



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA**

Oliver Thimoni Alves

**Análise de medições na caracterização de materiais ferromagnéticos
utilizando o quadro de Epstein**

FLORIANÓPOLIS

2024

OLIVER THIMONI ALVES

Análise de medições na caracterização de materiais ferromagnéticos
utilizando o quadro de Epstein

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito necessário para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Coorientador: Rodrigo Ferreira de Medeiros

Florianópolis, 17 julho de 2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Alves, Oliver Thimoni

Análise de medições na caracterização de materiais ferromagnéticos utilizando o quadro de Epstein / Oliver Thimoni Alves ; orientador, Nelson Jhoe Batistela, coorientador, Rodrigo Ferriera de Medeiros, 2024.

84 p.

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

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Caracterização magnética. 3. Quadro de Epstein. 4. Aços para fins elétricos. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. de Medeiros, Rodrigo Ferriera. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

OLIVER THIMONI ALVES

Esta Monografia foi julgada adequada para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica, sendo aprovada em sua forma final pela banca examinadora:

Prof. Miguel Moreto, Dr. Coordenador do
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela
Universidade Federal de Santa Catarina -
UFSC

Prof. Dr. Nelson Sadowski
Universidade Federal de Santa Catarina -
UFSC

Prof. Dr. Carlos Alexandre Corrêa
Wengerkievicz
Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC

Florianópolis, 17 de Julho de 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à minha família, principalmente aos meus pais que nunca mediram esforços para apoiar e incentivar todas as minhas escolhas pessoais e profissionais. À minha esposa, pelo amor, pelo companheirismo e pelo suporte durante todo o processo. Ao meu orientador, Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela, pela oportunidade, pela confiança e por todos os ensinamentos. Aos integrantes do grupo de pesquisa GRUCAD, pelo acolhimento. E agradeço o apoio da empresa Aperam South America e de seus colaboradores Gabriel Alves Mendonça e Edivânia Maria Martins Alves no desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho trata de um estudo sobre algumas das incertezas em processos de caracterização de materiais ferromagnéticos, com ênfase em aços laminados para fins elétricos, utilizando o instrumento Quadro de Epstein de 25 cm. A caracterização precisa desses materiais é importante para o projeto de máquinas elétricas eficientes, em que a redução das perdas magnéticas e a otimização da permeabilidade são características fundamentais buscadas no desenvolvimento ou no emprego de aços para fins elétricos. Os ensaios envolveram a avaliação de amostras de aços para fins elétricos laminados cortadas nos sentidos longitudinal e transversal ao sentido de laminação, realizados nas frequências de 1 Hz e 50 Hz, permitindo uma análise das propriedades magnéticas sob diferentes condições de operação. Por meio da caracterização das amostras, mostra-se a influência da anisotropia magnética decorrente do processo de laminação. Amostras cortadas no sentido longitudinal apresentaram menor consumo energético e maior permeabilidade em comparação com as cortadas no sentido transversal. Além disso, a análise de sensibilidade destacou a importância da seção magnética e do caminho magnético na estimativa precisa das propriedades magnéticas para este estudo. Limitações no processo de medição foram identificadas, tal como a falta de instrumentos para ensaios de obtenção de valores de massa específica pelo método do empuxo. Apesar das limitações inerentes ao uso de instrumentos como paquímetro e micrômetro na determinação da espessura do material, os resultados mostraram boa precisão, apresentando variações não significativas nos valores medidos de indução magnética devido às incertezas associadas. O estudo mostrou que a consideração das possíveis fontes de incerteza é essencial para a determinação de resultados com maior precisão e exatidão. As atividades foram realizadas no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina.

Palavras-chaves: Aços para fins elétricos; Caracterização magnética; Quadro de Epstein; Análise de incertezas.

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ_B	Incerteza associada à indução magnética
Δ_d	Incerteza associada à espessura
Δ_H	Incerteza associada ao campo magnético
Δ_i	Incerteza associada à corrente
Δ_l	Incerteza associada à largura
Δ_M	Incerteza associada à medida
Δ_m	Incerteza associada à massa
Δ_S	Incerteza associada à seção magnética
Δ_v	Incerteza associada à tensão
Δ_μ	Incerteza associada à permeabilidade
Δ_{lm}	Incerteza associada ao caminho magnético
μ	Permeabilidade magnética
μ_o	Permeabilidade magnética do vácuo
μ_r	Permeabilidade relativa
ν	Graus de liberdade
ϕ	Fluxo magnético
ρ_w	Densidade de perdas
B	Indução magnética
B_p	Indução magnética de pico
B_{max}	Indução máxima
C_o	Capacitor do filtro LC
d	Espessura
E	Link DC do conversor estático

$e(t)$	Força eletromotriz
$E_{aleatório}$	Erro aleatório
E_{max}	Erro máximo
$E_{sistemático}$	Erro sistemático
f	Frequência
f_o	Frequência de operação
FF	Fator de Forma
H	Campo magnético
$I_p(t)$	Corrente no enrolamento primário
$I_s(t)$	Corrente no enrolamento secundário
$I_{ex}(t)$	Corrente de excitação
l	Comprimento
l_m	Caminho magnético
L_o	Indutor do filtro LC
L_{dp}	Indutância de dispersão do enrolamento primário
L_{ds}	Indutância de dispersão do enrolamento secundário
L_{mag}	Indutância de magnetização
m	Massa
m_a	Massa efetiva
M_i	i-ésima indicação
m_t	Massa total
m_v	Massa específica
n	número de amostras
N_p	Número de voltas no enrolamento primário

N_s	Número de voltas no enrolamento secundário
R_p	Resistência do enrolamento primário
R_s	Resistência do enrolamento secundário
R_{fe}	Resistência proporcional às perdas no ferro
RM	Resultado da medida
RMI	Resultado da medida indireta
S	Seção magnética
s	Desvio padrão da amostra
T	Período
T_o	Período completo
U	Unidade da medida
u	Incerteza padrão
u_c	Incerteza combinada
u_R	Incerteza relativa
$V_p(t)$	Tensão no enrolamento primário
$V_s(t)$	Tensão no enrolamento secundário
w	Largura
W_t	Potência média
W_v	Densidade volumétrica de potência
\bar{M}	Valor médio das indicações no instrumento de medição
A	Ampère
A/m	Ampères por metro
g	grama
Hz	Hertz

kg/m^3 Quilograma por metro cúbico

m metro

mm milímetro

mm^2 milímetro quadrado

T Tesla

V Volt

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Colocação das lâminas no quadro de Epstein.	30
Figura 2 – Esquemático bancada GRUCAD.	36
Figura 3 – Quadro de Epstein.	37
Figura 4 – Vistas quadro de Epstein com medidas em mm.	37
Figura 5 – Pontos de medição em lâminas.	38
Figura 6 – Fluxo de ensaio de caracterização magnética.	39
Figura 7 – Circuito elétrico equivalente do quadro de Epstein sem indutância de compensação e carga.	41
Figura 8 – Simulação em elementos finitos de 1/4 do quadro de Epstein e modelos de caminhos magnéticos.	44
Figura 9 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas no sentido L de laminação.	51
Figura 10 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas no sentido T de laminação.	51
Figura 11 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas em ambos sentidos de laminação	51
Figura 12 – Medidas em quatro pontos das amostras cortadas no sentido L.	52
Figura 13 – Medidas em quatro pontos das amostras cortadas no sentido T.	52
Figura 14 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequências de 50 Hz com as equações (5.14) e (5.15) para o ensaio com o conjunto de amostras L.	54
Figura 15 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequências de 50 Hz com as equações (5.15) e (5.19) para o ensaio com o conjunto de amostras L e diferenças relativas.	54
Figura 16 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequência de 50 Hz com as equações (5.15) e (5.19) utilizando o valor nominal de m_v e valor medido de S para o ensaio com o conjunto de amostras L e diferenças relativas.	55
Figura 17 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequência de 1Hz e 50Hz para ensaio com o conjunto de amostras L.	56
Figura 18 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequência de 1 Hz e 50 Hz para ensaio com o conjunto de amostras T.	57
Figura 19 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequência de 1 Hz e 50 Hz para ensaio com o conjunto de amostras LT.	57
Figura 20 – Curvas de magnetização inicial das amostras.	59
Figura 21 – Curvas de densidade de perdas do material	60

Figura 22 – Curvas de permeabilidade relativa dos materiais	60
Figura 23 – Laço BH e formas de onda de indução e campo magnéticos na frequência de 50 Hz	61
Figura 24 – Curvas de magnetização inicial dos materiais com incertezas de medida. . .	62
Figura 25 – Curvas de densidade de perdas dos materiais com incertezas de medida. . .	63
Figura 26 – Curvas de permeabilidade relativa dos materiais com incertezas de medida.	63
Figura 27 – Curva de magnetização inicial e curva invertida de magnetização inicial para avaliação da sensibilidade das grandezas magnéticas.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comprimento dos circuitos magnéticos	44
Tabela 2 – Incertezas consideradas	47
Tabela 3 – Parâmetros medidos das amostras	49
Tabela 4 – Parâmetros nominais das amostras e diferença relativa	50
Tabela 5 – Parâmetros nominais das amostras	50
Tabela 6 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio L	53
Tabela 7 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio T	53
Tabela 8 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio LT	53
Tabela 9 – Diferença relativa para indução e permeabilidade relativa.	58
Tabela 10 – Valores máximos de densidade de perdas e permeabilidade relativa.	58
Tabela 11 – Incertezas Relativas	62

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	23
1.1	Motivação	23
1.2	Objetivos	24
1.2.1	Objetivos gerais	24
1.2.2	Objetivos específicos	24
1.3	Organização	25
2	CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS LAMINADOS	27
2.1	Resumo do Estado da Arte	27
2.2	Normas regulamentadoras	28
2.2.1	NBR5161	28
3	SOBRE NOÇÕES DE METROLOGIA APLICADA	31
3.1	Erros de medida	32
3.1.1	Erro Sistemático	32
3.1.2	Erro Aleatório	32
3.1.2.1	Incerteza-padrão e Incerteza relativa	33
3.2	Tipos de medição e propagação de incertezas	33
3.3	Considerações finais do capítulo	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1	Material utilizado	35
4.2	Bancada Utilizada	35
4.2.1	Quadro de Epstein	36
4.3	Método de caracterização eletromagnética das amostras	37
4.3.1	Medição das grandezas estruturais	38
4.3.2	Medição das grandezas elétricas	39
4.4		40
4.5	Considerações finais do capítulo	40
5	EQUACIONAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS MAGNÉTICAS	41
5.1	Grandezas magnéticas	41
5.1.1	Caminho médio magnético	43
5.2	Perdas magnéticas totais	44
5.2.1	Método da potência média	44
5.2.2	Método da densidade volumétrica de potência	45

5.3	Densidade de perdas	45
5.4	Considerações finais do capítulo	46
6	ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE INCERTEZAS RELACIONADAS	47
6.1	Considerações finais do capítulo	48
7	MEDIÇÕES, RESULTADOS E ANÁLISES	49
8	CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
	REFERÊNCIAS	67
	 ANEXOS	 69

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho se insere no contexto da caracterização de materiais ferromagnéticos, em específico de aços para fins elétricos laminados, utilizando o instrumento Quadro de Epstein de 25 cm e amostras laminares de aços de grãos não orientados. As atividades foram conduzidas no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD), do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. A busca por processos de caracterização de materiais ferromagnéticos com maiores precisões é importante para o projeto de dispositivos eletromagnéticos mais eficientes e sustentáveis. O Quadro de Epstein de 25 cm, reconhecido como padrão na indústria, permite medir as propriedades magnéticas de materiais laminados, em especial a permeabilidade e as perdas magnéticas. Ao focar em aços laminados para fins elétricos, este estudo visa contribuir para agregar conhecimentos provindos da caracterização do material, os quais poderão em um último fim refletir na otimização da eficiência energética e na redução de perdas oriundas do processo de magnetização.

Este trabalho foi motivado e parcialmente custeado pela empresa Aperam South America.

1.1 Motivação

O avanço tecnológico traz consigo o aumento na demanda de máquinas elétricas como também, por consequência, o aumento em sua cadeia produtiva. A procura por insumos necessários para a concepção de projetos otimizados, em custo e em eficiência, notadamente tem aumentado em importância. As máquinas elétricas, por sua vez, são projetadas e produzidas de diferentes maneiras e conforme seus objetivos. A escolha do material adequado é necessária para atender as especificações de projeto. Neste contexto, a caracterização de aços para fins elétricos apresenta desafios devido às suas microestruturas complexas e à necessidade de medições precisas. Se efetuadas de maneira indevida, podem invalidar os resultados adquiridos de modo a dificultar a tomada de decisão pelo engenheiro e, conseqüentemente, afetar o rendimento e o desempenho dos equipamentos em operação.

Órgãos reguladores desempenham um papel importante no estabelecimento de diretrizes para testes de caracterização, com o objetivo de garantir a confiabilidade e a precisão dos resultados (ABNT, 1977; IEC, 2008).

A caracterização de materiais ferromagnéticos utilizando o quadro de Epstein envolve incertezas que podem impactar a qualidade das medições e a modelagem do material subsequentemente, prejudicando a precisão de simulações e dos processos de projeto. As incertezas

decorrem de vários fatores, tais como a influência dos efeitos da magnetostricção no funcionamento do núcleo em diferentes frequências (ADAMYAN *et al.*, 2018; SILVA, 2019), a heterogeneidade das amostras de material dentro do quadro (ABABSA *et al.*, 2018), como também de erros nas medições magnéticas devido às limitações no processo de medição (DOBLER *et al.*, 2021). Essas incertezas podem levar a imprecisões em modelos de materiais, superdimensionamentos e desafios no controle de qualidade durante a produção de equipamentos eletromagnéticos. Compreender e quantificar essas incertezas é importante para melhorar a qualidade do processo de caracterização de materiais ferromagnéticos laminados e aumentar a confiabilidade das simulações e dos resultados nos processos de projeto e aplicações de máquinas elétricas.

Nesse contexto, há a necessidade de verificar a influência de incertezas presentes em processos de caracterização de materiais ferromagnéticos, em especial de aços para fins elétricos laminados, e como podem impactar os resultados de caracterização.

1.2 Objetivos

Nessa seção serão enunciados os objetivos do presente estudo que estão divididos em objetivos gerais e específicos.

1.2.1 Objetivos gerais

O principal objetivo do Trabalho de Conclusão de Curso é avaliar o processo de medição das propriedades magnéticas na caracterização de materiais ferromagnéticos. Para tanto, emprega-se o instrumento padrão Quadro de Epstein de 25 cm para avaliação e caracterização de aços laminados para fins elétricos.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos metodológicos são:

- Verificar a distribuição estatística dos parâmetros dimensionais de amostras;
- Obter de maneira indireta a massa específica dos materiais (m_v);
- Comparar resultados entre métodos de determinação da densidade de perdas (ρ_w);
- Realizar caracterização eletromagnética dos materiais ferromagnéticos utilizados;
- Realizar análises de sensibilidade das equações de determinação das grandezas magnéticas;

- Realizar análises de resultados;
- Documentar os desenvolvimentos e redigir o texto final do TCC.

1.3 Organização

O presente trabalho está organizado da seguinte forma. O Capítulo 2 aborda conceitos relacionados à caracterização de materiais ferromagnéticos laminados e um resumo do estado da arte. O Capítulo 3 apresenta conceitos relacionados à obtenção de medidas, bem como apresentação de um método para propagação de incertezas. O Capítulo 4 trata dos materiais e métodos utilizados no estudo. O Capítulo 5 apresenta o equacionamento proposto para obtenção das grandezas magnéticas, como também para cálculo da densidade de perdas. O Capítulo 6 aborda a definição das incertezas consideradas no estudo, bem como o método para realizar a análise de sensibilidade. O Capítulo 7 contém uma apresentação dos resultados obtidos e o Capítulo 8 apresenta as considerações finais.

2 CARACTERIZAÇÃO DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS LAMINADOS

No projeto de máquinas elétricas, um dos fatores que influenciam as características dos equipamentos eletromagnéticos é o material utilizado na confecção de seus núcleos.

Quando um novo material é desenvolvido nas aciarias, as diversas etapas no procedimento de manufatura, como a adição de elementos químicos na liga de aço, impactam nas propriedades tanto físicas quanto magnéticas do metal (ANJOS, 2010; STOIAN *et al.*, 2023). Assim, para lançar o produto no mercado e aplicá-lo na concepção de máquinas elétricas, torna-se necessário o caracterizar de modo que suas propriedades magnéticas, como permeabilidade e densidade de perdas, sejam determinadas.

Na indústria e na pesquisa acadêmica, a caracterização de materiais é realizada através de ensaios em equipamentos comerciais certificados ou em bancadas de experimentação desenvolvidas para esse propósito. Ademais, normas regulamentadoras descrevem os procedimentos para o ensaio, o que garante repetibilidade e adequação para comparações interlaboratoriais.

2.1 Resumo do Estado da Arte

O processo de caracterização de materiais ferromagnéticos é ancorado nas leis que regem o eletromagnetismo, as quais foram organizadas matematicamente por James Clerk Maxwell. Ainda sobre o processo de caracterização, conforme abordado por Elias (ELIAS, 2014), para classificar os materiais ferromagnéticos é necessário realizar a análise da permeabilidade magnética e das perdas oriundas do processo de magnetização. Os ensaios de caracterização utilizando o quadro de Epstein têm início no final do séc. XIX, com o desenvolvimento de um quadro por Josef Epstein (EPSTEIN, 1900). Após alguns anos, com a adaptação realizada por Burgwin (BURGWIN, 1936), que modificou o instrumento para como ele é conhecido na atualidade (25 cm), foram desenvolvidos ensaios padronizados utilizando o instrumento modificado.

Apoiando-se na teoria eletromagnética, é possível obter os valores das perdas magnéticas totais em aços para fins elétricos através da integração da curva BH formada pelos valores instantâneos das grandezas variando no tempo indução magnética B e campo magnético H em um ciclo elétrico (BASTOS, 2008). Com objetivo de classificar as origens do consumo energético no material, um modelo empírico foi proposto por Steinmetz (STEINMETZ, 1892). Tradicionalmente, as perdas magnéticas são segregadas em estáticas e dinâmicas, referindo-se às perdas por histerese e por correntes induzidas, respectivamente. Entretanto, experimentos posteriores (BERTOTTI, 1988) demonstraram que o modelo proposto não contemplava as perdas dinâmicas em sua totalidade e, portanto, uma nova componente denominada perdas

excedentes foi adicionada. Batistela propôs uma metodologia para separação e encontro das constantes relacionadas à cada parcela das perdas magnéticas (BATISTELA, 2001).

O método para obtenção dos parâmetros de caracterização de materiais ferromagnéticos através de ensaios são orientados pelas instituições internacionais *American Society for Testing and Materials* (ASTM), *Japanese Industrial Standards* (JIS) e *International Electrotechnical Commission* (IEC) e, no âmbito nacional, pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Todavia, a normatização traz consigo uma rigidez no processo associada à utilização apenas de equipamentos analógicos de alto custo, de difícil obtenção, manutenção e calibração. A não inclusão dos equipamentos digitais pela norma limita o modo de realizar a aquisição de dados, além de minimizar a possibilidade de outras análises *a posteriori*.

Assim, aliado à metrologia e com o propósito de enriquecer o estado da arte no que tange a caracterização de materiais ferromagnéticos, este trabalho busca avaliar influências de incertezas em medições na caracterização de materiais ferromagnéticos.

2.2 Normas regulamentadoras

No que diz respeito à regulamentação de ensaios de caracterização de materiais ferromagnéticos laminados, existem normas que fornecem diretrizes de acordo com o tipo de equipamento utilizado e, inclusive, conforme intervalo de frequências de operação aplicadas. Assim, apresentam-se as normas cujos objetivos se alinham com o presente estudo. A abordagem se limita às normas que utilizam o quadro de Epstein de 25 cm e operação até 400 Hz. As seguintes normas estão neste contexto: ASTM A343, IEC 60404-2, JIS C2550 e NBR5161 (MENDES, 2004). No entanto, este trabalho será fundamentado apenas na norma brasileira NBR5161.

A avaliação da norma será pontual no que tange os procedimentos de ensaio, como obtenção de grandezas de interesse e métodos empregados. Não serão considerados o modo de aquisição e os instrumentos de medidas recomendados para os ensaios. Esse processo será realizado de maneira alternativa e o procedimento será descrito no Capítulo 4.

2.2.1 NBR5161

A norma brasileira NBR5161, com o título "Produtos laminados planos de aço para fins elétricos Verificação das propriedades", foi apresentada pela ABNT no ano de 1977 e revalidada em maio de 1996. Ela se apoia nos documentos complementares NBR9025, NBR9026 e ISO/IEC51 (ABNT, 1977). A norma descreve os procedimentos de acordo com comprimento do quadro utilizado, bem como apresenta o diagrama de ligações dos equipamentos e dos instrumentos de medição. A norma não se limita apenas a descrever os procedimentos de

ensaio, mas também fornece as equações necessárias para a determinação dos valores das grandezas magnéticas no Sistema Internacional de Unidades (SI).

Referente aos pontos de interesse do estudo, destacam-se:

- Medição de espessura (d) em quatro pontos distintos, com distância mínima das bordas de 40 mm. O instrumento deve ter exatidão de 0,01 mm. Procedimentos para obtenção de comprimento (l) e largura (w) das lâminas não são abordados.
- O valor de massa específica do material (m_v) deve ser determinada por meio de ensaios utilizando o método do empuxo ou da resistividade. No caso de perícia, deve-se utilizar o método do empuxo exclusivamente.
- Em ensaios realizados com corrente alternada, deve-se manter a indução (B) na forma de onda sinusoidal. Para garantir esta conformidade, avaliam-se valores de fator de forma (FF) da tensão induzida no enrolamento secundário do quadro de Epstein, que devem estar dentro do intervalo $1,11 \pm 1\%$.
- Apresenta o modo de colocação das lâminas no quadro de Epstein, indicado de acordo com a Figura 1, contemplando os sentidos de laminação no caso de amostras estampadas em sentidos diferentes em relação ao sentido de laminação.
- Aborda os limites das dimensões de largura ($30 \pm 0,2$ mm) e comprimento ($280 \leq l \leq 308$ mm), sugerindo comprimento ótimo (305 mm) para os corpos de prova.
- A seção magnética (S) é determinada pelo emprego da equação seguinte, no qual m_t é a massa total de material.

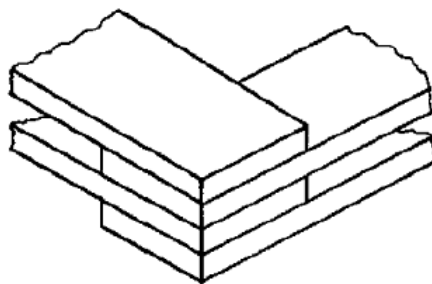
$$S = \frac{m_t}{4l \cdot m_v} \quad (2.1)$$

- Convencionalmente, adota o valor de 0,94 m para o comprimento efetivo do circuito magnético (l_m).
- Em consequência ao item anterior, a massa efetiva (m_a) é dada pela equação seguinte.

$$m_a = \frac{l_m \cdot m_t}{4l} \quad (2.2)$$

O método do empuxo é um procedimento no qual necessita-se de uma balança hidrostática para determinação da densidade. As amostras devem estar isentas de revestimento e/ou de qualquer tipo de matéria (graxa e/ou ferrugem). Quando aplicadas neste tipo de ensaio, elas são consideradas deterioradas. A norma estima que o desvio-padrão deste procedimento está na ordem de 0,2% a 0,3% (ABNT, 1977).

Figura 1 – Colocação das lâminas no quadro de Epstein.



Adaptado de (ABNT, 1977).

A norma abrange as equações para cálculos das perdas magnéticas como também, descreve o procedimento de separação de perdas em perdas estáticas e perdas dinâmicas. No entanto, o método apresentado na norma não representa as perdas segregadas em sua totalidade (BATISTELA, 2001; MENDES, 2004).

Os equacionamentos propostos na norma NBR5161 relacionados à determinação das perdas magnéticas serão desconsiderados nesse capítulo. Eles são particularizados para os instrumentos de medições descritos na norma. O equacionamento proposto para encontro das grandezas magnéticas será apresentado no Capítulo 5.

3 SOBRE NOÇÕES DE METROLOGIA APLICADA

Neste capítulo serão abordadas noções básicas de metrologia com ênfase no processo de medição e propagação de incertezas. Serão discutidos os conceitos sobre medida, erros e seus tipos, o que é incerteza-padrão e incerteza relativa. Por fim, um método de propagação de incertezas para variáveis aleatórias independentes será apresentado. Os conceitos abordados neste capítulo são importantes para as análises futuras neste trabalho. O conteúdo abordado nesta seção é integralmente fundamentado no livro Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial (ALBERTAZZI; SOUZA, 2013). Um maior aprofundamento dos conceitos aqui mencionados pode ser encontrado nesta fonte na qual o capítulo foi baseado.

Segundo Albertazzi e Souza, medir é um procedimento experimental que determina o valor de uma grandeza física estabelecida e reconhecida por padrões internacionais ou locais. A descrição quantitativa de um fenômeno ou de um processo é realizada exclusivamente por meio de medições, sendo a grandeza física à qual o procedimento de medição é aplicado denominada mensurando.

O mensurando pode ser descrito conforme sua característica, podendo ser classificado como variável ou invariável. No entanto, esta é uma definição um pouco subjetiva, pois depende do tipo de análise a se realizar. Por exemplo, medidas de dimensões como comprimento, diâmetro e espessura podem ser classificadas como mensurando variáveis, caso seja considerada a dilatação térmica dos materiais.

As medições são efetuadas por meio de instrumentos de medição ou, quando realizadas por métodos mais complexos, sistemas de medição. Todavia, é importante reconhecer que incertezas associadas às medidas permeiam o processo. Portanto, representa-se uma medida conforme equação (3.1). Nesta equação, RM corresponde ao resultado da medida, \bar{M} ao valor médio das indicações no instrumento de medição, Δ_m à incerteza associada ao processo de medição e U à unidade da grandeza medida.

$$RM = (\bar{M} \pm \Delta_m) U \quad (3.1)$$

Denomina-se fonte de incerteza qualquer fator ou componente no processo de medição, experimento ou modelo matemático que possa introduzir variações nos resultados obtidos e, conseqüentemente, incerteza nos dados e/ou nas conclusões. Em outras palavras, é um aspecto do sistema ou do processo que não pode ser precisamente determinado ou controlado, levando a uma falta de confiança nos resultados finais. Desse modo, a incerteza Δ_m também é uma indicação de confiabilidade da medida.

As fontes de incerteza são variadas e incluem imprecisão nos equipamentos de medição, flutuações nas condições ambientais, erros experimentais, limitações no conhecimento do

fenômeno, variações intrínsecas nos materiais, e outros fatores. Identificar e quantificar essas fontes de incertezas é importante para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados obtidos em experimentos, medições ou simulações.

3.1 Erros de medida

Para realizar uma medição perfeita seria necessário um instrumento ou um sistema de medição que apresente o valor real do mensurando, não impondo limitações ao operador, e que seja robusto a perturbações nas condições ambientais, pois, esses fatores induzem, em maior ou menor grau, erros no processo de medição. No entanto, erros são inerentes a todo processo de medição. Ao compreender suas causas e sua natureza, pode ser possível mitigar ou ao menos quantificar a extensão dos seus efeitos.

O erro total de uma medida pode ser subdividido em duas componentes: o erro sistemático e o erro aleatório

3.1.1 Erro Sistemático

Erro sistemático é todo aquele que ocorre de maneira previsível a cada medida. Sua causa pode estar relacionada com a baixa qualidade e/ou com as não idealidades dos instrumentos ou dos sistemas de medição. É denominado também como tendência de medição. A tensão de *offset* em um amplificador operacional, configurado como seguidor de tensão (*buffer*) em um sistema de medição hipotético, é um exemplo de erro sistemático em um processo de obtenção de valores de tensão elétrica. Essa parcela do erro, entretanto, deve ser corrigida pelo operador por meio de uma função erro. Ainda sobre o exemplo anterior, se o amplificador possuir um valor de *offset* positivo basta identificá-lo e subtraí-lo do valor indicado pelo instrumento de medição em cada medida.

Normalmente, para quantificação deste tipo de erro é necessário ter conhecimento prévio do valor do mensurando (seja ele um objeto de referência ou por análise matemática), além de realizar múltiplas medições neste objeto para observar a tendência de medição.

3.1.2 Erro Aleatório

O segundo tipo, conhecido como erro aleatório, é decorrente de flutuações aleatórias que alteraram o valor indicado nos instrumentos ou nos sistemas em cada medida realizada. Como o próprio nome sugere, não é possível prevê-lo. Essas perturbações (flutuações aleatórias) se comportam como variáveis aleatórias e, portanto, limites através de modelos matemáticos podem ser estimados.

O erro aleatório também é considerado um marcador de dispersão da medida. A dispersão quantifica o intervalo máximo no qual a medida pode variar do seu valor médio.

Na estatística, dispersão é sinônimo para desvio-padrão e, conseqüentemente, pode ser quantificada. Entretanto, seria necessária uma infinidade de medidas tornando o processo demorado e inviável. Sendo assim, utiliza-se como estimativa o desvio-padrão da amostra (s) conforme equação (3.2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}{\nu}} \quad (3.2)$$

$$\nu = n - 1 \quad (3.3)$$

Nas equações (3.2) e (3.3), M_i é a i -ésima indicação, \bar{M} a indicação média, ν o índice de graus de liberdade e n o número de medidas realizadas.

3.1.2.1 Incerteza-padrão e Incerteza relativa

Serão abordados nesta seção conceitos de parâmetros que estão relacionados diretamente com o erro aleatório, a incerteza-padrão (u) e a incerteza relativa (u_R). Com esses indicadores é possível quantificar a intensidade do erro aleatório em uma medida, ou em um instrumento ou em um sistema de medição.

Quando o desvio-padrão da amostra é determinado por meio de sucessivas medições de um mesmo mensurando, ele corresponde à incerteza-padrão da medida (u), também denominado de desvio-padrão experimental. Conseqüentemente, obtém-se a igualdade conforme (3.4). A incerteza-padrão é uma estimativa do desvio padrão do erro aleatório.

$$u = s \quad (3.4)$$

Utilizando a ideia de incerteza-padrão, define-se o conceito de incerteza-padrão relativa (u_R) como a razão entre a incerteza-padrão e valor médio do mensurando. Por exemplo, a equação (3.5) é a incerteza relativa do mensurando "X".

$$u_R(X) = \frac{u(X)}{X} \quad (3.5)$$

3.2 Tipos de medição e propagação de incertezas

A determinação da magnitude de uma grandeza pode ser realizada por meio de duas abordagens, de maneira direta ou indireta.

Uma medida é obtida de forma direta quando o instrumento de medição indica o valor da grandeza de interesse, ou seja, do mensurando. A indicação indireta ocorre quando o valor da grandeza de interesse é determinado através de cálculos realizados por meio de medidas de outras grandezas relacionadas ao fenômeno, denominadas grandezas de entrada. Por exemplo, as dimensões de um objeto são obtidas de forma direta enquanto que a sua densidade de forma indireta, uma vez que são necessárias as medidas de massa e volume para encontrá-la.

Na determinação das grandezas de entrada, os valores medidos também apresentam incertezas de medições, portanto, para que se tenha conhecimento do valor da incerteza de uma medida indireta, é necessário realizar a propagação de incertezas associadas às grandezas de entrada. O método de propagação de incertezas que será apresentado é válido apenas para grandezas de entrada que são variáveis aleatórias independentes, ou seja, não correlacionadas. O método para propagação de incertezas de grandezas de entradas não correlacionadas é descrito na sequência.

Seja RMI o resultado da medição indireta de uma grandeza de interesse determinada por meio de uma função matemática (\mathcal{F}) contínua e derivável. Seja essa função \mathcal{F} dependente das grandezas de entradas (X_1, \dots, X_n), como apresentada em (3.6). Obtém-se o quadrado do valor da incerteza combinada (u_c^2) como o valor do somatório dado pela equação (3.7). A incerteza propagada é determinada, portanto, por meio da equação (3.8).

$$RMI = \mathcal{F}(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (3.6)$$

$$u_c^2(RMI) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial \mathcal{F}}{\partial X_i} u(X_i) \right)^2 \quad (3.7)$$

$$u_c(RMI) = \sqrt{u_c^2(RMI)} \quad (3.8)$$

3.3 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados conceitos básicos de metrologia com ênfase no processo de medição e na propagação de incertezas. Foram discutidos os conceitos sobre medida, erros e seus tipos, o que é incerteza-padrão e incerteza relativa. Por fim, um método de propagação de incertezas para variáveis aleatórias independentes foi apresentado. No próximo capítulo serão abordados os materiais e os métodos utilizados neste trabalho.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção serão descritos os procedimentos adotados para realização dos ensaios, a bancada e os materiais utilizados no desenvolvimento do presente estudo. A seção está organizada em Material utilizado e Método empregado para a obtenção da caracterização de materiais. No que se refere ao Método de caracterização eletromagnética das amostras, subdivide-se em Medição das grandezas estruturais e Medição das grandezas elétricas. Definem-se como grandezas estruturais as grandezas massa, comprimento, largura e espessura.

4.1 Material utilizado

Os ensaios foram realizados em aços laminados, especificamente em lâminas de aço silício de grãos não orientados. Utilizaram-se amostras com espessura nominal de 0,5 mm cortadas nos sentidos longitudinal (L) e transversal (T) referenciados ao sentido de laminação. As dimensões médias de largura e espessura foram obtidas por meio dos instrumentos paquímetro e micrômetro digital, respectivamente. A massa média do material foi determinada através de uma balança de precisão da marca *Ohaus Adventurer*, modelo ARC120. Utilizou-se uma bancada experimental para caracterização magnética do material, a qual será descrita em sequência.

4.2 Bancada Utilizada

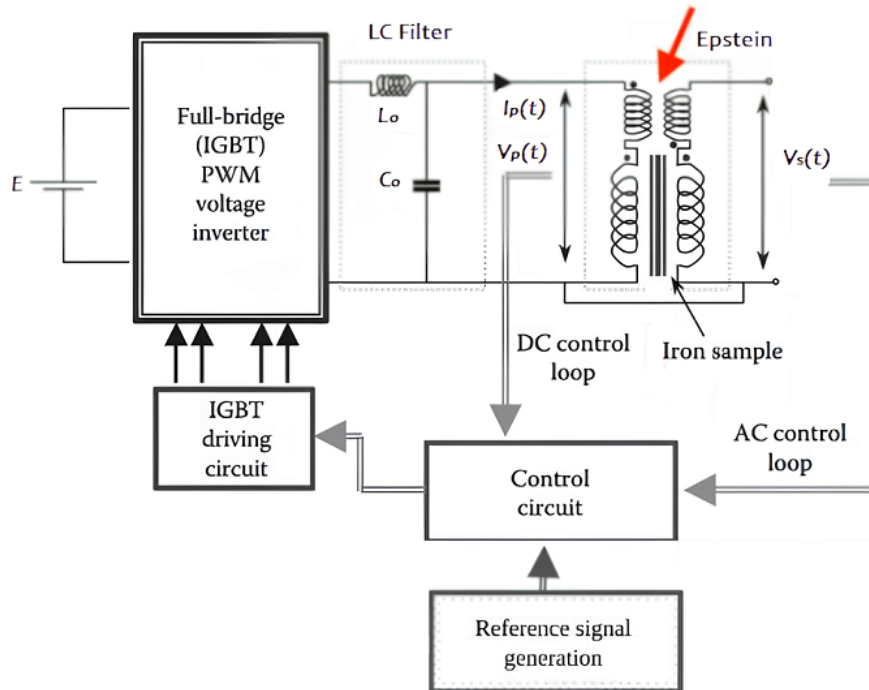
Para realizar os ensaios no GRUCAD, foi utilizada uma bancada especialmente projetada para a caracterização de materiais ferromagnéticos, a qual foi desenvolvida e empregada em trabalhos anteriores (BATISTELA, 2001; MENDES, 2004; MAILHÉ, 2018).

O diagrama esquemático do sistema completo está representado na Figura 2. A bancada experimental é constituída por fonte de alimentação, inversor de tensão, filtro LC, malha de controle e quadro de Epstein de 25 cm. A malha fechada é responsável por manter no material a forma de onda da indução sinusoidal por meio do controle da forma de onda da tensão induzida no enrolamento secundário do quadro. Na Figura 2, E representa o *link* DC do conversor estático, L_o e C_o o indutor e capacitor do filtro LC, respectivamente $V_p(t)$ a tensão do primário, $I_p(t)$ a corrente do primário e $V_s(t)$ a tensão do secundário.

A medição dos sinais é realizada por meio de sondas de tensão (*Tektronix P6139A*) e de corrente (*Tektronix TCP0030*), com as formas de onda visualizadas em um osciloscópio (*Tektronix DPO4104*) conectado ao *hardware* NI-USB6212 da *National Instruments* (NI). A conexão entre a placa da NI e o osciloscópio possibilita o processamento em tempo real dos

sinais adquiridos por meio de *Virtual Instruments* (VI) operando no *software LabVIEW*, bem como a documentação dos dados adquiridos.

Figura 2 – Esquemático bancada GRUCAD.

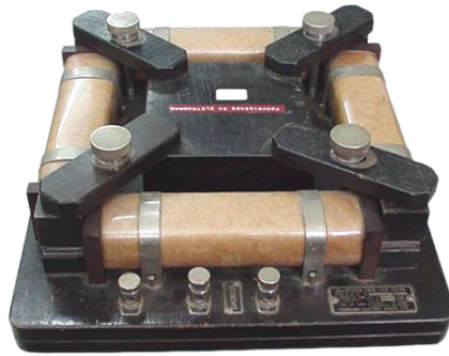


Adaptado de (BATISTELA, 2001).

4.2.1 Quadro de Epstein

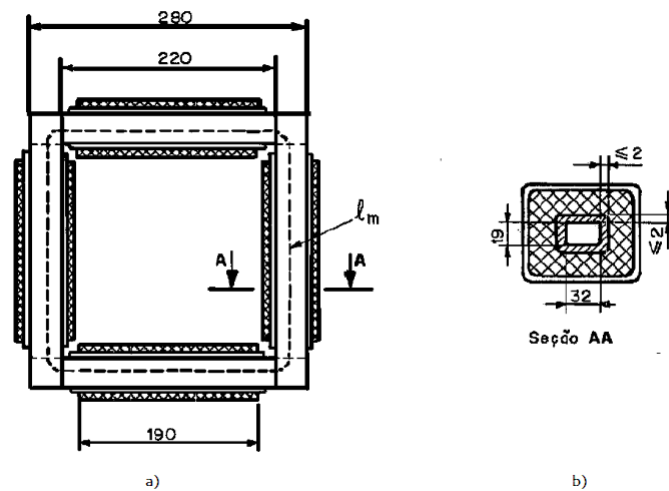
Amplamente utilizado em ensaios de caracterização de materiais ferromagnéticos, o quadro de Epstein é um dispositivo semelhante a um transformador com o enrolamento secundário em aberto, no qual as amostras a serem ensaiadas compõem o circuito magnético. Existem modelos que variam no comprimento e na quantidade de espiras. Além disso, o quadro pode ser desenvolvido conforme as condições de ensaio necessárias. No entanto, condições construtivas devem ser respeitadas (ABNT, 1977). Nos ensaios realizados para este estudo, utilizou-se o dispositivo de 25 cm da marca *Yokogawa*, o qual possui 700 espiras em cada um dos enrolamentos, primário e secundário. Segundo a norma, este equipamento é capaz de operar em frequências de até 400 Hz. Uma imagem do quadro de Epstein empregado é mostrada na Figura 3, e a projeção do corte longitudinal (vista superior) e a seção transversal de um braço do equipamento são esquematizadas nos desenhos das Figuras 4a e 4b, respectivamente.

Figura 3 – Quadro de Esptein.



Adaptado de (BATISTELA, 2001).

Figura 4 – Vistas quadro de Esptein com medidas em mm.



Adaptado de (ABNT, 1977).

4.3 Método de caracterização eletromagnética das amostras

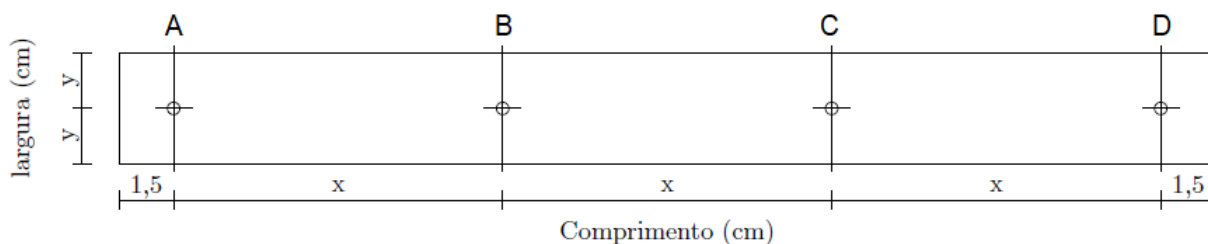
Os métodos adotados nos ensaios foram descritos parcialmente na seção 2.2 e serão retomados nesta seção quando necessário. As grandezas relacionadas neste estudo foram obtidas de modo experimental, empregando as grandezas estruturais medidas através do método direto. Há uma exceção para a medição do comprimento, o qual não foi medido devido à limitação dos instrumentos de medida disponibilizados no GRUCAD que não possuem escala adequada para verificar possíveis variações de medida. Portanto, para essa grandeza, utilizou-se o valor nominal do comprimento das amostras (305 mm). Conforme os objetivos propostos para este trabalho (seção 1.2), a obtenção da massa específica foi realizada por meio de medições indiretas para posterior comparação de resultados. Os procedimentos para determinação das medições das grandezas estruturais e das grandezas elétricas serão descritos a seguir separadamente, conforme a sequência em que o ensaio é conduzido.

4.3.1 Medição das grandezas estruturais

O processo de medição das grandezas estruturais segue um padrão estabelecido. Inicialmente, as amostras são separadas em dois agrupamentos definidos pelo sentido de corte, nos quais cada lâmina do agrupamento é numerada com objetivo de identificar o grupo de amostras empilhadas em cada braço do quadro de Epstein. Na sequência, as lâminas são avaliadas, uma a uma, para verificação de existência exagerada de rebarbas ou alguma possível deformação mecânica como torções ou dobras.

Como já mencionado, utiliza-se um paquímetro para medições de largura e um micrômetro digital para medições de espessura. A determinação da espessura e da largura para cada lâmina é realizada por meio de medidas em quatro pontos. Para cada amostra individual, tanto para a medição de espessura quanto para a de largura, assume-se o valor médio das quatro medidas. Com os valores médios de largura e de espessura de cada lâmina, obtém-se então os valores médios de largura (\bar{w}) e de espessura (\bar{d}) para todo o conjunto de amostras utilizadas no respectivo ensaio no quadro de Epstein. Também, as incertezas padrão de cada conjunto de lâminas são determinadas. A norma NBR5161 descreve apenas o procedimento para obtenção da espessura e não apresenta um procedimento para a medição da largura. Neste presente trabalho, leva-se em conta também padronizar o procedimento de medição da largura. Para a medição de largura e de espessura em cada lâmina, mantém-se as mesmas localizações dos pontos de medição, conforme indicados na Figura 5. Na Figura 5, as linhas verticais determinam os locais para medição com o paquímetro (largura) e os círculos indicam os pontos para medição com micrômetro (espessura).

Figura 5 – Pontos de medição em lâminas.



Elaborado pelo autor.

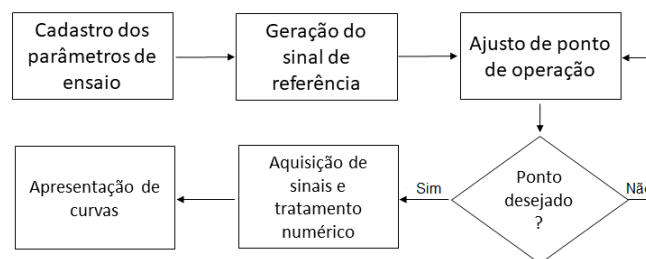
Após as medições e definição das dimensões médias de cada conjunto, as amostras são pesadas em balança de precisão com resolução de 0,01 g. Cada amostra é pesada, e com os valores de massas individuais se obtém o valor da massa média (\bar{m}). Também, realiza-se a medição da massa total do conjunto de amostras utilizado. Com o conhecimento dos valores das grandezas estruturais, determina-se o valor da massa específica do material por meio de medição indireta (\bar{m}_v) e propagação de incerteza associada.

4.3.2 Medição das grandezas elétricas

Na seção 4.2, apresentaram-se brevemente os equipamentos utilizados no presente estudo. Nesta seção é descrito o método de medição das grandezas elétricas do sistema, bem como a aquisição e o tratamento de dados. Os ensaios de caracterização magnética de materiais podem ser conduzidos após o conhecimento dos valores das grandezas estruturais.

Inicialmente, posicionam-se as amostras no quadro de Epstein. Nos ensaios que utilizam amostras cortadas em ambos os sentidos (longitudinal e transversal), as amostras são colocadas nos braços alternando o sentido de corte da amostra por braço do quadro (ABNT, 1977). Definem-se a frequência de operação (f_o) e o valor máximo de indução magnética (B_{max}), respeitando os limites dos equipamentos. Em seguida, inicia-se o ensaio de fato, conforme o fluxograma de ensaio desenvolvido apresentado na Figura 6. Neste ponto do método de caracterização, os processos são realizados por intermédio de VIs. Primeiramente, cadastram-se os valores dos parâmetros (m_v , m , S , l , w , d) do conjunto de amostras a ser ensaiado. Na sequência, gera-se o sinal de referência com o valor de amplitude necessário para alcance do ponto de operação desejado.

Figura 6 – Fluxo de ensaio de caracterização magnética.



Elaborado pelo autor.

Conforme orientação das diretrizes constante em norma, as amostras devem estar desmagnetizadas. A existência de uma magnetização residual no material desvia os resultados, deixando possivelmente o laço BH medido não simétrico. Assim, para evitar a influência de uma possível magnetização do material, pode-se iniciar o ensaio pelo ponto de indução de pico (B_p) próximo ou na região de saturação do material. Com este cuidado, não se tem a necessidade de desmagnetizar as amostras.

Na continuidade do ensaio, verifica-se se o ponto de operação é o desejado. As formas de onda de tensão e de corrente são observadas em um osciloscópio e, após o processo de aquisição das grandezas elétricas, as formas de onda de campo e indução magnética são mostradas em um monitor auxiliar conectado a um computador hospedeiro do *LabVIEW*. As formas de onda das grandezas magnéticas são obtidas após o tratamento dos sinais realizado

em tempo real por VIs específicos. Quando o ponto desejado é atingido, verifica-se o fator de forma da tensão e, caso esteja dentro do intervalo $(1,11 \pm 1\%)$, armazenam-se as grandezas elétricas e magnéticas do ponto de operação.

Após a obtenção das grandezas de interesse nos pontos de operação desejados, os resultados do ensaio, bem como as formas de ondas adquiridas, são registrados em arquivos no formato ".txt". Desse modo, as curvas de caracterização, de permeabilidade relativa e de densidade de perdas são geradas através de algoritmos desenvolvidos na linguagem de programação *Python*. Após a realização desses procedimentos, encerra-se a sessão de ensaio.

4.4

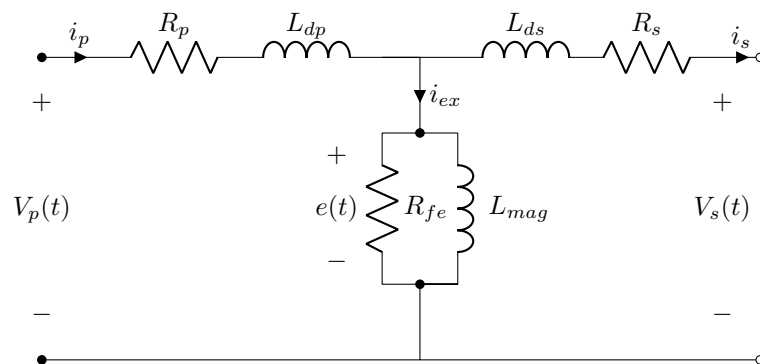
4.5 Considerações finais do capítulo

Nesse capítulo foram apresentados os Materiais e o Método de caracterização eletromagnética das amostras aplicados no presente estudo, com o Método subdividido em Medição das grandezas estruturais e Medição das grandezas elétricas. No próximo capítulo será abordado o equacionamento proposto para determinação das grandezas magnéticas.

5 EQUACIONAMENTO PARA DETERMINAÇÃO DAS GRANDEZAS MAGNÉTICAS

Conforme mencionado anteriormente, o quadro de Epstein é um dispositivo semelhante a um transformador elétrico, com o enrolamento secundário em aberto, no qual as amostras a serem ensaiadas compõem o circuito magnético. O número de espiras do enrolamento primário é igual ao número de espiras do enrolamento secundário. Desconsiderando as suas indutâncias de compensação de fluxo disperso, o seu circuito elétrico equivalente pode ser representado conforme a Figura 7, na qual $V_p(t)$ representa a tensão no primário, $V_s(t)$ a tensão no secundário, $i_p(t)$ a corrente no primário, $i_s(t)$ a corrente no secundário, $i_{ex}(t)$ a corrente de excitação, R_p a resistência de enrolamento primário, R_s a resistência de enrolamento secundário, L_{dp} a indutância de dispersão do enrolamento primário, L_{ds} a indutância de dispersão do enrolamento secundário e $e(t)$ a força contraeletromotriz (ou tensão induzida). Os componentes do ramo de excitação, R_{fe} e L_{mag} , representam a resistência associada às perdas no material e a indutância de magnetização, respectivamente.

Figura 7 – Circuito elétrico equivalente do quadro de Epstein sem indutância de compensação e carga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 Grandezas magnéticas

A modelagem do sistema pode ser realizada através das equações que regem as leis do eletromagnetismo na forma integral, aplicando as leis de Ampère (5.1) e Faraday (5.2) (BASTOS, 2008). Nas equações (5.1) e (5.2), N_p é o número de espiras do enrolamento primário, N_s é o número de espiras do enrolamento secundário, $i_p(t)$ é a corrente no enrolamento primário e ϕ é o fluxo magnético. O fluxo magnético, por sua vez, é obtido de acordo com a equação (5.3). Por convenção, as letras em negrito denotam grandezas vetoriais.

$$\oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = N_p i_p(t) \quad (5.1)$$

$$e(t) = -N_s \frac{d\phi}{dt} \quad (5.2)$$

$$\phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} \quad (5.3)$$

Uma vez que as dimensões da seção transversal magnética (S), bem como o comprimento médio do caminho magnético no núcleo (l_m), são definidos, as grandezas campo magnético ($H(t)$) e indução magnética ($B(t)$) podem ser obtidas aplicando as equações (5.4) e (5.5), respectivamente.

$$H(t) = \frac{N_p i_p(t)}{l_m} \quad (5.4)$$

$$B(t) = \frac{1}{N_s S} \int e(t) dt \quad (5.5)$$

O Campo magnético e a indução estão relacionados pelo meio que os permeia, representado pela permeabilidade magnética (μ), conforme a equação (5.6). A permeabilidade relativa do material (μ_r) é definida pela equação (5.7), na qual μ_0 representa o valor da permeabilidade magnética do vácuo.

$$B = \mu H \quad (5.6)$$

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (5.7)$$

A determinação da seção magnética S , área pela qual o fluxo atravessa, é dada pela equação (5.8), nos quais, m_t é a massa total, l o comprimento e m_v a massa específica. A massa total m_t é calculada conforme equação (5.9), em que n é a quantidade de amostras utilizadas no ensaio.

$$S = \frac{m_t}{4lm_v} \quad (5.8)$$

$$m_t = n\bar{m} \quad (5.9)$$

Quando a massa específica é determinada de maneira indireta (\bar{m}_v), ou seja, por meio da equação (5.10), a equação (5.8) se torna (5.11).

$$\bar{m}_v = \frac{\bar{m}}{l\bar{w}\bar{d}} \quad (5.10)$$

$$S = \frac{n\bar{w}\bar{d}}{4} \quad (5.11)$$

5.1.1 Caminho médio magnético

A norma NBR5161 não deixa evidente a razão pela qual o valor do caminho magnético (l_m) é definido como 0,94 m. Estudos apontam que o fluxo magnético não é uniforme na totalidade do circuito magnético, sobretudo nos locais onde há sobreposições das amostras e pode variar de acordo com as condições de ensaio, tais como o ponto de operação, o sentido de corte da amostra e a orientação dos grãos (QINGYI *et al.*, 2014; TERSARIOL, 2017).

Batistela apresentou o resultado de uma simulação do comportamento do fluxo magnético no canto do quadro de Epstein para um material de grão não orientado utilizando o método de cálculo de campos por elementos finitos. Conforme pode ser observado na Figura 8a (BATISTELA, 2001), ocorre uma não homogeneidade na distribuição do fluxo magnético nos cantos do quadro de Epstein.

Além disso, o comprimento efetivo do caminho magnético não é um valor constante e pode variar com base em fatores como frequência, indução magnética, tamanhos dos grãos da estrutura, permeabilidade do material e anisotropia (MARKETOS *et al.*, 2008). Os autores sugerem que o caminho magnético pode variar entre os valores de 0,66 m até 1,04 m, i.e., sendo um fenômeno com influência significativa. Quando a caracterização é realizada em determinadas faixas de indução e de campo magnéticos, no intervalo cujas induções são superiores a 0,05 T e os campos magnéticos inferiores ao campo necessário para atingir o início da saturação (campo próximo ao joelho da curva BH), as variações nos valores de l_m são na ordem de 3% a 10% (CHEN; ZHU, 2022).

Diante da complexidade do fenômeno, três aproximações para o caminho magnético efetivo foram realizadas e podem ser verificadas nas curvas apresentadas na Figura 8b, na qual a linha vermelha é a diagonal do quadrado de lado $w/2$, o arco azul é $1/4$ de circunferência de raio w e a linha verde é a diagonal do quadrado de lado w . Considera-se o fluxo magnético uniformemente distribuído na seção magnética. Assim, diminui-se o comprimento do caminho magnético geométrico de 1 m para compensar os efeitos de borda. É apresentado na Tabela 1 o comprimento para cada situação, assumindo $w = 30$ mm. Desta maneira, mostra-se e se verifica que o caminho magnético é uma definição do mensurando, não instrumental na modelagem do problema, principalmente na determinação de valores de campo magnético. Se

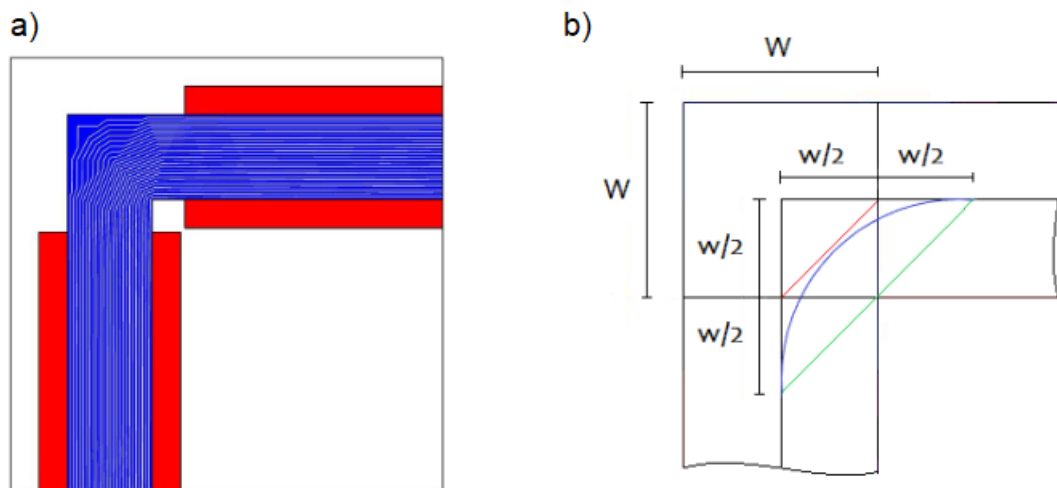
forem acrescentados outros efeitos, tais como a não linearidade do material e a saturação, a complexidade aumenta significativamente.

Tabela 1 – Comprimento dos circuitos magnéticos

Caminhos (l_m)	comprimento [m]
Preto	1,000
Vermelho	0,964
Azul	0,948
Verde	0,929

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 8 – Simulação em elementos finitos de 1/4 do quadro de Epstein e modelos de caminhos magnéticos.



Fonte: adaptado de (BATISTELA, 2001).

5.2 Perdas magnéticas totais

As perdas magnéticas totais podem ser determinadas por meio de duas abordagens distintas, que serão denominadas neste trabalho como método da potência média e método da densidade volumétrica de potência.

5.2.1 Método da potência média

O método da potência média (\bar{W}_T) consiste na obtenção do valor da potência consumida para gerar a força contraeletromotriz ao longo de um período T_o , conforme equação (5.12). Esta equação é válida devido à ausência de corrente no enrolamento secundário ($i_s = 0$), ou seja, quando o ensaio é realizado em circuito aberto. A unidade de \bar{W}_T é Watt.

$$W_T = \frac{1}{T} \frac{N_p}{N_s} \int_{T_o} V_s(t) i_p(t) dt \quad (5.12)$$

5.2.2 Método da densidade volumétrica de potência

O valor das perdas totais pode ser determinado através da área interna do laço BH, utilizando a equação (5.13). A área interna do laço representa a densidade volumétrica de potência (W_V) consumida pelo sistema (BASTOS, 2008). No entanto, é importante observar a unidade, uma vez que está expressa em Watt por metro cúbico.

$$W_V = \frac{1}{T} \int_{T_o} H dB \quad (5.13)$$

5.3 Densidade de perdas

Então, define-se a densidade de perdas (ρ_w) como potência por unidade de massa. E para estimar sua magnitude é possível utilizar as equações (5.14) e (5.15).

$$\rho_w = \frac{W_T}{m_t} \quad (5.14)$$

$$\rho_w = \frac{W_V}{m_v} \quad (5.15)$$

Em princípio, os valores obtidos pelas duas equações deveriam ser iguais. No entanto, os resultados mostram que, ao utilizar a massa total na equação (5.14), ocorre um desvio significativo em comparação com o valor calculado pela equação (5.15). Esta questão será novamente retomada no Capítulo 7 onde serão comparados os resultados utilizando as equações (5.14) e (5.15). Sendo assim, realiza-se uma análise matemática para investigar essa inconsistência nesse capítulo. A equação (5.15) pode ser reescrita com auxílio das equações (5.13), (5.4) e (5.5). Assim, é formada a seguinte expressão:

$$\rho_w = \frac{1}{m_v} \frac{N_p}{N_s} \frac{1}{Sl_m} \frac{1}{T} \int V_s(t) I_p(t) \quad (5.16)$$

Isolando a massa específica do material na equação (5.8), obtém-se (5.17).

$$m_v = \frac{m_t}{4lS} \quad (5.17)$$

Substituindo (5.17) em (5.16) e reorganizando a expressão, determina-se a equação (5.18).

$$\rho_w = \frac{4l}{m_t l_m} W_T \quad (5.18)$$

Reorganizando novamente a equação (5.18), obtém-se a equação (5.19). A equação (5.19) é equação proposta pela norma, assim como a equação (5.20) é a definição de massa efetiva (m_a) descrita no Capítulo 2.

$$\rho_w = \frac{W_T}{m_a} \quad (5.19)$$

$$m_a = \frac{m_t l_m}{4l} \quad (5.20)$$

Portanto, o desvio ocorrido com o emprego da equação (5.14) na determinação da densidade de perdas advém da diferença nos valores de massa total utilizados nas equações. Na equação (5.14), utiliza-se o valor de massa total diretamente, enquanto que na equação (5.15), o valor de massa total aparece de maneira indireta, resultante da razão da densidade volumétrica de potência (W_V) pela massa específica (m_v). Observe que na equação (5.14), ao utilizar o valor da massa total de material, essa quantidade contempla a massa efetiva de material na qual o fluxo percorre, bem como a massa de material extra decorrente da sobreposição das amostras no canto do quadro de Epstein. Sendo assim, para que não haja erro na determinação da densidade de perdas, é necessário utilizar o conceito de massa efetiva na equação (5.14), ou as equações (5.15) e (5.19).

5.4 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os equacionamentos propostos para encontro das grandezas magnéticas, como também as equações para determinação da densidade de perdas do material. No próximo capítulo será abordada a análise de sensibilidade aplicada no presente estudo.

6 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE DE INCERTEZAS RELACIONADAS

O processo de medição através do quadro de Epstein, empregado na caracterização das propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos, é suscetível às variadas fontes de incerteza que podem afetar a confiabilidade e a precisão dos resultados. Estas fontes incluem a precisão dos equipamentos de medição, a estabilidade das grandezas a serem medidas, o efeito de borda decorrente da geometria do quadro, a homogeneidade do material, a calibração dos instrumentos, as condições ambientais, os procedimentos de amostragem e preparação do material, como também erros de medida devidos à fadiga física e/ou mental do operador na realização do ensaio.

Para mitigar tais incertezas, é essencial conduzir uma análise minuciosa do processo de medição, identificando e quantificando as fontes de incerteza relevantes. Medidas corretivas podem e devem ser implementadas, tais como a realização de experimentos de controle de qualidade e calibração regular dos equipamentos de medição. Uma abordagem sistemática para lidar com as incertezas é importante para assegurar resultados mais confiáveis e precisos em ensaios que utilizam o quadro de Epstein.

Com a descrição dos procedimentos adotados no Capítulo 4 para a realização dos ensaios e com o emprego das equações modeladas no Capítulo 5, é possível identificar as fontes de incerteza relevantes ao estudo e realizar uma análise de sensibilidade. Neste trabalho serão consideradas apenas incertezas nas medidas oriundas dos equipamentos de medição e incertezas provenientes do equacionamento. Tais incertezas e suas respectivas fontes são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Incertezas consideradas

Grandeza	Incerteza	Fonte
Tensão - $V(t)$	Δ_v	Equipamento
Corrente - $I(t)$	Δ_i	Equipamento
Massa - m	Δ_m	Medida
Largura - w	Δ_w	Medida
Espessura - d	Δ_d	Medida
Caminho magnético - lm	Δ_{lm}	Modelo
Seção magnética - S	Δ_S	Incerteza propagada
Campo magnético - H	Δ_H	Incerteza propagada
Indução magnética - B	Δ_B	Incerteza propagada
Permeabilidade - μ	Δ_μ	Incerteza propagada

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de sensibilidade de incertezas é uma ferramenta importante para entender a robustez de modelos ou processos de medição diante da incerteza nos dados de entrada. Permite identificar quais variáveis de entrada exercem maior influência sobre as saídas de um sistema. Neste estudo, utiliza-se o método de perturbação sistemática para realizar a análise de sensibilidade.

A perturbação sistemática envolve a modificação controlada dos valores das variáveis de interesse de acordo com uma porcentagem pré determinada. Assim, observa-se como pequenas variações nas grandezas de entrada influenciam o comportamento do modelo. O procedimento se inicia com a determinação dos valores originais das variáveis em cada ponto de operação. Estes valores são então ajustados por porcentagens definidas, que variam de acordo com a grandeza, gerando novos vetores de dados perturbados. Com os novos valores, recalculam-se as respostas do modelo para cada ponto de operação com os valores perturbados. Este processo é repetido para todos os pontos de operação, garantindo assim uma cobertura abrangente das possíveis variações.

Esse método de análise permite identificar quais fontes de incertezas merecem mais atenção durante o processo de medição ou modelagem e, podem guiar a alocação de recursos para reduzir incertezas críticas.

6.1 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentadas as incertezas relacionadas no presente estudo, bem como o método para análise de sensibilidade das grandezas magnéticas. No próximo capítulo serão abordados os resultados dos ensaios realizados.

7 MEDIÇÕES, RESULTADOS E ANÁLISES

Os resultados que serão apresentados neste capítulo foram obtidos através de ensaios realizados no GRUCAD, conforme procedimentos descritos no Capítulo 4, na seção 4.3.

Foram conduzidos três ensaios distintos. O primeiro utilizou amostras cortadas exclusivamente no sentido longitudinal (L) de laminação. O segundo empregou amostras cortadas exclusivamente no sentido transversal (T) de laminação. O terceiro ensaio utilizou amostras cortadas em ambos os sentidos (LT). Os ensaios foram nomeados de acordo com o conjunto de amostras utilizadas, as quais foram separadas conforme sentido de corte. Nos ensaios LT, foram aplicadas as mesmas amostras utilizadas nos ensaios L e T, seguindo as orientações de preparação do quadro de Epstein para ensaios com lâminas cortadas em sentidos diferentes. Os experimentos foram realizados nas frequências de 1 Hz e 50 Hz, de modo a contemplar as perdas estáticas e dinâmicas, respectivamente.

Neste trabalho, o valor nominal de uma grandeza é definido como o seu valor verdadeiro. Essa abordagem permite avaliar a precisão e identificar as diferenças relativas entre os dados nominais e os resultados experimentais obtidos. Sendo assim, foi definido como valor nominal da massa específica o valor de catálogo do material. Esse valor foi utilizado para estimar os valores nominais das grandezas (d , w , m e S) para cada ensaio.

Na Tabela 3, apresenta-se o valor médio das medidas de espessura, largura e massa, como também os valores obtidos pelo método indireto das grandezas seção magnética e massa específica. Os valores apresentados já contemplam seus respectivos desvios padrão da amostra (s).

Tabela 3 – Parâmetros medidos das amostras

Medidas	L	T	LT	Un.
\bar{d}	$0,502 \pm 0,001$	$0,497 \pm 0,004$	$0,500 \pm 0,004$	mm
\bar{w}	$30,036 \pm 0,022$	$29,994 \pm 0,019$	$30,014 \pm 0,029$	mm
\bar{m}	$35,97 \pm 0,10$	$34,79 \pm 0,19$	$34,95 \pm 0,21$	g
\bar{S}	$45,27 \pm 0,07$	$44,68 \pm 0,20$	$89,96 \pm 0,21$	mm ²
\bar{m}_v	7625 ± 30	7658 ± 72	7642 ± 77	kg/m ³

Fonte: Elaborado pelo autor.

São apresentados na Tabela 4 os valores nominais das grandezas (d , w , m , S e m_v) do material e as diferenças relativas dos valores nominais comparados com os valores médios referenciados ao valor nominal. O valor da massa nominal (m) na Tabela 4 advém da massa total m_t medida em balança, dividida pela quantidade de amostras n . O valor da espessura nominal é obtido através da equação (5.8), utilizando os valores nominais de m_v , l , w e m_t . Apresentam-se os valores de n , l e m_t na Tabela 5. A estimativa da massa total m_t , realizada pelo produto da massa média \bar{m} (obtida pela pesagem de cada lâmina) pela quantidade total

de lâminas n , equação (5.9), demonstrou ser equivalente à pesagem integral do conjunto de amostras. Ambos os métodos produziram resultados equivalentes, apresentando uma diferença relativa máxima de 0,010% para o ensaio com lâminas cortadas no sentido L de laminação, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros nominais das amostras e diferença relativa

Grandezas	L	Dif. Rel	T	Dif. Rel	LT	Dif. Rel	Un.
d	0,495	-1,580%	0,490	-1,261%	0,493	-1,331%	mm
w	30,000	-0,121%	30,000	0,021%	30,000	-0,047%	mm
m	35,09	-0,010%	34,79	-0,002%	34,95	0,003%	g
S	44,54	-1,640%	44,16	-1,200%	88,71	-1,420%	mm ²
m_v	7750	1,613%	7750	1,180%	7750	1,400%	kg/m ³

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5 – Parâmetros nominais das amostras

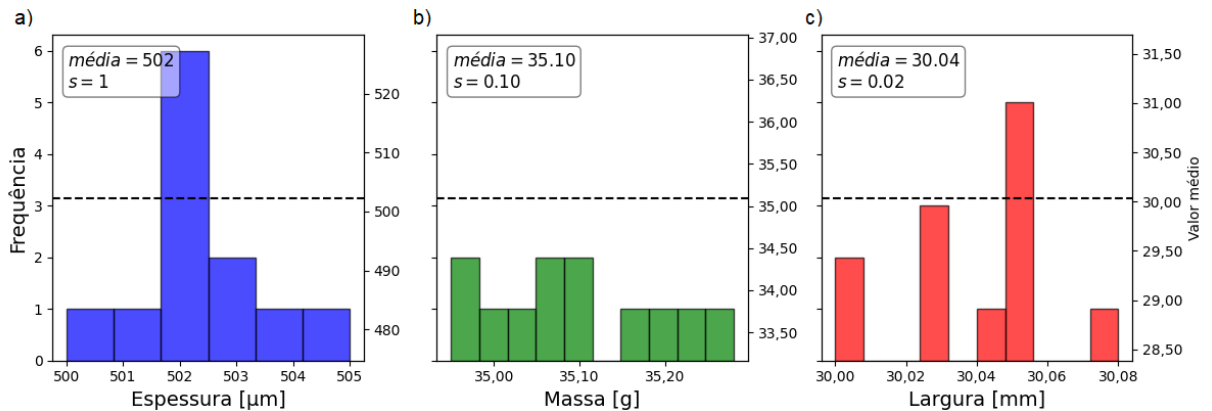
Grandezas	L	T	LT	Un.
l	305	305	305	mm
m_t	421,12	417,48	838,75	g
n	12	12	24	

Fonte: Elaborado pelo autor.

As distribuições das médias das medidas em quatro pontos, ou seja, da espessura de cada amostra, separadas por ensaio, são apresentadas na Figura 9a, Figura 10a e Figura 11a. As distribuições de massa são apresentadas na Figura 9b, Figura 10b e Figura 11b e as distribuições de largura são apresentadas na Figura 9c, Figura 10c e Figura 11c. Nessas figuras, também são mostrados os valores médios e os desvios-padrão das amostras (s)

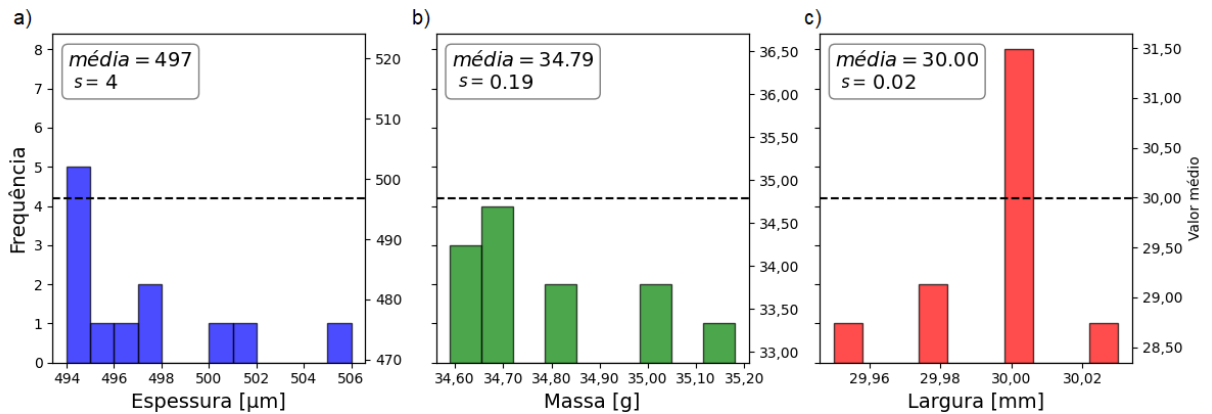
As Figuras 12 e 13 mostram gráficos para os conjuntos de amostras L e T provenientes de valores das medidas locais de espessura em quatro pontos. As medidas em cada ponto foram tomadas uma única vez. Conforme estes resultados apresentados nas Figuras 12 e 13, da distribuição das medidas de espessura para cada um dos quatro pontos medidos das amostras, evidencia-se a não homogeneidade da espessura no comprimento das amostras, sejam elas cortadas no sentido L ou T de laminação. O valor máximo de espessura medido para as amostras cortadas no sentido L foi 511 μm e o valor mínimo foi 495 μm . Essas medidas representam uma diferença relativa local máxima e mínima de 1,793% e -1,394%, respectivamente, quando referenciadas pelo valor médio da espessura do conjunto (L). Do mesmo modo, para as amostras cortadas no sentido T de laminação, foram encontrados os valores de máximo e mínimo de 509 μm e 490 μm , respectivamente. Esses valores representam diferenças relativas locais máxima de 2,414% e mínima de -1,408%, também referenciadas pela espessura média do conjunto de amostras (T). Note que o conjunto lâminas LT é formado por estas lâminas medidas.

Figura 9 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas no sentido L de laminação.



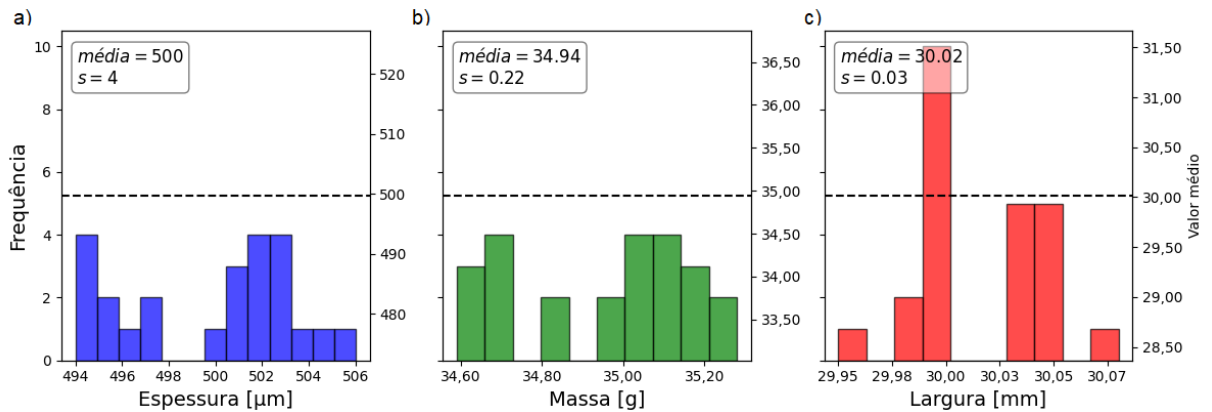
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 10 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas no sentido T de laminação.



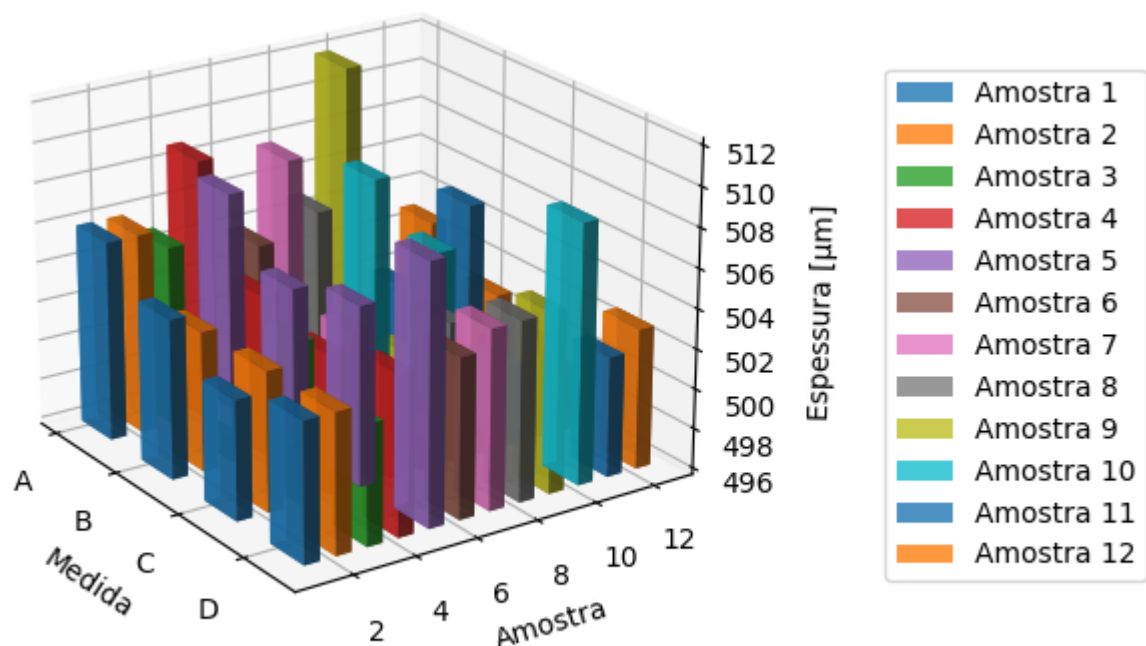
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 11 – Distribuição das medidas de espessura, massa e largura para o ensaio com amostras cortadas em ambos sentidos de laminação .



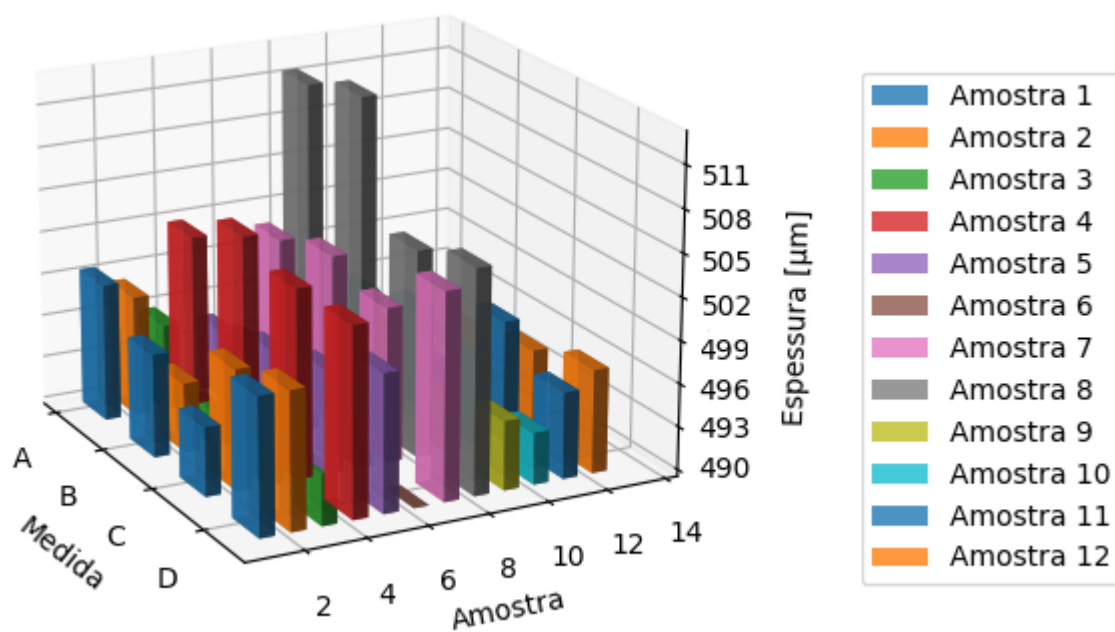
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 12 – Medidas em quatro pontos das amostras cortadas no sentido L.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 13 – Medidas em quatro pontos das amostras cortadas no sentido T.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com a marcação realizada através da numeração no preparo das amostras e com os valores de espessura medidos em quatro pontos, estimam-se como se distribuem os valores da seção magnética S ao longo de um braço do quadro de Epstein com as lâminas empilhadas (grupo), essa abordagem é válida apenas para os pontos B e C de medição (Figura 5). Para os pontos A e D, essa estimativa não é aplicável na determinação da seção magnética. Nessas posições ocorre a sobreposição das amostras nos cantos do quadro de Epstein. Ademais, por ser uma região de fronteira do circuito magnético, são locais onde o fluxo magnético não se comporta de maneira uniforme como no centro do braço. A Tabela 6, a Tabela 7 e a Tabela 8 mostram as diferenças relativas dos valores da seção magnética nos locais relativos aos pontos de medida B e C de acordo com o grupo de amostras empilhadas nos braços do quadro alocados e conjunto de amostras utilizado (a numeração dos braços do quadro de Epstein é definida pela contagem no sentido anti-horário e referenciada pelo braço que recebe a energia da fonte). Utiliza-se como referência os valores médios de S para cada configuração de ensaio. Os grupos de amostras são nomeados com a sequência numérica na qual as amostras foram alocadas em cada braço do quadro de Epstein. Por exemplo, o grupo 4.8.12 contém as amostras enumeradas por 4, 8 e 12.

Tabela 6 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio L

Grupo	Corte	Braço	B	C
1.5.9	L	1	-0,13%	0,00%
2.6.10	L	2	-0,40%	-0,33%
3.7.11	L	3	-0,33%	-0,46%
4.8.12	L	4	-0,40%	-0,27%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio T

Grupo	Corte	Braço	B	C
1.5.9	T	1	-0,34%	-0,54%
2.6.10	T	2	-0,47%	-0,20%
3.7.11	T	3	-0,47%	-0,07%
4.8.12	T	4	0,94%	0,47%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8 – Diferença relativa para seção magnética local para ensaio LT

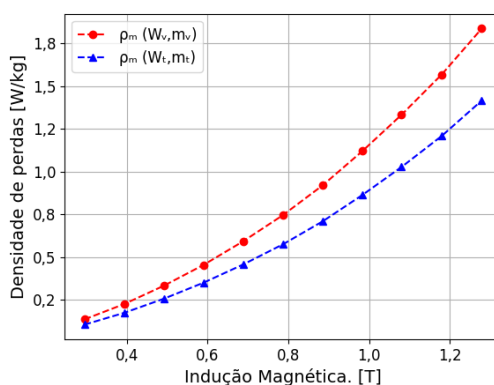
Grupo	Corte	Braço	B	C
1.3.5.7.9.11	L	1	0,17%	0,17%
1.3.5.7.9.11	T	2	-1,00%	-0,90%
2.4.6.8.10.12	L	3	0,00%	0,10%
2.4.6.8.10.12	T	4	-0,37%	-0,47%

Fonte: Elaborado pelo autor.

O valor da diferença relativa mais expressivo da seção magnética foi observado no conjunto LT, apresentando uma diferença máxima em módulo de 1,00% para o grupo 1.3.5.7.9.11 com o sentido de corte T (braço 2 do quadro de Epstein)

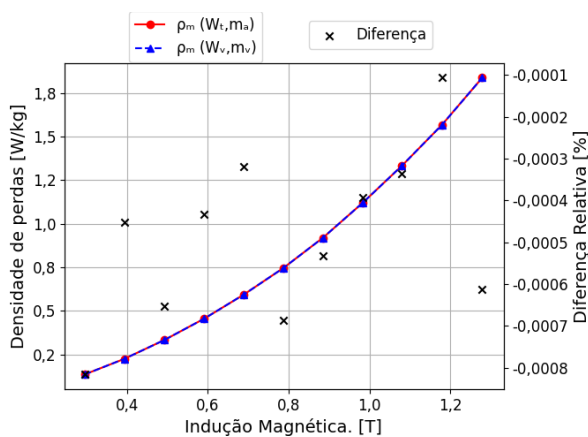
Conforme abordado no Capítulo 5, a densidade de perdas magnéticas (ρ_w) pode ser calculada com as equações (5.15) e (5.19). A Figura 14 mostra as curvas obtidas por meio das equações (5.14) e (5.15) para o ensaio com o conjunto de amostras L. Uma diferença relativa de aproximadamente 23% entre os valores determinados pelas equações foi obtido, referenciada com os valores calculados pela equação (5.15). Na Figura 15, são apresentadas as curvas de densidade de perdas obtidas por meio das equações (5.15) e (5.19), e a diferença relativa entre os pontos referenciados pela equação (5.15).

Figura 14 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequências de 50 Hz com as equações (5.14) e (5.15) para o ensaio com o conjunto de amostras L.



Fonte: Elaborado pelo autor.

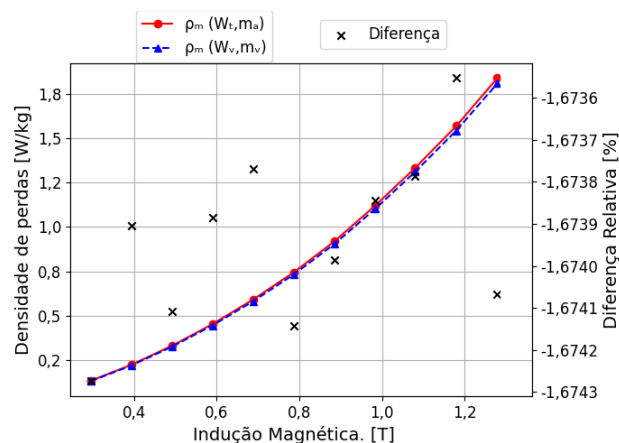
Figura 15 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequências de 50 Hz com as equações (5.15) e (5.19) para o ensaio com o conjunto de amostras L e diferenças relativas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores calculados com as equações (5.15) e (5.19) podem apresentar diferenças significativas quando: i) utiliza-se o valor nominal de massa específica (m_v) no cálculo da densidade de perdas com a equação (5.15), e ii) utiliza-se o resultado da medida indireta obtida com os valores médios na equação (5.11) no cálculo da indução (B) com a equação (5.5). Ou seja, são utilizados tanto valores nominais quanto valores medidos para obter as grandezas estruturais e magnéticas. Portanto, para evitar o que deve ser considerado um erro, é importante utilizar apenas os valores provenientes de uma mesma origem, sejam eles só valores nominais ou só medidos. Na Figura 16, são apresentadas as curvas obtidas de acordo com os itens i) e ii) para o ensaio com as amostras cortadas no sentido longitudinal (L) de laminação. Comparando os valores de diferenças mostradas na Figura 15 (referência) com os da Figura 16, verifica-se um aumento médio de 1,67% na diferença relativa.

Figura 16 – Curvas de densidade de perdas obtidas na frequência de 50 Hz com as equações (5.15) e (5.19) utilizando o valor nominal de m_v e valor medido de S para o ensaio com o conjunto de amostras L e diferenças relativas.



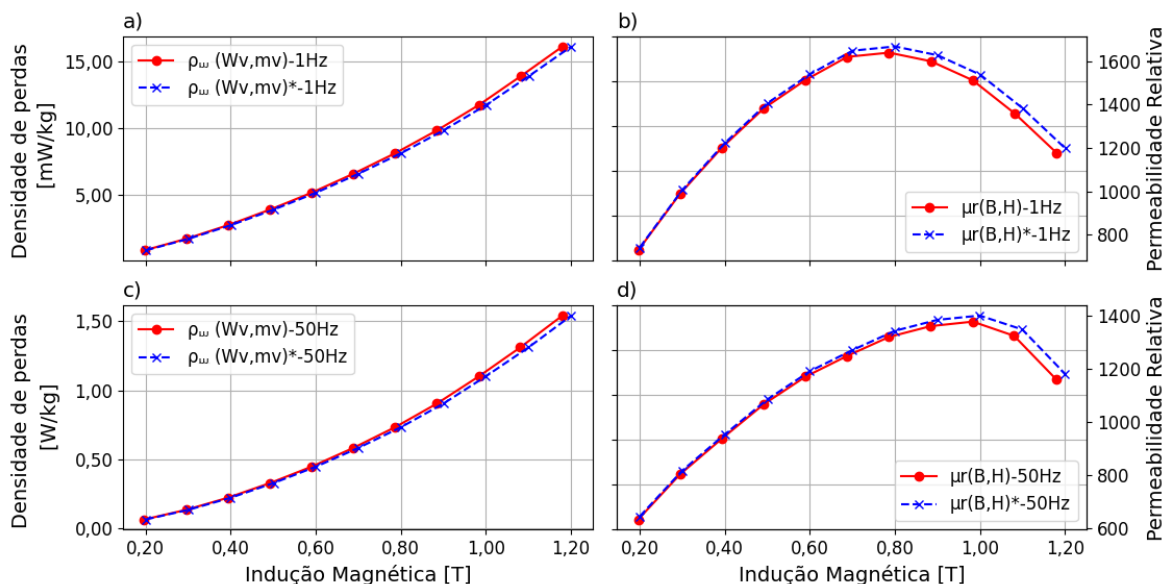
Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 15, observa-se que as diferenças relativas entre os métodos de obtenção da densidade de perdas não apresentam valores significativos. Aliás, não é possível encontrar a fonte que proporcionou estes valores de diferenças, os quais são menores do que 0,0008% (possivelmente advêm de erros computacionais/numéricos de truncamento – de fato, idealmente deveriam ser nulas). O resultado significativo referente ao processo de determinação da densidade de perdas magnéticas é que, quando se emprega nos cálculos apenas os resultados determinados utilizando os valores nominais ou medidos, as curvas de (5.15) e (5.19) são coincidentes. Então, o operador não precisa se preocupar qual método empregar, mas sim a qualidade da instrumentação empregada. Portanto, na sequência deste trabalho, optou-se por utilizar para as próximas análises as curvas de densidade de perdas calculadas com a equação (5.15).

No contexto de caracterização magnética do material, para o encontro dos valores das grandezas magnéticas, foram utilizados tanto os valores médios medidos (Tabela 3) quanto os valores nominais calculados (Tabela 4). As curvas obtidas são provenientes de um mesmo ensaio. Deste modo, evita-se influências de erros aleatórios de medida. Assim, é possível comparar os resultados obtidos e verificar os efeitos das incertezas nas medições das grandezas estruturais, bem como suas possíveis influências nas curvas de permeabilidade e de densidade de perdas.

A Figura 17, a Figura 18 e a Figura 19 mostram as curvas de densidade de perdas (a) e (b) e de permeabilidade relativa (c) e (d), conforme a frequência de operação e ensaio realizado. Convencionou-se o uso do caractere “*” nas legendas para designar o uso das grandezas calculadas com os valores nominais nas equações.

Figura 17 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequências de 1Hz e 50Hz para ensaio com o conjunto de amostras L.



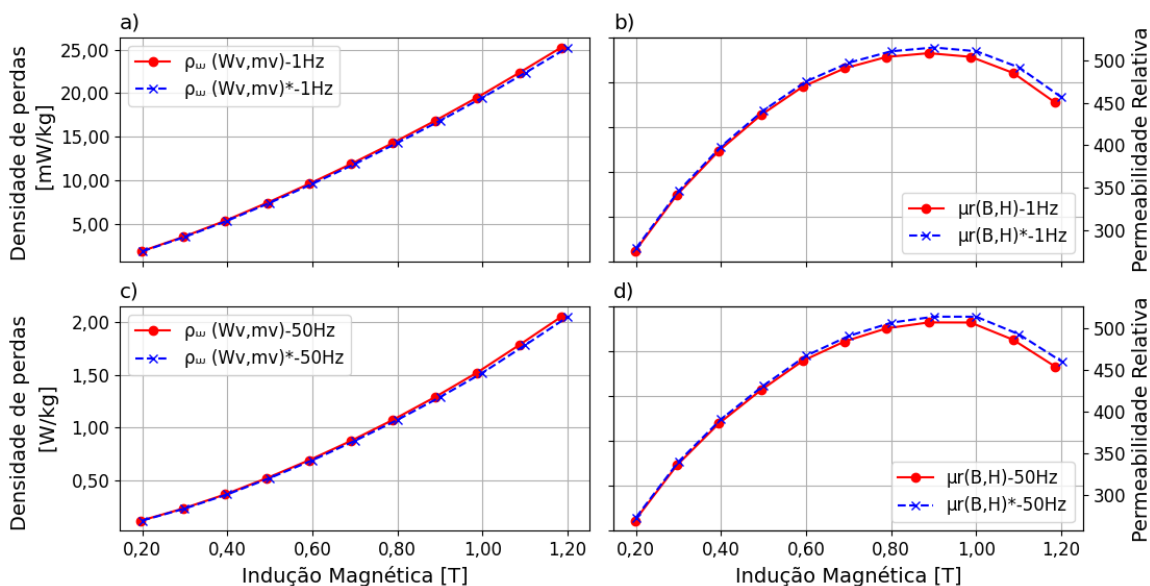
Fonte: Elaborado pelo autor.

As curvas de densidade de perdas (a) e (c) apresentadas na Figura 17, na Figura 18 e na Figura 19 não apresentam variações em suas magnitudes quando comparadas entre si ao se utilizarem valores nas equações ou só nominais ou só medidos. Entretanto, apresentam uma variação nos valores de indução medidos (medição indireta) representados nos eixos das abscissas. Essa diferença é constante e com valor levemente distinto (no máximo nos ensaios realizados foi de 1,613%), mas diferente conforme o conjunto de lâminas utilizados no ensaio. Os valores de indução para as curvas calculadas com as grandezas de entrada empregando valores medidos são levemente inferiores aos quando se utiliza valores nominais como grandezas de entrada. Como a permeabilidade é função simultânea dos valores de campo e indução magnética, este problema visualmente é agravado para a obtenção das curvas de

permeabilidade relativa, pois a diferença no cálculo da indução está presente nos dois eixos.

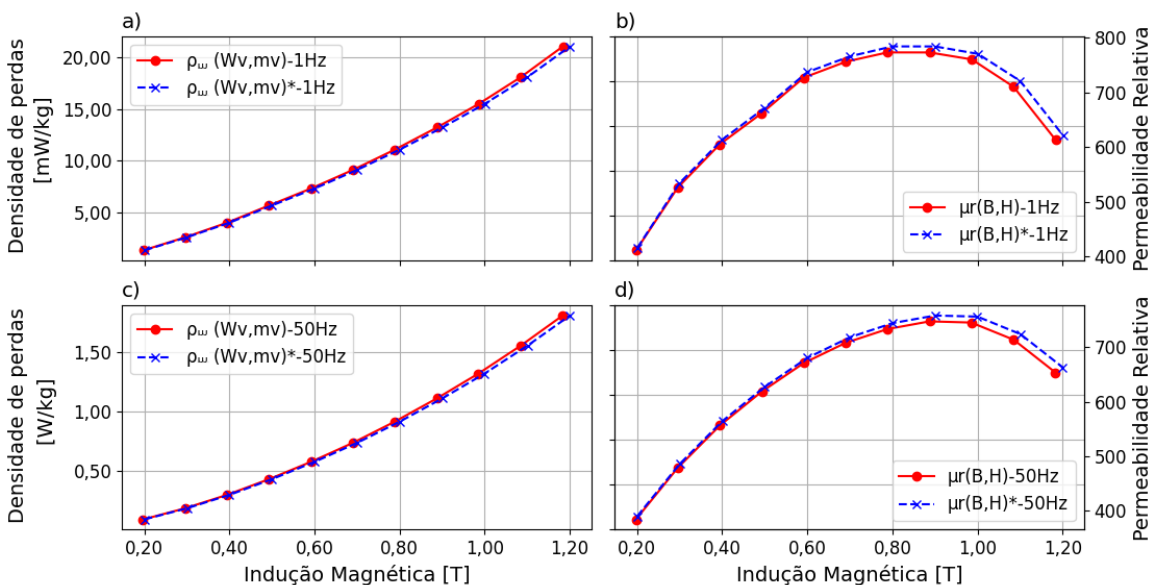
Como esperado, ao aumentar a frequência de operação, a permeabilidade tende a diminuir. Esse efeito é mais evidenciado no ensaio com as amostras cortadas no sentido L de laminação (Figuras 17b e 17d).

Figura 18 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequências de 1 Hz e 50 Hz para ensaio com o conjunto de amostras T.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19 – Curvas de densidade de perdas e permeabilidade relativa nas frequências de 1 Hz e 50 Hz para ensaio com o conjunto de amostras LT.



Fonte: Elaborado pelo autor.

As diferenças relativas entre os valores de indução, bem como entre os valores de permeabilidade relativa, ambos referenciados pelos resultados das equações calculadas com valores nominais para cada ensaio, são apresentadas na Tabela 9. Nos valores apresentados nesta tabela, observa-se igualdades nos valores das diferenças relativas para indução e permeabilidade relativa para um mesmo conjunto de amostras. De fato, essa igualdade já era esperada, uma vez que a diferença nos valores de indução provém da diferença entre os valores de massa específica calculados (para lâminas L de 1,613%, para T de 1,180% e para LT de 1,400%), como se pode verificar na Tabela 4, e a igualdade nos valores de diferença relativa de permeabilidade está relacionada com a diferença relativa nos valores de indução. Como não foram definidos valores nominais para grandeza campo magnético não há diferença relativa para esta grandeza, conseqüentemente, o valor de diferença relativa de permeabilidade não se altera.

Os valores máximos de densidade de perdas e de permeabilidade relativa são apresentados na Tabela 10. Além dos valores máximos, a tabela também contém os pontos de operação ($B_o(\mu_{r_{max}})$) nos quais os valores de permeabilidade máxima foram obtidos.

Tabela 9 – Diferença relativa para indução e permeabilidade relativa.

Ensaio	Diferença Relativa [%]			
	B [T]		μ_r	
	1 Hz	50 Hz	1 Hz	50 Hz
L	-1,613	1,613	-1,613	-1,613
T	-1,185	1,185	-1,185	-1,185
LT	-1,400	1,400	-1,400	-1,400

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10 – Valores máximos de densidade de perdas e permeabilidade relativa.

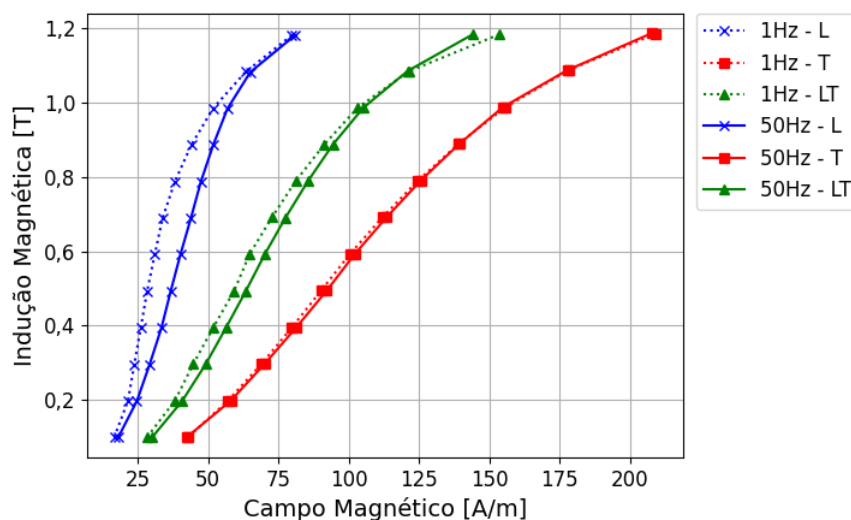
Grandezas	L		T		LT	
	1 Hz	50 Hz	1 Hz	50 Hz	1 Hz	50 Hz
ρ_w [W/kg]	0,01614	1,569	0,02524	2,052	0,02104	1,811
$\mu_{r_{max}}$	1668	1399	515	514	784	759
$B_o(\mu_{r_{max}})$ [T]	0,787	0,984	0,791	0,988	0,789	0,986

Fonte: Elaborado pelo autor.

O ponto no qual ocorre a permeabilidade máxima é único para um material, bem como o seu valor. Porém, nos ensaios, devido ao processo de determinação da massa específica conforme o conjunto de amostras utilizado, isto não ocorre. Isto pode ser comprovado, por exemplo, pela análise das curvas nas Figuras 17, nas Figuras 18 e nas Figuras 19 (b) e (d). Para o método empregando valores nominais, obteve-se 1422 em 1 T; e para o método empregando valores medidos, tem-se 1399 em 0,984 T. Esses valores são provenientes do ensaio utilizando o conjunto de amostras L na frequência de operação de 50 Hz.

Os resultados apresentados nas figuras subsequentes foram obtidos com as grandezas medidas. A Figura 20 apresenta as curvas de magnetização inicial para cada conjunto de amostras e para os ensaios realizados nas frequências de 1 Hz e 50 Hz. Conforme se pode observar nessa figura, verificam-se tendências de alterações nas inclinações das curvas de magnetização inicial conforme o sentido de corte da amostra. As amostras cortadas no sentido L de laminação apresentam uma maior permeabilidade, enquanto as amostras cortadas no sentido T de laminação possuem menor permeabilidade. Apesar das amostras cortadas no sentido L apresentarem maior facilidade de magnetização, é o conjunto de amostras que mostrou maior variação na curva de magnetização inicial com a mudança da frequência de operação. Provavelmente isto se deve à relação entre as quantidades de perdas por histerese e dinâmicas (neste trabalho, não se efetuou a separação de perdas).

Figura 20 – Curvas de magnetização inicial das amostras.

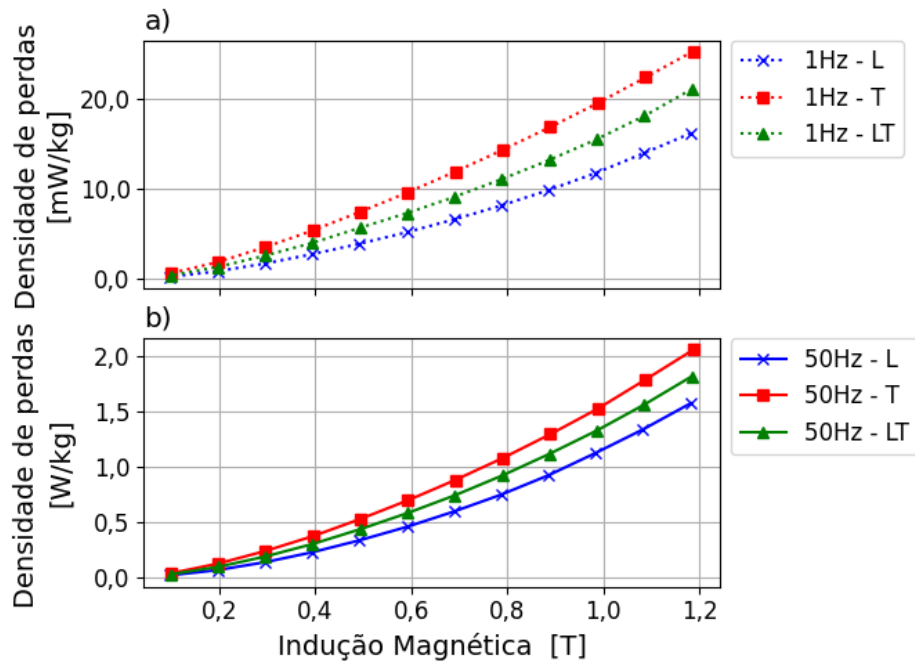


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 21 apresenta as curvas de densidade de perdas para cada conjunto de amostras, e gráficos separados para cada frequência de operação. De acordo com as curvas de densidade de perdas apresentadas na Figura 21 (a) e (b), verifica-se comportamentos similares das curvas obtidas nos ensaios realizados, tanto na frequência de 1 Hz quanto na frequência de 50 Hz. Há diferenças significativas entre os valores de perdas para um mesmo valor de indução. Isso já era esperado, tanto sob o ponto de vista da anisotropia do material quanto sob o ponto de vista da frequência de operação.

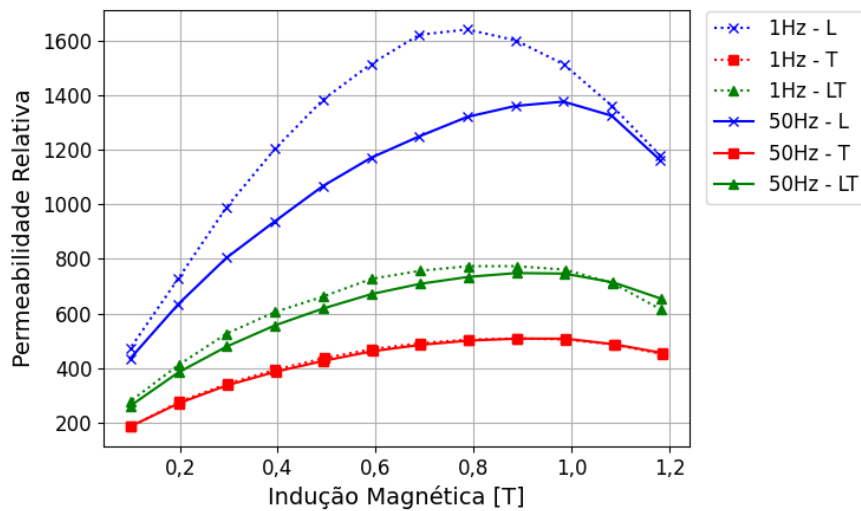
A Figura 22 mostra as curvas de permeabilidade relativa obtidas para os ensaios nas frequências de 1 Hz e 50 Hz. As variações observadas na Figura 20 são evidenciadas nas curvas de permeabilidade relativa da Figura 22. A curva para o ensaio com as amostras cortadas no sentido L de laminação apresenta a maior diferença entre as duas frequências, apresentando

Figura 21 – Curvas de densidade de perdas do material



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22 – Curvas de permeabilidade relativa dos materiais

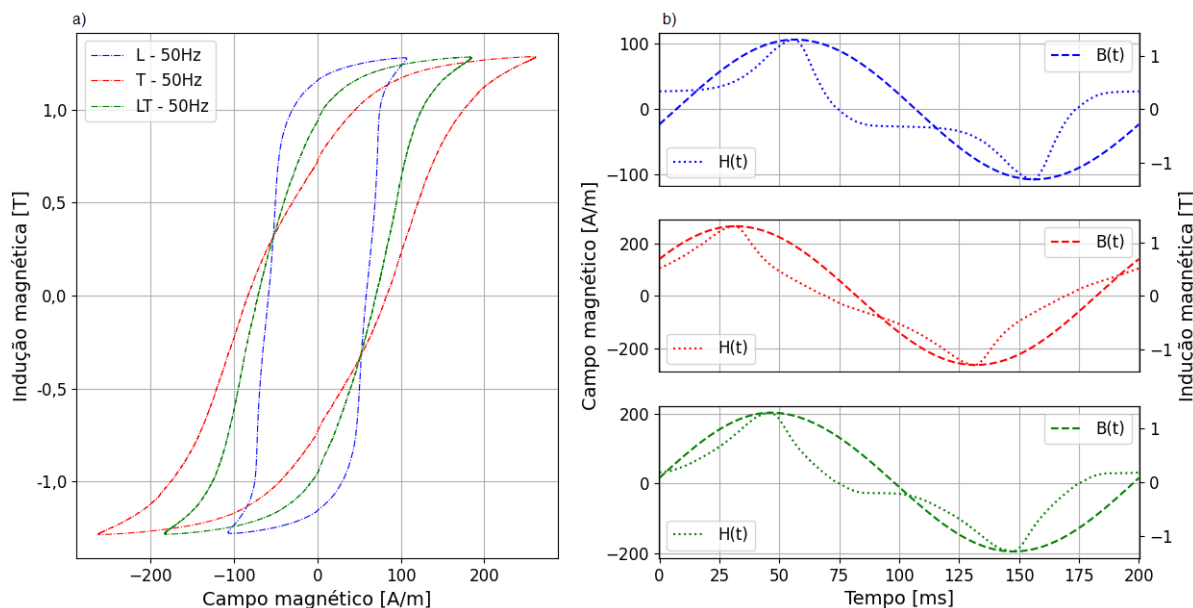


Fonte: Elaborado pelo autor.

uma diferença relativa máxima de 16,13% referenciada pelo valor de permeabilidade relativa máxima em 1 Hz.

Os laços BH são apresentados na Figura 23a, e um período das formas de onda de campo e de indução na Figura 23b. Utilizou-se as mesmas cores da legenda na Figura 23a para representar as respectivas formas de onda de cada ensaio. Verifica-se o mesmo efeito, observado na curva de magnetização inicial na Figura 20, decorrente do sentido de corte das

Figura 23 – Laço BH e formas de onda de indução e campo magnéticos na frequência de 50 Hz



Fonte: Elaborado pelo autor.

amostras. Observa-se também, que o laço BH das amostras cortadas no sentido L apresentam o menor valor de coercividade quando comparados com os de T e LT.

Os resultados obtidos a partir dos valores medidos são analisados em termos de precisão. Para isso, utiliza-se o conceito de incerteza relativa discutido no Capítulo 3. Para as grandezas elétricas tensão e corrente, adotam-se as incertezas relativas como o valor da precisão do instrumento utilizado, disponibilizado em *datasheet* (Anexo). Entretanto, como a sonda de tensão usada neste trabalho não apresenta valores típicos no seu *datasheet* foi considerado o mesmo valor de incerteza relativa que o da sonda de corrente, ou seja, 1%. Do mesmo modo, com base nos caminhos magnéticos apresentados no Capítulo 5, foi estipulado o valor de 2,553% para incerteza relativa no caminho magnético l_m . O valor de 2,553% advém da diferença relativa do comprimento do caminho na cor vermelha (Figura 8b) referenciado pelo caminho nominal (0,94 m). Optou-se por escolher o caminho de cor vermelha, pois é o caminho com maior comprimento dentre os modelos apresentados neste trabalho.

Apesar da influência de diversos parâmetros, tais como as distribuições do campo magnético (H) e da indução magnética (B), a propagação de incertezas para a determinação do campo magnético foi realizada. No entanto, devido à complexidade inerente na modelagem precisa dos fenômenos envolvidos, o caminho l_m foi tratado como uma variável independente neste trabalho. Isso permite simplificar a análise e possibilita utilizar a equação (3.7) para encontrar a incerteza propagada. As mesmas condições são aplicadas para determinação da incerteza da permeabilidade relativa.

Na Tabela 11, são apresentados os valores de incerteza relativa para cada grandeza avaliada de acordo com o conjunto de amostras empregado. Além dos valores de incerteza relativa são apresentadas as respectivas fontes da incerteza de cada grandeza.

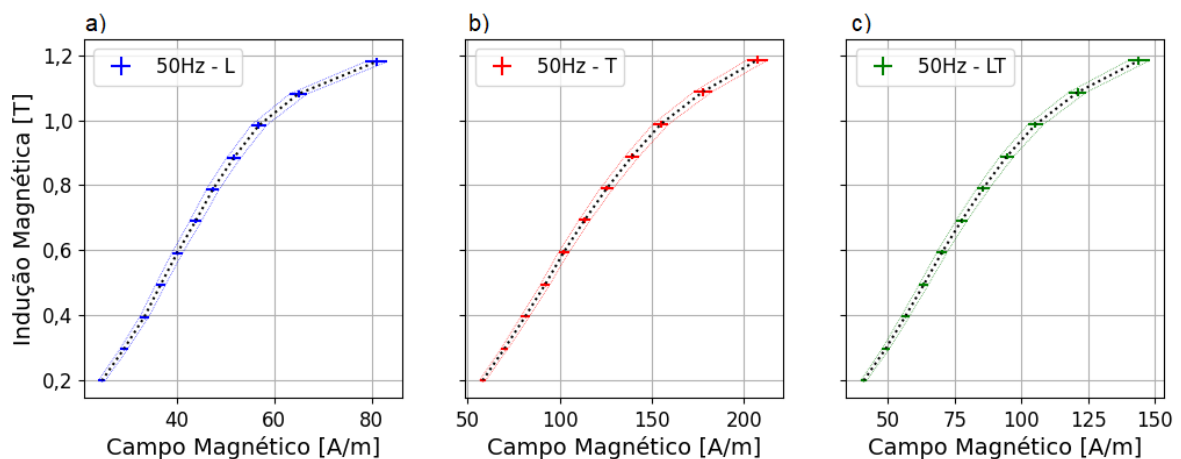
Tabela 11 – Incertezas Relativas

Grandezas	L	T	LT	Fonte
\bar{d} [mm]	0,247%	0,753%	0,794%	medida
\bar{w} [mm]	0,074%	0,063%	0,096%	medida
\bar{m} [g]	0,292%	0,552%	0,609%	medida
S [mm ²]	0,149%	0,436%	0,326%	propagação
m_v [kg/m ³]	0,388%	0,936%	1,000%	propagação
V_s [V]	1,000%	1,000%	1,000%	instrumento
I_p [A]	1,000%	1,000%	1,000%	instrumento
l_m [m]	2,553%	2,553%	2,553%	modelo
B_p [T]	1,011%	1,091%	1,052%	propagação
H_p [A/m]	2,742%	2,742%	2,742%	propagação
μ_r	2,922%	2,951%	2,937%	propagação

Fonte: Elaborado pelo autor.

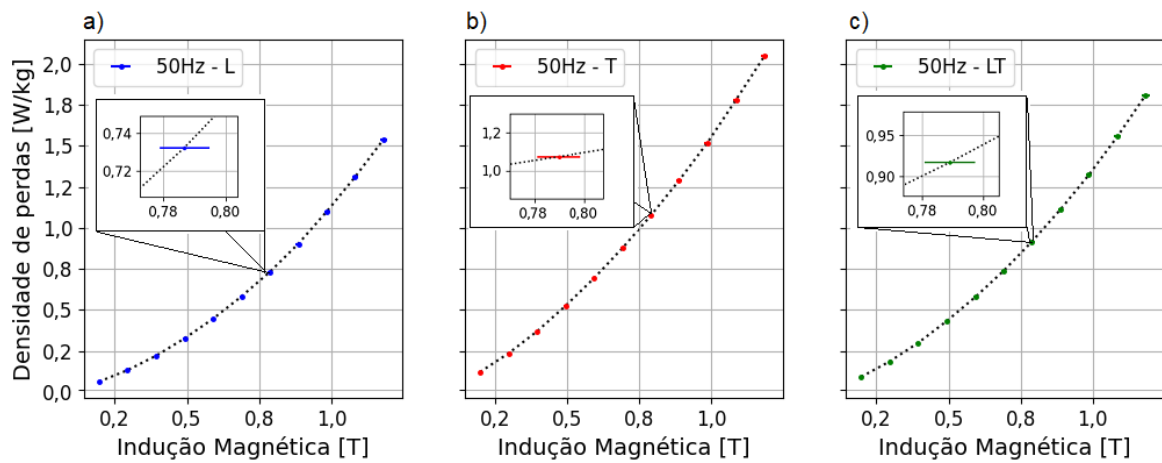
Portanto, com o conhecimento dos valores das incertezas propagadas, é possível apresentar as curvas de magnetização inicial, de densidade de perdas e de permeabilidade relativa, juntamente com suas respectivas incertezas de medida de campo e de indução magnética. Observa-se na Figura 24 (curva de magnetização inicial), na Figura 25 (curva de densidade de perdas) e na Figura 26 (curva de permeabilidade relativa) que a influência da incerteza propagada do campo magnético nas curvas apresentadas é maior em comparação com a incerteza propagada da indução magnética.

Figura 24 – Curvas de magnetização inicial dos materiais com incertezas de medida.



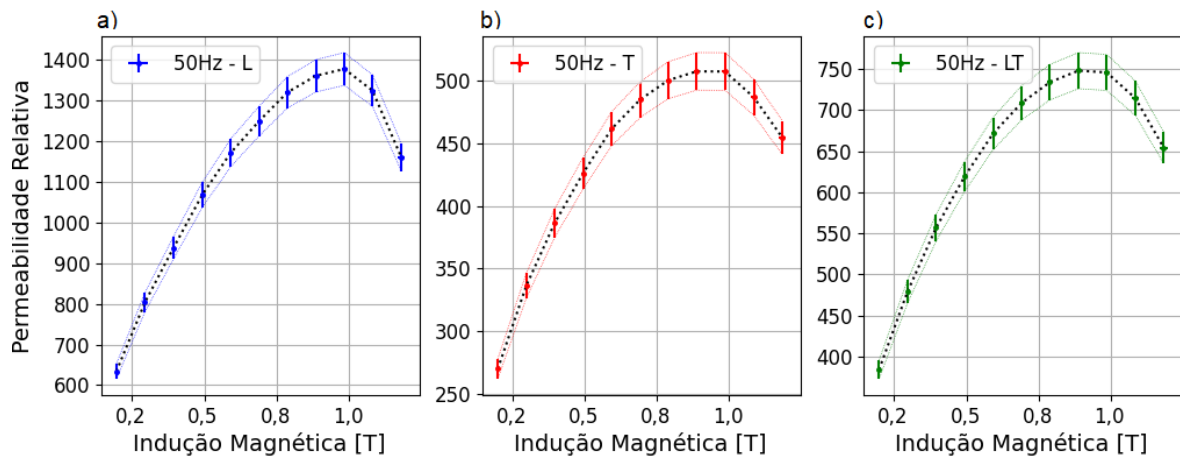
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 25 – Curvas de densidade de perdas dos materiais com incertezas de medida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26 – Curvas de permeabilidade relativa dos materiais com incertezas de medida.



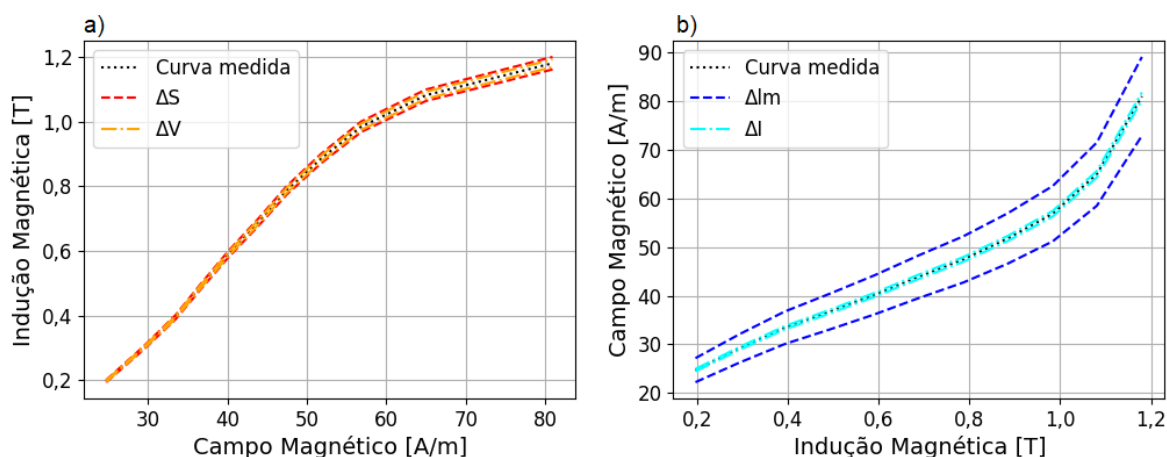
Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise de sensibilidade foi realizada através da perturbação sistemática na curva de magnetização inicial, conforme procedimento descrito no Capítulo 6. Para a análise da sensibilidade da indução aos parâmetros de entrada $V_s(t)$ e S , aplica-se uma variação de $\pm 1\%$ à tensão $V_s(t)$ e de $\pm 1,64\%$ à área de seção transversal S . A escolha dos valores é fundamentada no encontro do maior erro de medida possível para cada grandeza. O valor de variação para a tensão é oriundo do erro do instrumento de medida utilizado. O valor de variação na seção magnética corresponde à maior diferença relativa encontrada entre os resultados dos ensaios, obtidos entre o emprego de valores medidos e nominais (Tabela 4). O mesmo procedimento é aplicado para análise de sensibilidade do campo magnético, com variações estipuladas de $\pm 1\%$ para a corrente $I_p(t)$ e $\pm 10\%$ para o caminho magnético l_m .

O valor escolhido de 10% é fundamentado no valor máximo de diferença relativa encontrada para a incerteza do caminho magnético, ou seja, quando l_m é igual a 1,04 m, referenciado ao valor nominal (0,94 m).

A Figura 27a apresenta as curvas de magnetização inicial considerando a perturbação nos valores de $V_s(t)$ e S . Note que a Figura 27b mostra as curvas com os eixos invertidos levando em conta as perturbações nos valores de $I_p(t)$ e l_m . A Figura 27a contempla as perturbações para a análise de sensibilidade das incertezas nos valores de indução magnética, e a Figura 27b as perturbações para a análise de sensibilidade das incertezas na determinação do campo magnético. As curvas apresentadas são dos ensaios realizados com as amostras cortadas no sentido L de laminação e na frequência de 50 Hz.

Figura 27 – Curva de magnetização inicial e curva invertida de magnetização inicial para avaliação da sensibilidade das grandezas magnéticas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se nas Figuras 27 (a) e (b) que as grandezas elétricas possuem menor influência nas curvas apresentadas em comparação com as curvas geradas com valores alterados de seção magnética S e caminho magnético l_m . Ou seja, neste trabalho, as grandezas magnéticas indução e campo são mais sensíveis às incertezas nos valores da seção magnética e do caminho magnético, respectivamente. Para obter resultados mais exatos e com maior precisão, seria necessário diminuir o erro na obtenção da massa específica do material, bem como encontrar um modelo mais adequado para o caminho magnético.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi realizada uma avaliação de algumas incertezas de medição na caracterização de materiais magnéticos macios utilizando amostras laminares no instrumento quadro de Epstein. Foram realizados ensaios variando a composição das amostras conforme o sentido de corte (longitudinal, transversal e mescladas). Os ensaios foram conduzidos nas frequências de 1 Hz e 50 Hz, permitindo uma análise das propriedades magnéticas sob diferentes condições de operação.

Sabe-se que é desaconselhado medir a espessura do material por meio de instrumentos como paquímetro e micrômetro, pois o resultado dessas medidas não representará o valor verdadeiro devido à presença de uma camada isolante na amostra de material ferromagnético. A chapa de aço apresenta uma variação da espessura ao longo do seu comprimento, resultante do efeito de coroamento (*crown effect*) no processo produtivo, fazendo com que diferentes valores médios de espessura possam ser encontrados conforme o local da bobina de aço de onde as lâminas foram cortadas. Neste estudo, esses instrumentos foram utilizados para a medição, apesar dessas limitações na aplicação.

Apesar da existência de variações na seção magnética local, estas foram consideradas insignificantes na influência sobre a aquisição da grandeza indução magnética. Os resultados indicam que tais variações não impactam de maneira relevante as medições realizadas.

As diferenças entre os métodos para determinar a densidade da perda magnética podem ser consideradas insignificantes, apresentando diferenças relativas abaixo de 0,0008%. Essa pequena diferença é atribuída provavelmente a erros numéricos computacionais, demonstrando que ambos os métodos convergem para resultados consistentes. Quando se emprega os dois métodos em conjunto, pode-se verificar possíveis inconsistências nos resultados por meio da comparação entre as duas medidas.

Os resultados utilizando os valores das grandezas medidas foram comparados com os respectivos resultados empregando os valores das grandezas nominais do material. Embora seja desaconselhado usar medições diretas na determinação da espessura devido às incertezas associadas, as curvas obtidas apresentaram boa precisão na determinação da indução magnética (com incertezas menores do que 1,1%) e pequeno desvio (com diferenças menores que 1,7%) em comparação com o emprego de valores nominais.

A caracterização magnética das amostras cortadas nos sentidos longitudinal (L) e transversal (T) em relação ao sentido de laminação revelou diferenças significativas em suas propriedades magnéticas. Como esperado, as amostras cortadas no sentido longitudinal (L) se mostraram mais fáceis de magnetizar, apresentando maior permeabilidade e menor coercividade em comparação às amostras cortadas no sentido transversal (T). O ensaio com amostras

cortadas em ambos os sentidos apresentou propriedades intermediárias entre as amostras com um sentido de corte exclusivo. Essas variações são atribuídas à anisotropia magnética inerente ao processo de laminação, que alinha os domínios magnéticos de maneira preferencial ao longo do eixo longitudinal do aço.

A análise de sensibilidade revelou que, para este estudo, a seção magnética é a grandeza que mais interfere a determinação da indução magnética, enquanto que para o campo magnético, a grandeza mais influente é o caminho magnético. Portanto, para obter resultados mais precisos, tanto para indução quanto para o campo magnético e, conseqüentemente para a permeabilidade relativa, é necessário melhorar a determinação da massa específica, aplicando ensaios que aproximem os valores medidos dos valores reais, como também aprimorar o modelo do comportamento do caminho magnético conforme as condições de ensaio.

Uma limitação significativa deste estudo foi a disponibilidade de amostras necessárias para a realização do ensaio de massa específica pelo método do empuxo, o que teria permitido uma comparação mais robusta entre as medições. Futuras investigações podem considerar a inclusão desse procedimento para validar e aprimorar o método de caracterização empregada.

O estudo mostrou as dificuldades inerentes na modelagem dos fenômenos magnéticos e como incertezas podem impactar a medição das grandezas magnéticas. Estudou-se o emprego de incerteza no valor do caminho magnético l_m assumindo-o como uma variável independente, possibilitando uma análise de sensibilidade. Os resultados obtidos na caracterização do material utilizando os valores medidos de maneira indireta apresentaram incertezas inferiores a 3%, sendo a grandeza campo magnético a que apresentou a maior incerteza de medida. Este trabalho mostra a importância de considerar possíveis fontes de erro e incerteza, sugerindo que melhorias nos métodos de medição e na modelagem dos materiais magnéticos no GRUCAD podem ser feitas para atingir uma maior precisão e exatidão.

REFERÊNCIAS

- ABABSA, M. L. *et al.* High-Temperature Magnetic Characterization Using an Adapted Epstein Frame. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 54, n. 6, p. 1–6, 2018. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2811727.
- ADAMYAN, Y. *et al.* Experimental study of alternating magnetic field in laminated ferromagnetic core. *In: EDP SCIENCES. MATEC Web of Conferences*. [S.l.: s.n.], 2018. P. 07001. DOI: 10.1051/MATECONF/201824507001.
- ALBERTAZZI, ARMANDO; SOUZA, ANDRÉ ROBERTO DE. **Fundamentos de metrologia científica e industrial [Livro]**. [S.l.]: Barueri: Manole, 2013.
- ANJOS, M. S. **Desenvolvimento e avaliação de aços para fins elétricos totalmente processados em recozimento em caixa**. 2010. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Produto laminados planos de aço para fins elétricos**. Verificação das propriedades. Rio de Janeiro, jul. 1977.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase estática**. 3ª ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2008.
- BATISTELA, N. J. **Caracterização e modelagem eletromagnética de lâminas de aço ao silício**. 2001. Tese de Doutorado. – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.
- BERTOTTI, G. General properties of power losses in soft ferromagnetic materials. **IEEE Transactions on Magnetics**, [s. l.], v. 24, n. 1, p. 621–630, 1988.
- BURGWIN, SL. A method of magnetic testing for sheet material. **Review of Scientific instruments**, American Institute of Physics, v. 7, n. 7, p. 272–277, 1936.
- CHEN, Du-Xing; ZHU, Yong-Hong. Effective magnetic path length in Epstein frame test of electrical steels. **Review of Scientific Instruments**, AIP Publishing, v. 93, n. 5, 2022.
- DOBLER, C. *et al.* Studies of Measurement Uncertainties in the Characterization of Soft Magnetic Materials and their Impact on the Electric Machine Performance Prediction. *In: 2021 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.: s.n.], 2021. P. 4411–4417. DOI: 10.1109/ECCE47101.2021.9595240.
- ELIAS, R. A. *et al.* Estudo de métodos de medição de campo magnético em aços elétricos. **Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica**, n. 16, p. 116–120, 2014.

EPSTEIN, J. The magnetic testing of iron sheets. **ETZ**, v. 21, p. 303–330, 1900.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Magnetic materials** —: Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel strip and sheet by means of an Epstein frame. Suíça, jun. 2008.

MAILHÉ, B. J. **Characterization and modelling of the magnetic behaviour of electrical steel under mechanical**. 2018. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.

MARKETOS *et al.* Calculation of the mean path length of the Epstein frame under non-sinusoidal excitations using the double Epstein method. **Journal of magnetism and magnetic materials**, Elsevier, v. 320, n. 20, p. 2542–2545, 2008.

MENDES, F. B. R. **Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício**. 2004. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.

QINGYI, K. *et al.* Determination of the weighted mean path length of the Epstein frame. **COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, Emerald Group Publishing Limited, v. 33, n. 1/2, p. 224–233, 2014.

SILVA, I. P. C. **Estudos sobre o efeito dos esforços mecânicos no comportamento de valores de parâmetros de modelos de perdas magnéticas**. 2019. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.

STEINMETZ, C. P. On the Law of Hysteresis. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, [s. l.], v. IX, n. 1, p. 1–64, 1892.

STOIAN, E. *et al.* Analysis of the Mechanical Properties of Electrical Steel. **The Scientific Bulletin of "Valahia" University**, 2023.

TERSARIOL, Felipe Garcia Rosa. **Estudo do caminho magnético médio em estrutura eletromagnética monofásica**. 2017. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica. Universidade Federal de Santa Catarina.

Anexos

30 A AC/DC Current Probe TCP0030A Datasheet



TCP0030A is a high-performance, easy-to-use AC/DC current probe designed for use and direct connection to oscilloscopes with the TekVPI™ probe interface. This AC/DC current measurement probe provides greater than 120 MHz of bandwidth with selectable 5 A and 30 A measurement ranges. It also provides exceptional low-current measurement capability and accuracy to current levels as low as 1 mA, important for meeting today's challenging current measurement needs.

Key features

- Easy-to-use and accurate AC/DC current measurements
- Intelligent communication with TekVPI™ oscilloscopes provides:
 - Units scaling and readout. Automatic, on-screen readout of amps and magnitude. Manual setup is not required. Hand calculation from volts to amps is unnecessary
 - Push button degauss and Autozero functionality
 - Probe status and diagnostic indicator LEDs
 - Remote GPIB/USB probe control
- Split-core construction allows easy circuit connection
- High accuracy with typically less than 1% DC gain error
- Low noise and DC drift
- 3rd party safety certification

Key performance specifications

- DC to >120 MHz bandwidth
- 30 A RMS maximum current capability
- 50 A peak pulse current capability
- High accuracy with typically less than 1% DC gain error
- Accurately measures current levels as low as 1 mA

Applications

- Power supplies
- Semiconductor devices
- Power inverters/converters
- Electronic ballasts
- Industrial/consumer electronics
- Mobile communications
- Motor drives
- Transportation systems

Specifications

All specifications are guaranteed unless noted otherwise. All specifications apply to all models unless noted otherwise.

Electrical characteristics

Bandwidth	DC to ≥ 120 MHz
Rise time	≤ 2.92 ns
Maximum DC current	30 A
Maximum RMS current	30 A
Maximum peak pulse current	50 A
Maximum bare wire voltage	150 V CAT II, (insulated wire 300 V CAT II)
Sensitivity	1 mA (on oscilloscopes that support 1 mV/div setting)
DC accuracy	$\pm 3\%$ warranted
Accuracy, typical	DC: $\pm 1\%$ of reading DC to 60 Hz, ≤ 5 A: $\pm 1\%$ 60 Hz – 5 kHz, ≤ 5 A: $\pm 1.5\%$ DC – 5 kHz, > 5 A: $\pm 1.5\%$
Maximum Amp-Second product	500 A $\cdot\mu$ s (in 30 A range)
Insertion impedance	1 m Ω at 10 kHz 3.5 m Ω at 100 kHz 0.08 Ω at 1 MHz 0.15 Ω at 10 MHz 0.7 Ω at 100 MHz 0.85 Ω at 120 MHz
Signal delay	14.5 ns
Current ranges	5 A and 30 A
Power requirements	TCP0030A is powered directly by oscilloscopes with the TekVPI™ interface. Note: For best support, download and install the latest version of the oscilloscope software from www.tek.com .

Physical characteristics

Probe head	
Length	20 cm (7.77 in)
Width	1.6 cm (0.625 in)
Height	3.2 cm (1.25 in)
Maximum conductor size	5 mm (0.197 in)
Cable length	200 cm (79 in)
Shipping weight	1.55 kg (3.44 lb)

EMC environment and safety

Temperature	
Operating	0 °C to 50 °C (32 °F to 122 °F)
Nonoperating	-40 °C to +75 °C (-40 °F to 167 °F)

Humidity

Operating	5% to 95% Relative Humidity (RH) at up to +30 °C; 5% to 85% RH above 30 °C up to +50 °C, noncondensing
Nonoperating	5% to 95% Relative Humidity (RH) at up to +30 °C; 5% to 85% RH above 30 °C up to +75 °C, noncondensing

Altitude

Operating	Up to 3,000 m (10,000 ft.)
Nonoperating	Up to 12,192 m (40,000 ft.)

Compliance labeling	CE (European Union), WEEE (European Union)
----------------------------	--

Ordering information

TCP0030A	AC/DC Current Probe
----------	---------------------

Standard accessories

Instruction manual	071-3006-xx
Probe ground lead - 6 in. length	196-3120-xx
Nylon carrying case	016-1952-xx

Recommended accessories

Current Loop, 1 Turn, 50 Ω with BNC connector used for Performance Verification	Order 067-2396-00
--	-------------------

Warranty

One year parts and labor.

Service options

Opt. C3	Calibration Service 3 Years
Opt. C5	Calibration Service 5 Years
Opt. D3	Calibration Data Report 3 Years (with Opt. C3)
Opt. D5	Calibration Data Report 5 Years (with Opt. C5)
Opt. R3	Repair Service 3 Years (including warranty)
Opt. R3DW	Repair Service Coverage 3 Years (includes product warranty period). 3-year period starts at time of instrument purchase
Opt. R5	Repair Service 5 Years (including warranty)
Opt. R5DW	Repair Service Coverage 5 Years (includes product warranty period). 5-year period starts at time of instrument purchase
Opt. SILV600	Standard warranty extended to 5 years



Tektronix is ISO 14001:2015 and ISO 9001:2015 certified by DEKRA.

ASEAN / Australasia (65) 6356 3900
 Belgium 00800 2255 4835*
 Central East Europe and the Baltics +41 52 675 3777
 Finland +41 52 675 3777
 Hong Kong 400 820 5835
 Japan 81 (120) 441 046
 Middle East, Asia, and North Africa +41 52 675 3777
 People's Republic of China 400 820 5835
 Republic of Korea +822 6917 5084, 822 6917 5080
 Spain 00800 2255 4835*
 Taiwan 886 (2) 2656 6688

Austria 00800 2255 4835*
 Brazil +55 (11) 3759 7627
 Central Europe & Greece +41 52 675 3777
 France 00800 2255 4835*
 India 000 800 650 1835
 Luxembourg +41 52 675 3777
 The Netherlands 00800 2255 4835*
 Poland +41 52 675 3777
 Russia & CIS +7 (495) 6647564
 Sweden 00800 2255 4835*
 United Kingdom & Ireland 00800 2255 4835*

Balkans, Israel, South Africa and other ISE Countries +41 52 675 3777
 Canada 1 800 833 9200
 Denmark +45 80 88 1401
 Germany 00800 2255 4835*
 Italy 00800 2255 4835*
 Mexico, Central/South America & Caribbean 52 (55) 56 04 50 90
 Norway 800 16098
 Portugal 80 08 12370
 South Africa +41 52 675 3777
 Switzerland 00800 2255 4835*
 USA 1 800 833 9200

* European toll-free number. If not accessible, call: +41 52 675 3777

For Further Information. Tektronix maintains a comprehensive, constantly expanding collection of application notes, technical briefs and other resources to help engineers working on the cutting edge of technology. Please visit www.tek.com.
 Copyright © Tektronix, Inc. All rights reserved. Tektronix products are covered by U.S. and foreign patents, issued and pending. Information in this publication supersedes that in all previously published material. Specification and price change privileges reserved. TEKTRONIX and TEK are registered trademarks of Tektronix, Inc. All other trade names referenced are the service marks, trademarks, or registered trademarks of their respective companies.

9 Feb 2023 51W-19042-11
www.tek.com

Tektronix[®]

Instructions

Tektronix

P6139A
10X Passive Probe
063-0870-05

www.tektronix.com



Copyright © Tektronix, Inc. All rights reserved.

Tektronix products are covered by U.S. and foreign patents, issued and pending. Information in this publication supercedes that in all previously published material. Specifications and price change privileges reserved.

Tektronix, Inc., P.O. Box 500, Beaverton, OR 97077-1000

TEKTRONIX and TEK are registered trademarks of Tektronix, Inc.

WARRANTY

Tektronix warrants that the products that it manufactures and sells will be free from defects in materials and workmanship for a period of one (1) year from the date of purchase from an authorized Tektronix distributor. If any such product proves defective during this warranty period, Tektronix, at its option, either will repair the defective product without charge for parts and labor, or will provide a replacement in exchange for the defective product. Batteries are excluded from this warranty.

In order to obtain service under this warranty, Customer must notify Tektronix of the defect before the expiration of the warranty period and make suitable arrangements for the performance of service. Customer shall be responsible for packaging and shipping the defective product to the service center designated by Tektronix, shipping charges prepaid, and with a copy of customer proof of purchase. Tektronix shall pay for the return of the product to Customer if the shipment is to a location within the country in which the Tektronix service center is located. Customer shall be responsible for paying all shipping charges, duties, taxes, and any other charges for products returned to any other locations.

This warranty shall not apply to any defect, failure or damage caused by improper use or improper or inadequate maintenance and care. Tektronix shall not be obligated to furnish service under this warranty a) to repair damage resulting from attempts by personnel other than Tektronix representatives to install, repair or service the product; b) to repair damage resulting from improper use or connection to incompatible equipment; c) to repair any damage or malfunction caused by the use of non-Tektronix supplies; or d) to service a product that has been modified or integrated with other products when the effect of such modification or integration increases the time or difficulty of servicing the product.

THIS WARRANTY IS GIVEN BY TEKTRONIX WITH RESPECT TO THE LISTED PRODUCTS IN LIEU OF ANY OTHER WARRANTIES, EXPRESS OR IMPLIED. TEKTRONIX AND ITS VENDORS DISCLAIM ANY IMPLIED WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE. TEKTRONIX' RESPONSIBILITY TO REPAIR OR REPLACE DEFECTIVE PRODUCTS IS THE SOLE AND EXCLUSIVE REMEDY PROVIDED TO THE CUSTOMER FOR BREACH OF THIS WARRANTY. TEKTRONIX AND ITS VENDORS WILL NOT BE LIABLE FOR ANY INDIRECT, SPECIAL, INCIDENTAL, OR CONSEQUENTIAL DAMAGES IRRESPECTIVE OF WHETHER TEKTRONIX OR THE VENDOR HAS ADVANCE NOTICE OF THE POSSIBILITY OF SUCH DAMAGES.

Contacting Tektronix

Phone	1-800-833-9200*
Address	Tektronix, Inc. Department or name (if known) 14200 SW Karl Braun Drive P.O. Box 500 Beaverton, OR 97077 USA
Web site	www.tektronix.com
Sales support	1-800-833-9200, select option 1*
Service support	1-800-833-9200, select option 2*
Technical support	Email: techsupport@tektronix.com 1-800-833-9200, select option 3* 6:00 a.m. - 5:00 p.m. Pacific time

* **This phone number is toll free in North America. After office hours, please leave a voice mail message. Outside North America, contact a Tektronix sales office or distributor; see the Tektronix web site for a list of offices.**

General Safety Summary

Review the following safety precautions to avoid injury and prevent damage to this product or any products connected to it. To avoid potential hazards, use this product only as specified.

Only qualified personnel should perform service procedures.

To Avoid Fire or Personal Injury

Connect and Disconnect Properly. Do not connect or disconnect probes or test leads while they are connected to a voltage source.

Observe All Terminal Ratings. To avoid fire or shock hazard, observe all ratings and markings on the product. Consult the product manual for further ratings information before making connections to the product.

The common terminal is at ground potential. Do not connect the common terminal to elevated voltages.

Do not apply a potential to any terminal, including the common terminal, that exceeds the maximum rating of that terminal.

Do Not Operate With Suspected Failures. If you suspect there is damage to this product, have it inspected by qualified service personnel.

Do Not Operate in Wet/Damp Conditions.

Do Not Operate in an Explosive Atmosphere.

Keep Product Surfaces Clean and Dry.

Symbols and Terms

Terms in this Manual. These terms may appear in this manual:



WARNING. Warning statements identify conditions or practices that could result in injury or loss of life.



CAUTION. Caution statements identify conditions or practices that could result in damage to this product or other property.

Terms on the Product. These terms may appear on the product:

DANGER indicates an injury hazard immediately accessible as you read the marking.

WARNING indicates an injury hazard not immediately accessible as you read the marking.

CAUTION indicates a hazard to property including the product.

Symbols on the Product. The following symbols may appear on the product:



DANGER
High Voltage



Protective Ground
(Earth) Terminal



ATTENTION
Refer to Manual



Double
Insulated

**Certifications and
Compliances**

Refer to the specifications section for a listing of certifications and compliances that apply to this product.

Operating Basics

The P6139A is a compact high impedance passive probe designed for use with Tektronix TDS3000 and TDS500 Series digitizing oscilloscopes. The P6139A has a 1.3 meter cable and is fully compatible with the Tektronix family of compact size (3.5 mm) probe accessories. The *Replaceable Parts* list beginning on page 7 identifies the standard and optional accessories for the P6139A probe.



WARNING. To avoid electric shock when using the probe, do not touch the metallic portions of the probe head while connected to a voltage source.

Probe Compensation

Due to variations in oscilloscope input characteristics, probe low-frequency compensation may need adjustment after moving the probe from one oscilloscope to another. If a 1 kHz calibrated square wave displayed at 1 ms/division shows significant differences between the leading and trailing edges, perform the following steps to optimize low-frequency compensation.

1. Connect the probe to the calibration signal on the oscilloscope front panel.
2. Press **AUTOSET** or otherwise adjust your digitizing oscilloscope to display a meaningful waveform.
3. Adjust the trimmer in the probe (accessible through the compensation box) until you see a perfectly flat-top square wave on the display. See Figure 1.

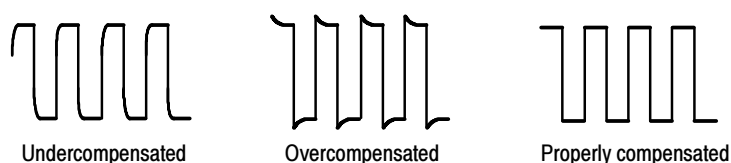


Figure 1: Probe compensation waveforms

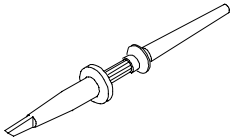
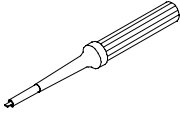
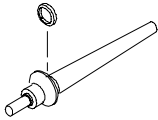
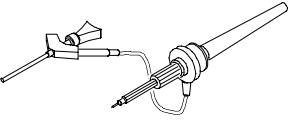
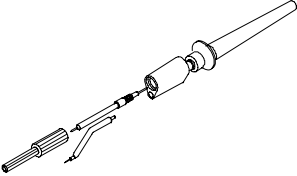
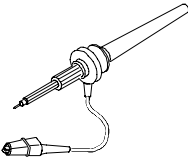
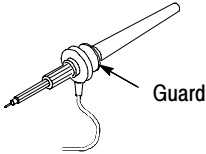
Cleaning

To remove accumulated dirt from the probe exterior, use a soft cloth dampened with a mild detergent and water solution or isopropyl alcohol. Do not use solvents such as benzene, toluene, xylene, or acetone. Avoid abrasive cleaners.

Features and Accessories

Table 1 illustrates the features and standard accessories of the P6139A probe.

Table 1: Features and Accessories

Feature/Accessory	Description	Applications/Notes
	Retractable hook tip	Connects the probe tip to wires and component leads for hands-free measurement. NOTE. For a solid connection, firmly push and twist the hook tip onto the probe tip before using.
	Adjustment tool	Used to adjust probe compensation. Access the adjustment through the opening in the compensation box.
	Color marker bands	Color codes the probe to the oscilloscope input when more than one probe is in use. Clip one band around the strain relief of the probe head and the matching band on the strain relief of probe output.
	SMT KlipChip™ and ground lead	Connects the probe ground to small or hard to reach ground reference points.
	Low-inductance ground	The ground collar and short lead connect the probe ground to a ground reference close to the signal source. The short lead minimizes aberrations on high-frequency signals caused by the inductance of the ground lead.
	Ground lead with insulated alligator clip	Connects the probe ground to ground reference.
	Guard	Keeps fingers away from the probe tip for protection against electric shock.



WARNING. To avoid electric shock when using the probe, keep fingers behind the guard on the probe body.

Specifications

The characteristics listed in Table 2 apply to a P6139A probe installed on a Tektronix TDS3054 oscilloscope unless otherwise noted.

Specifications apply when the instrument warms up for a period of at least 20 minutes in an environment that does not exceed the limits described in Table 3 on page 4.

Table 2: Electrical characteristics

Characteristic	Description
Attenuation ¹	10X ±0.5% at DC
Input Resistance ¹	10 MΩ ±0.5%
Input Capacitance	8.0 pF (±0.8 pF)
Compensation Range	8 pF to 18 pF
System Bandwidth (-3 dB)	500 MHz (TDS3054) or TDS500 series 100 MHz (TDS3012)
Maximum Input Voltage ^{2,3}	400 V RMS CAT I or 400 V DC CAT I 300 V RMS CAT II or 300 V DC CAT II 150 V RMS CAT III or 150 V DC CAT III 590 V peak, <50% DF, <1 sec PW 930 V peak, <20% DF, <1 sec PW 1250 V peak, <10% DF, <50 μsec PW See Figure 4 for voltage derating curve.

¹ System characteristic.

² As defined in EN61010-1. See Certifications and compliances in Table 4.

³ RMS=Root Mean Square=rms=The square root of the average of the sum of the squares of the instantaneous voltage in one cycle = $\sqrt{\sum (fx_i)^2/n}$.
300 VDC=300V RMS, 420 V Peak (sinewave)=300 V RMS See Figure 2.

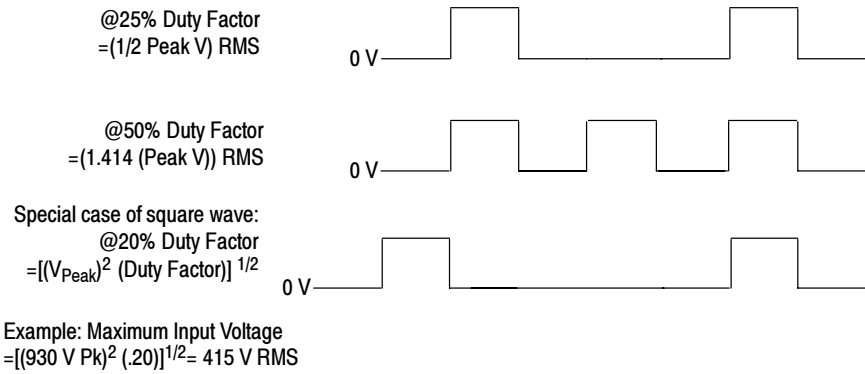


Figure 2: Maximum input voltage calculation example

Table 3: Physical and environmental characteristics

Characteristic	Description
Net Weight (Including Accessories)	<110 g (0.24 lb)
Temperature Range	
Operating	-15° C to +65° C (+5° F to +149° F)
Nonoperating	-62° C to +85° C (-80° F to +185° F)
Humidity ¹	Five cycles (120 hr) at 95% to 97% relative humidity
Altitude	< 2000 meters

¹ Tektronix standard 062-2847-00, class 3. Refer to MIL-E-16400F, paragraph 4.5.9 through 4.5.9.5.1, class 4.

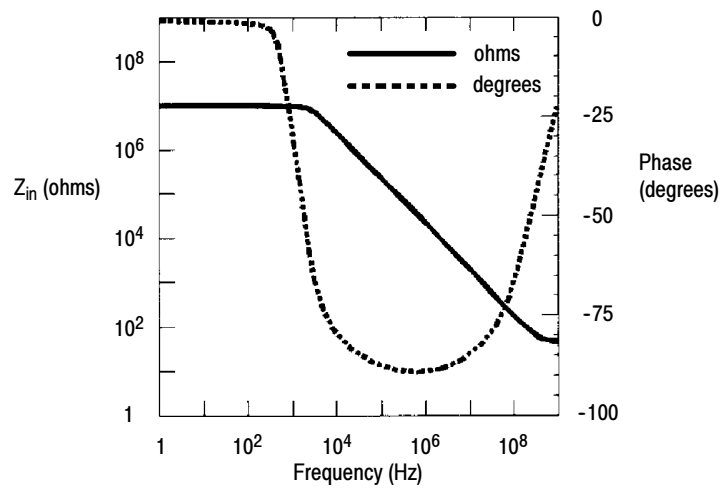


Figure 3: Typical P6139A input impedance

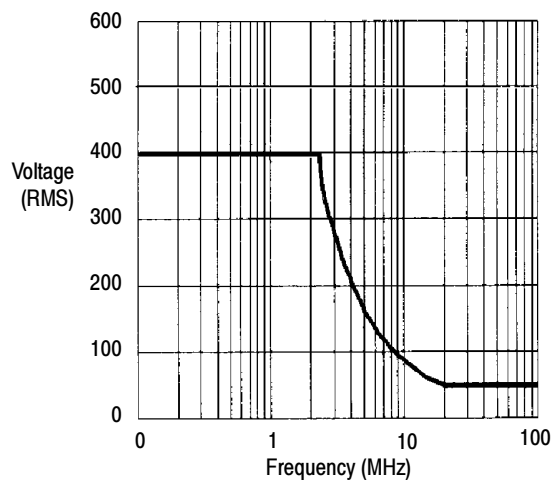


Figure 4: Typical P6139A voltage derating

Table 4: Certifications and compliances

EC Declaration of Conformity	<p>Compliance was demonstrated to the following specification as listed in the Official Journal of the European Communities:</p> <p>Low Voltage Directive 73/23/EEC as amended by 93/68/EEC:</p> <p>EN 61010-1/A2 Safety requirements for electrical equipment for measurement, control, and laboratory use</p> <p>EN 61010-2-031:1994 Particular requirements for hand-held probe assemblies for electrical measurement and test</p>								
Overvoltage Category	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="708 752 943 790">Category:</td> <td data-bbox="970 752 1431 790">Examples of Products in this Category:</td> </tr> <tr> <td data-bbox="708 826 943 864">CAT III</td> <td data-bbox="970 826 1431 864">Distribution-level mains, fixed installation</td> </tr> <tr> <td data-bbox="708 871 943 909">CAT II</td> <td data-bbox="970 871 1431 936">Local-level mains, appliances, portable equipment</td> </tr> <tr> <td data-bbox="708 943 943 981">CAT I</td> <td data-bbox="970 943 1431 1003">Signal levels in special equipment or parts of equipment, telecommunications, electronics</td> </tr> </table>	Category:	Examples of Products in this Category:	CAT III	Distribution-level mains, fixed installation	CAT II	Local-level mains, appliances, portable equipment	CAT I	Signal levels in special equipment or parts of equipment, telecommunications, electronics
Category:	Examples of Products in this Category:								
CAT III	Distribution-level mains, fixed installation								
CAT II	Local-level mains, appliances, portable equipment								
CAT I	Signal levels in special equipment or parts of equipment, telecommunications, electronics								
Pollution Degree 2	Do not operate in environments where conductive pollutants may be present.								
Safety	<p>UL3111-1, First Edition & IEC61010-2-031, First Edition CSA C22.2 No. 1010.1-92 & CAN/CSA C22.2 No. 1010.2.031-94 EN61010-1/A2 EN61010-2-031 Pollution Degree 2</p>								

Replaceable Parts

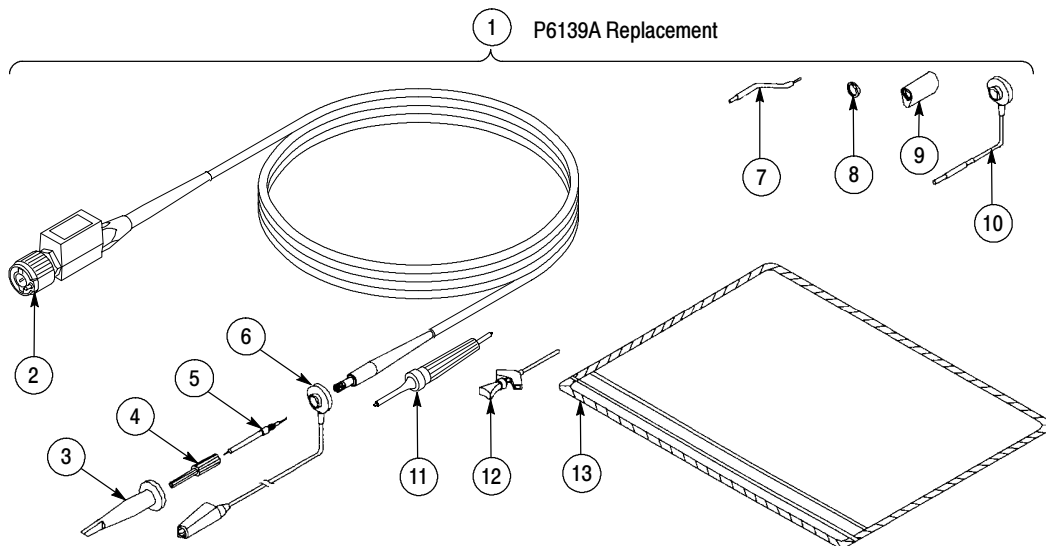


Figure 5: P6139A probe with standard accessories

Replaceable parts: P6139A probe and standard accessories

Fig. & index number	Tektronix part number	Serial no. effective	Serial no. discont'd	Qty	Name & description	Mfr. code	Mfr. part number
P6139A							
5 -1	P6139A			1	P6139A PASSIVE PROBE REPLACEMENT		
STANDARD ACCESSORIES							
-2	131-3219-00			1	CONN,RF PLUG:BNC,MALE	24931	28P266-3
-3	013-0107-07			1	TIP,PROBE:MINIATURE/COMPACT SIZE, RETRACTABLE HOOK ASSY	80009	013-0107-07
-4	204-1049-00			1	BODY SHELL:TIP COVER	TK2565	204-1049-00
-5	206-0441-00			1	PROBE TIP ASSY:10X,8.0PF,9M OHM	80009	206-0441-00
-6	196-3305-00			1	LEAD,ELECTRICAL:22 AWG,6.0 L,W/CLIP	TK2469	196-3305-00
-7	195-4240-00			1	LEAD,ELECTRICAL:0.025 DIA,COPPER,2.3 L	TK2469	195-4240-00
-8	016-0633-00			1	MARKER SET,CA:2 EA VARIOUS COLORS	80009	016-0633-00
-9	343-1003-01			1	COLLAR,GND:P6130	TK2565	343-1003-01
-10	196-3113-02			1	LEAD,ELECTRICAL:STRD,22 AWG,6.0 L,8-N	TK2469	196-3113-02
-11	003-1433-02			1	SCREWDRIVER:ADJUSTMENT TOOL	TK2565	003-1433-02
-12	206-0364-00			1	TIP,PROBE:MICROCKT TEST,0.05 CTR	80009	206-0364-00
-13	-----			1	POUCH,ACCESSORY:		
	063-0870-XX			1	DATA SHEET:TECHNICAL,P6139A,DP	TK2548	063-0870-XX

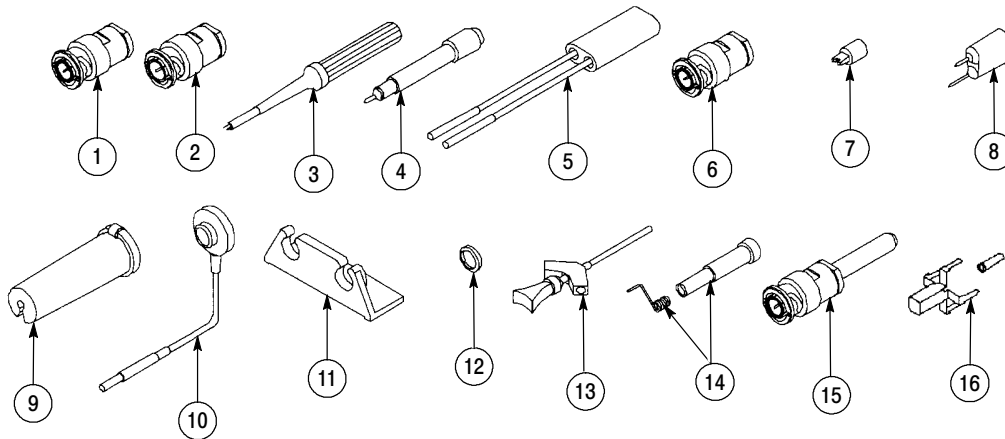


Figure 6: P6139A probe optional accessories

Replaceable parts: P6139A probe optional accessories

Fig. & index number	Tektronix part number	Serial no. effective	Serial no. discont'd	Qty	Name & description	Mfr. code	Mfr. part number
OPTIONAL ACCESSORIES							
6-1	013-0226-00			1	CONNECTOR,BNC:BNC TO PROBE TIP ADAPTER	24931	28P264-2
-2	013-0227-00			1	CONNECTOR,BNC:50 OHM,BNC TO P TIP ADAPTER	24931	28P312-1
-3	003-1433-02			1	SCREWDRIVER:ADJUSTMENT TOOL	80009	003-1433-02
-4	013-0202-03			1	ADAPTER,PROBE:SUBMINIATURE/COMPACT TO MIN	TK2565	013-0202-03
					NOTE: ITEMS 5 THROUGH 9 ARE USABLE WHEN THE SUBMINIATURE/COMPACT TO MINIATURE PROBE TIP ADAPTER IS USED. (ITEM 4)		
-5	015-0325-01			1	ADAPTER,PROBE:PROBE TO CONNECTOR PINS	TK2565	015-0325-01
-6	013-0084-04			1	ADAPTER,CONN:BNC TO PROBE	80009	013-0084-04
-7	015-0201-07			1	TIP,PROBE:IC TEST,PKG OF 10	80009	015-0201-07
	015-0201-08			1	TIP,PROBE:IC TEST,PKG OF 100	80009	015-0201-08
-8	013-0085-00			1	TIP,PROBE:GROUNDING	80009	013-0085-00
-9	352-0670-00			1	HOLDER,PROBE:ATTENUATOR TIPS (3)	TK2565	352-0670-00
-10	196-3113-03			1	LEAD,ELECTRICAL:STRD,22 AWG,3.0 L,8-N	TK2469	196-3113-03
-11	352-0351-00			1	HOLDER,PROBE:BLACK ABS P6000 SERIES	7X318	1127
-12	016-0633-00			1	MARKER SET,CA:2 EA VARIOUS COLORS	80009	016-0633-00
-13	SMG50			1	SMT KLIPCHIP:20 ADAPTERS		
-14	016-1077-00			1	ACCESSORY KIT:GND TIP CONTACT,PKG OF 2 EA OF 5 LENGTHS W/COVER SHELL	80009	016-1077-00
-15	013-0254-00	9307		1	ADAPTER,CONN:BNC TO PROBE TIP,MALE	24931	28P-302-2
-16	131-5031-00	8926		1	CONNECTOR,PROBE:PKG OF 25,COMPACT	8009	131-5031-00

Manufacturers cross index

Mfr. code	Manufacturer	Address	City, state, zip code
0J260	COMTEK MANUFACTURING OF OREGON	P O BOX 4200 M/S 16-207	BEAVERTON, OR 970764200
24931	BERG ELECTRONICS INC	BERG ELECTRONICS RF/COAXIAL DIV 2100 EARLYWOOD DR PO BOX 547	FRANKLIN, IN 46131
7X318	KASO PLASTICS INC	11013 A NE 39TH	VANCOUVER, WA 98662
80009	TEKTRONIX INC	14150 SW KARL BRAUN DR PO BOX 500	BEAVERTON, OR 97077-0001
TK2469	UNITREK CORPORATION	3000 LEWIS & CLARK HWY SUITE 2	VANCOUVER, WA 98661
TK2548	XEROX CORPORATION	14181 SW MILLIKAN WAY	BEAVERTON, OR 97005
TK2565	VISION PLASTICS INC	26000 SW PARKWAY CENTER DRIVE	WILSONVILLE, OR 97070