnéticas e como elas são influenciadas, como também uma análise da ciência dos materiais. Partindo desse ponto foi possível estudar os efeitos de acoplamento magnetomecânico, o qual se divide em acoplamento magnetoplástico e acoplamento magnetoelástico (com enfoque no acoplamento magnetoelástico).

Após adquiridos os conhecimentos teóricos sobre o assunto e como utilizar as bancadas de ensaios, foi realizado um planejamento para os testes e definição das amostras a serem ensaiadas. Por fim, realizaram-se os ensaios de obtenção das características magnéticas do material (Fe-Si E230 com direção de corte longitudinal em relação à direção de laminação) quando aplicados esforços mecânicos de tração e compressão e no caso sem esforços.

Foram realizadas análises preliminares comparativas entre a bancada de esforços mecânicos e a bancada comercial Brockhaus no caso sem esforços das amostras de dois fabricantes (A e B). Visto que as amostras E230A sem alívio térmico não tiveram boa repetitividade quando comparados ensaios em uma mesma bancada e comparando-se a Brockhaus e a bancada de esforços mecânicos, escolheram-se as amostras do fabricante B (que teve resultados próximos entre as duas bancadas) para realizarem-se as comparações entre valores de perdas (com alívio e sem alívio quando impostos esforços mecânicos).

Os ensaios na bancada de esforços mecânicos foram realizados nas frequências de 1 Hz, 10 Hz, 50 Hz e 100 Hz. Em cada frequência de ensaio, foram aplicadas tensões de tração, como também de compressão, nos valores de 5 MPa, 10MPa e 20 MPa. Ao total, foram executados 56 ensaios na bancada de esforços.

De maneira geral, os resultados de magnetostrição inversa (para características de perdas e permeabilidade) obtidos foram semelhantes ao que a literatura indica. Foi possível

notar as modificações que as tensões mecânicas causam nas características magnéticas desses materiais ferromagnéticos. Quando comparadas uma mesma amostra, em compressão as perdas aumentaram significativamente. Em geral, quando aplicados a esforços em menores intensidades (em compressão), os efeitos nas propriedades são significativos, e à medida que se aumenta a intensidade dos esforços, os efeitos também aumentam. Em tração, as perdas diminuíram. A maior diminuição se deu em 5 MPa (com relação ao caso sem esforços). Em 10 MPa e em 20 MPa, a redução das perdas foi mais sutil quando comparadas com o caso sem esforços. Os resultados de redução de perdas em tração e de aumento de perdas em compressão são coerentes com o esperado para amostras que possuem magnetostrição positiva, como as testadas durante o trabalho. Entretanto, o resultado de redução progressiva em tração (menor valor de perdas em 20 MPa) e maior valor de permeabilidade em 20 MPa, não eram esperados.

Quando comparadas amostras com e sem alívio, observou-se que em 5 MPa de compressão e sem a aplicação de esforços, a amostra com alívio térmico apresentou menores perdas do que a amostra sem alívio. Porém, a medida que os níveis de compressão aumentaram, 10 MPa e 20 MPa, as perdas na amostra com alívio ultrapassam de maneira significativa as perdas da amostra sem alívio. Os gráficos de permeabilidade também exibiram esse comportamento, nos ensaios em 10 MPa e 20 MPa para a amostra com alívio térmico os valores de permeabilidade relativa apresentaram redução significativa se comparado a amostra sem alívio térmico de tensões.

O tratamento térmico é um tema bastante dominado e estudado tanto na academia, quanto na indústria e realiza-se este procedimento para melhorar (ou retomar) as características magnéticas que ocorrem devido a processos industriais como laminação e estampagem, que são realizados nos materiais. Pode-se citar que as perdas são reduzidas quando realizado o tratamento. Neste trabalho, observou-se que isto ocorre quando aplicados esforços de tração (até 20 MPa) e em níveis reduzidos de compressão (5 MPa). Quando se elevaram os níveis de compressão (10 MPa e 20 MPa), observou-se maiores perdas na amostra com alívio do que sem alívio. Para valores maiores que 0,4 T de indução, a diferença de perdas entre as amostras foi de até 41% em compressão de 10 MPa, e em compressão de 20 MPa a diferença foi de até 32%.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

Uma investigação mais aprofundada sobre a amostra E230B deve ser realizada, visto que não houve deterioração das características magnéticas desse material em tração de 20 MPa (com relação a 10 MPa). Por exemplo, com a realização de mais ensaios, em outras amostras de mesmo material. Além disso, sugerem-se investigação de possíveis erros de operação na bancada, bem como um estudo de incertezas que podem ter gerado essa diferença. Além disso,

Sugere-se também, acerca do estudo comparativo entre esta amostra em tração e compressão, realizar mais análises teóricas e experimentais a fim de verificar que o tratamento térmico não é tão benéfico para melhorar as características magnéticas de materiais ferromagnéticos em níveis mais elevados de compressão (neste trabalho chegou-se apenas a níveis de 20 MPa).

REFERÊNCIAS

- [1] BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. United States: Wiley - IEEE Press, August 1993. 992 p. ISBN 978-0-780-31032-2.
- [2] CALLISTER JUNIOR, William D. **Materials Science and Engineering**. United States: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [3] MAILHÉ, Benjamin Joseph. **Characterization and modelling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical**. 2018. Tese (PhD Engenharia Elétrica) - UFSC, Florianópolis, 2018.
- [4] MEURER, Evandro Jacob. **Estudo das perdas magnéticas interlaminares em máquinas elétricas**. 2005. Dissertação (Mestre Engenharia Elétrica) - UFSC, Florianópolis, 2005.
- [5] CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2013. 684 p. ISBN 978-85-8055-207-2.
- [6] ALMEIDA, Adriano Alex. **Influência do tamanho de grão, teor de silício e frequência de excitação nas perdas anômalas do aço GNO**. 2013. Dissertação, Mestrado (Mestre Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Escola politécnica da USP, São Paulo, 2013
- [7] Global Efficiency Intelligence. < <https://www.globalefficiencyintel.com/new-blog/2017/infographic-energy-industrial-motor-systems>> Acessado em: 26/06/2019
- [8] CULLITY, B. D.; GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. 2. ed. rev. New Jersey: Wiley - IEEE Press, Inc., 2009. 564 p. ISBN 978-0-471-47741-9.
- [9] BATISTELA NELSON JHOE. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço silício**. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA Centro Tecnológico, 2001.
- [10] BASTOS, João Pedro Assumpção. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. 2. ed. [S.l.]: Ed. UFSC, 2008. 396 p.
- [11] COEY, J. M. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. United Kingdom: Cambridge University Press, 2010. 663 p. ISBN 978-0-521-81614-4.
- [12] SANTOS, E. F. F. *In*: SANTOS, E. F. F. **Influência das tensões mecânicas nas perdas e na permeabilidade magnética de aços elétricos**. Orientador: Nelson Sadowski. 2012. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - UFSC, Florianópolis, 2012. p. 42.
- [13] DANIEL, L. **Modélisation multi-échelle du comportement magnéto-mécanique des matériaux ferromagnétiques texturés**. Tese (Doutorado) — École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, set. 2003.

- [14] BATISTELA, N. J.; PERIN, A. J. A fixed frequency sliding mode control for voltage source inverter. In: **III Brazilian Power Electronics Conference-COBEP'95**. [S.l.: s.n.], 1995. p. 229–234.
- [15] FIORILLO, F.; PASQUALE, M.; APPINO, C. Hysteresis in magnetic materials. In: FIORILLO, F.; PASQUALE, M.; APPINO, C. **The science of hysteresis**. Amsterdam: Elsevier, 2006. v. 3, cap. 1, p. 1-190. *E-book* (190 p.).
- [16] PIRES, W. L. As perdas eletromagnéticas. In: PIRES, W. L. **The science of hysteresis**. Orientador: Nelson Jhoe Batistela. 2008. Dissertação (Mestre Engenharia Elétrica) - UFSC, Florianópolis, 2008. p. 166.
- [17] Coombs, A.; Lindenmo, M.; Snell, D.; Power, D. **Review of types, properties, advantages and latest developments in insulating coatings on nonoriented electrical steels**. IEEE Trans. Mag. v.37, 2001
- [18] PEREVERTOV, O. Influence of the applied elastic tensile and compressive stress on the hysteresis curves of Fe-3%Si non-oriented steel. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 428, n. Supplement C, p. 223–228, abr. 2017. ISSN 0304-8853.
- [19] IEC – International Electrotechnical Commission. Magnetic materials - Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester, IEC 404-3. 2002-2.1
- [20] AYDIN, U. et al. Magneto-mechanical modeling of electrical steel sheets. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v.439, p. 82-90, 2017.
- [21] SILVA, I. P. C. **Estudos sobre o efeito dos esforços mecânicos no comportamento de valores de parâmetros de modelos de perdas magnéticas**. Orientador: Nelson Jhoe Batistela. 2019. 151 p. Dissertação (Mestre Engenharia Elétrica) - UFSC, Florianópolis/SC - Brasil, 2019.