

**PEDRO ARMANDO DA SILVA JÚNIOR**

**BANCADA PARA ENSAIOS DE MATERIAIS  
FERROMAGNÉTICOS EM CHAPA ÚNICA SOB  
CAMPOS ROTACIONAIS**

**FLORIANÓPOLIS  
2007**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**BANCADA PARA ENSAIOS DE MATERIAIS  
FERROMAGNÉTICOS EM CHAPA ÚNICA SOB  
CAMPOS ROTACIONAIS**

Tese submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como parte dos requisitos para a  
obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

**PEDRO ARMANDO DA SILVA JÚNIOR**

Florianópolis, abril de 2007.

# **BANCADA PARA ENSAIOS DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS EM CHAPA ÚNICA SOB CAMPOS ROTACIONAIS**

PEDRO ARMANDO DA SILVA JÚNIOR

‘Esta tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina.’

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Orientador

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Co-Orientador

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:

---

Prof. Nelson Sadowski, Dr.  
Presidente

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

---

Prof. Silvio Ikuyo Nabeta, Dr.

---

Prof. Adalberto José Batista, Dr.

---

Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr.

---

Prof. Stéphane Clénet, Dr.

*Este trabalho é dedicado a toda minha família,  
pelo incentivo e compreensão durante a  
realização desta tese, em especial:*

*Aos meus pais Pedro e Ana Rosa;*

*A minha esposa Fátima e a minha filha Beatriz.*

# AGRADECIMENTO

Este trabalho foi desenvolvido com a colaboração de diversas pessoas, entidades e empresas as quais, na sua conclusão, gostaria de mencionar e agradecer.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Nelson Sadowski, por ter me proporcionado a oportunidade de realizar esta tese e, principalmente, por sugerir, motivar e indicar opções nos momentos de dúvida;

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Nelson Jhoe Batistela, pelos conhecimentos transmitidos, pelas horas despendidas em discussões e, acima de tudo, por termos estreitado nosso laço de amizade ao longo do trabalho;

Aos estudantes de graduação em engenharia elétrica Mauricio Rigoni e Artur Posenato Garcia por suas indispensáveis contribuições na montagem da bancada e na elaboração dos programas de geração e aquisição de sinais;

Por propiciar um ambiente agradável e harmônico para o desenvolvimento da tese, gostaria de agradecer de forma geral os docentes e discentes do GRUCAD e a senhorita Celly D. Melo, secretária executiva;

Aos meus colegas, contemporâneos de curso, cujas conversas periódicas trouxeram-me um maior conhecimento da engenharia e das ciências: Claudenei Simão, Evandro J. Meurer e Filomena B. R. Mendes; e a Jean V. Leite também por nossas discussões e colaborações mútuas em artigos publicados;

Aos professores membros da banca de qualificação, Dr. Patrick Kuo-Peng, Dr. Silvio I. Nabeta e Dr. Walter P. Carpes Jr., e da banca de exame final de tese, Dr. Adalberto J. Batista, Dr. João P. Assumpção Bastos, Dr. Silvio I. Nabeta e Dr. Stéphane Clenet, pelas discussões e sugestões que contribuíram com a finalização do trabalho;

Agradeço a Clenice R. Machado, Mauricio Rigoni e Lidiane Scariot pela paciência e atenção que dispensaram na revisão do texto; e a Nina Balconi pela confecção de alguns desenhos;

Aos professores e colegas do laboratório L2EP da *Université des Sciences et Technologies* de Lille que me receberam e me auxiliaram durante a realização de estágio naquela universidade, em especial: Dr. Francis Piriou, Dr. Stéphane Clenet, Dr. A. Benabou, Dr. Y. LeMenach, Dr. S. Xiadong, G. Krebs e F. Boloni;

A CAPES pelo suporte financeiro, previsto no acordo CAPES/COFECUB nº 0503/05, que permitiu a realização do meu estágio no L2EP ao longo de quatro meses;

Ao CEFET-SC pela liberação da minha carga horária durante a maior parte do tempo que desenvolvi esta capacitação, destacando a área de Telecomunicações, da qual pertenço, pelo apoio; e aos colegas do GERAC pelo incentivo;

A empresa EMBRACO pelo fornecimento de componentes para a montagem da bancada e de amostras para realização dos ensaios, em particular aos engenheiros Aleandro A. Espíndola e Luiz Von Dokonal.

Ao INEP-UFSC, por intermédio do prof. Dr. Ivo Barbi, pela confecção das placas de circuito impresso utilizadas na bancada, em especial aos senhores Antônio Luiz S. Pacheco e Luiz M. Coelho.

Resumo da Tese apresentada à UFSC como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

## **BANCADA PARA ENSAIOS DE MATERIAIS FERROMAGNÉTICOS EM CHAPA ÚNICA SOB CAMPOS ROTACIONAIS**

**Pedro Armando da Silva Júnior**

Abril / 2007

Orientador: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Co-Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Dispositivos Eletromagnéticos.

Palavras-chave: caracterização de materiais magnéticos, perdas magnéticas, teste rotacional de chapa única, medidas magnéticas, conversores estáticos controlados.

Número de Páginas: 109.

**RESUMO:** A tese aborda o desenvolvimento e a implementação de uma bancada para ensaios de materiais ferromagnéticos baseada no teste rotacional de chapa única (RSST). A bancada RSST é composta de um quadro magnético, inversores de frequência, malhas de controle, sensores de campo e de indução magnética, amplificadores de sinais, e, ainda, placas de geração e aquisição de sinais baseadas em computadores pessoais. Uma nova técnica é empregada nesta aplicação na qual os inversores de tensão são comandados por malhas de controle realimentado do tipo modo deslizante. As principais vantagens desta técnica são: capacidade de operação dos inversores em uma ampla faixa de frequências e amplitudes da tensão de saída; não necessitar de prévio conhecimento do comportamento do material a ser caracterizado e controlar a forma de onda do fluxo magnético na amostra em teste, desde baixas induções até próximo à saturação do material, com baixa distorção harmônica em sinais senoidais. Além disso, a bancada pode aplicar também formas de ondas arbitrárias de indução magnética na amostra. A influência que a blindagem exerce nas medições de campo magnético no dispositivo e as técnicas de medição de indução são analisadas por meio de resultados experimentais e simulações numéricas em 3D.

Abstract of Thesis presented to UFSC as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor in Electrical Engineering.

## **WORKBENCH FOR ASSAYS OF FERROMAGNETICS MATERIALS IN SINGLE SHEET UNDER ROTATIONAL FIELDS**

**Pedro Armando da Silva Júnior**

April / 2007

Advisor: Prof. Nelson Sadowski, Dr.

Co-Advisor: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.

Area of Concentration: Electromagnetism and Electromagnetic Devices

Keywords: magnetic characterization, magnetic losses, rotational single sheet tester, magnetic measurements, controlled voltage inverters.

Number of Pages: 109.

**ABSTRACT:** The thesis tackles the development and the implementation of ferromagnetic materials workbench based on the rotational single sheet tester (RSST). The RSST workbench is composed by a magnetic yoke, voltage inverters, feedback controllers, magnetic field and induction sensors, signal amplifiers as well as signal generation boards and acquisition boards based on personal computers. A new technique is employed in this application in which the voltage inverters having analog feedback control of sliding mode type are used. The main advantages of this technique are: the inverters allow the operation in a wide band of frequencies and voltage magnitude variation; it is not necessary a previous knowledge of the material behavior to be characterized and the control can keep the induction waveform shape in the sample, from low inductions up to the material saturation. With a sinusoidal induction shape, the voltage waveforms of induction sensors present low total harmonic distortion (THD), even for high inductions levels. Moreover, the workbench can also apply any arbitrary induction waveforms in the sample. The shielding positioning influences on the magnetic field measurements in a RSST and induction measurement techniques are analyzed by means of experimental results and 3D numerical simulations.



# SUMÁRIO

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS .....	x
ABREVIATURAS .....	xii
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Posicionamento do Problema e Motivação da Pesquisa .....	1
1.2 Objetivos .....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	4
2.1 O Aço para Aplicações Elétricas .....	4
2.2 As Perdas Magnéticas em Campos Alternados .....	6
2.3 As Medições de Perdas Magnéticas em Campos Alternados.....	9
2.4 As Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais .....	13
2.5 As Medições de Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais.....	21
2.5.1 Os Sensores de Indução Magnética .....	21
2.5.2 Os Sensores de Campo Magnético.....	24
2.5.3 O Efeito da Blindagem e do Entreferro.....	26
2.5.4 O Controle da Forma de Onda da Indução .....	28
2.6 Outras Considerações .....	30
3. APARATO EXPERIMENTAL .....	31
3.1 Considerações Iniciais .....	31
3.2 Bloco Funcional 1: Rede de Energia Comercial.....	33
3.3 Bloco Funcional 2: Quadro Magnético.....	33
3.4 Bloco Funcional 3: Inversor de Tensão .....	34
3.5 Bloco Funcional 4: Filtro de Saída.....	36
3.6 Blocos Funcionais 5 e 6: Fonte de Tensão Contínua.....	36
3.7 Bloco Funcional 7: Isolamento Galvânico.....	37
3.8 Bloco Funcional 8: Autotransformador Regulável .....	37
3.9 Bloco Funcional 9: Controle do Inversor.....	37
3.10 Bloco Funcional 10: Sinal de Referência.....	39
3.11 Bloco Funcional 11: Comando dos Interruptores .....	39
3.12 Bloco Funcional 12: Sistema de Aquisição de Dados .....	39
3.13 Bloco Funcional 13: Sensores de Indução e Campo Magnético.....	41
3.13.1 Os Sensores de Indução Magnética .....	41
3.13.2 Os Sensores de Campo Magnético.....	42
3.14 Aspectos Gerais.....	44

4.	ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA BLINDAGEM.....	46
4.1	Resultados Experimentais em Campos Alternantes para Variação da Distância da Blindagem .....	46
4.2	Simulação em Campos Alternantes para Variação da Distância da Blindagem.....	56
4.3	Ensaio em Campos Rotacionais para Variação da Distância da Blindagem .....	59
4.4	Outros Testes com Blindagem .....	62
4.5	Conclusão do Capítulo.....	66
5.	ANÁLISE DO POSICIONAMENTO DOS SENSORES DE INDUÇÃO MAGNÉTICA.....	67
5.1	Simulação em Campos Rotacionais.....	67
5.2	Resultados Experimentais em Campos Rotacionais.....	71
5.3	Conclusões do Capítulo.....	75
6.	ANÁLISE DO MÉTODO DE CONTROLE DA INDUÇÃO MAGNÉTICA NA AMOSTRA .....	76
6.1	Medições de Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais .....	76
6.2	Trajetórias dos Campos Magnéticos Rotacionais .....	80
6.3	Conclusões do Capítulo.....	82
7.	RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DA BANCADA RSST.....	83
7.1	Resultados Experimentais em Campos Rotacionais para Sinais Senoidais.....	83
7.2	Resultados Experimentais em Campos Rotacionais para Sinais Arbitrários .....	91
7.3	Conclusões do Capítulo.....	99
8.	CONCLUSÕES FINAIS E PERSPECTIVAS.....	100
8.1	Conclusões Finais.....	100
8.2	Perspectivas .....	102
9.	ANEXO .....	104
9.1	Solenóide de Referência para Calibração dos Sensores de Campo Magnético ...	104
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	105

# LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

$\alpha$	- Expoente da indução no modelo de Steinmetz.....	[adimensional]
$\mu_o$	- Permeabilidade magnética do vácuo ( $1,25664 \times 10^{-6}$ ).....	[H/m]
$A$	- Amplitude de um sinal .....	[dependente da grandeza]
$A_B$	- Área da seção transversal da bobina .....	[m <sup>2</sup> ]
$B$	- Indução magnética .....	[T]
$B_c$	- Indicação de bobina sensora no centro da amostra .....	[adimensional]
$B_e$	- Indicação de bobina sensora envolvendo a amostra .....	[adimensional]
$B_r$	- Indução magnética no sentido radial .....	[T]
$B_t$	- Indução magnética no sentido transversal .....	[T]
$B_x$	- Indução magnética no eixo x .....	[T]
$B_y$	- Indução magnética no eixo y .....	[T]
$d$	- Distância .....	[mm]
$f$	- Frequência .....	[Hz]
$f_l$	- Frequência de caracterização do material .....	[Hz]
$H$	- Campo magnético.....	[A/m]
$H_x$	- Campo magnético no eixo x .....	[A/m]
$H_y$	- Campo magnético no eixo y .....	[A/m]
$i_p$	- Corrente no enrolamento primário.....	[A]
$k_e$	- Constante relativa às perdas excedentes no regime senoidal.....	[adimensional]
$k_f$	- Const. relativa às perdas por correntes induzidas no reg. senoidal ...	[adimensional]
$k_h$	- Constante relativa às perdas por histerese no regime senoidal .....	[adimensional]
$I$	- Corrente elétrica .....	[A]
$l$	- Comprimento .....	[mm]
$l_m$	- Caminho magnético médio .....	[m]
$m_v$	- Massa específica do material .....	[kg/m <sup>3</sup> ]
$N$	- Número de espiras .....	[espiras]
$N_p$	- Número de espiras do enrolamento primário .....	[espiras]
$N_s$	- Número de espiras do enrolamento secundário .....	[espiras]
$P_e$	- Perdas mag. medidas com o sensor de indução envolvendo a amostra.....	[W/kg]
$P_c$	- Perdas mag. medidas com o sensor de indução no centro da amostra .....	[W/kg]
$P_{MA}$	- Perdas magnéticas medidas com o inversor operando em malha aberta .....	[W/kg]
$P_{MF}$	- Perdas magnéticas medidas com o inversor operando em malha fechada ....	[W/kg]

$S$	- Área da seção transversal.....	[m <sup>2</sup> ]
$t$	- Tempo.....	[s]
$T$	- Período de um ciclo de sinal .....	[s]
$THD$	- Taxa de distorção harmônica total ( <i>Total Harmonic Distortion</i> ) .....	[%]
$V(t)$	- Tensão em função do tempo .....	[V]
$V_{ef}$	- Valor eficaz da tensão .....	[V]
$v_s(t)$	- Tensão em função do tempo no secundário .....	[V]
$v_p(t)$	- Tensão em função do tempo no primário.....	[V]
$\omega$	- Frequência angular elétrica .....	[rad/s]
$W_E$	- Perdas excedentes no ferro sob regime puramente senoidal.....	[J/kg]
$W_F$	- Perdas no ferro por correntes induzidas sob regime puramente senoidal.....	[J/kg]
$W_H$	- Perdas no ferro por histerese sob regime puramente senoidal .....	[J/kg]
$W_T$	- Perdas totais por ciclo .....	[J/kg]

# ABREVIATURAS

AWG	- Padrão norte-americano de unidade de medida de diâmetros de fios e cabos elétricos ( <i>American Wire Gauge</i> ).
FeSi	- Ferro-silício
GRUCAD	- Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos da UFSC.
PWM	- Modulação por Largura de Pulso ( <i>Pulse Wide Modulation</i> ).
SST	- Teste de Chapa Única ( <i>Single Sheet Tester</i> ).
RSST	- Teste Rotacional de Chapa Única ( <i>Rotational Single Sheet Tester</i> ).
UFSC	- Universidade Federal de Santa Catarina.
VI	- Instrumento Virtual ( <i>Virtual Instrument</i> ) desenvolvido em ambiente LabVIEW.
2D	- Duas dimensões.
3D	- Três dimensões.

# **1 – Introdução**

## **1.1 - Posicionamento do Problema e Motivação da Pesquisa**

Nas últimas décadas, tem-se notado um crescimento vertiginoso da área tecnológica. Novos materiais, processos produtivos e produtos disputam um mercado consumidor cada vez mais competitivo. Neste aspecto produtos de melhor qualidade a baixo custo de produção são fontes de investimento em pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

No setor elétrico, além dos aspectos levantados anteriormente, dá-se especial atenção ao estudo do rendimento dos produtos e na utilização adequada dos materiais. A eficiência energética é um tema de destaque na atualidade, seguindo uma tendência de tornar-se cada vez mais importante na medida em que os recursos não renováveis se extinguem ou suas explorações são normatizadas com regras cada vez mais restritivas.

Os produtos e equipamentos elétricos empregam uma grande parcela de materiais ferromagnéticos. Uma característica desejável deste material é que não tivesse saturação do número de linhas de fluxo possíveis que atravessem seções transversais do circuito magnético, e que a alternância deste fluxo não causasse perdas energéticas. Isto tem motivado várias pesquisas na área de ciência dos materiais. Todavia, para a aplicabilidade dos materiais em equipamentos elétricos, são necessários modelos que representem de maneira mais precisa o comportamento das várias grandezas eletromagnéticas em questão.

Há na comunidade científica vários trabalhos publicados que buscam representar de maneira adequada a curva de magnetização e o efeito de histerese do material na presença das mais variadas formas de indução. O processo de modelagem tem como objetivo final a obtenção e o desenvolvimento de modelos e ferramentas de cálculos numéricos e/ou procedimentos de obtenção dos parâmetros utilizados nos programas de simulação destinados à análise, concepção e projeto de dispositivos eletromagnéticos.

Os materiais ferromagnéticos têm sido caracterizados pela relação entre as grandezas indução e campo magnético e, por simplicidade, considera-se que as mesmas são paralelas entre si, recaindo-se em um modelo de histerese escalar. Nestes casos as perdas energéticas são obtidas em uma caracterização sob magnetização em uma só direção. Porém, em certas regiões de máquinas rotativas e nas juntas em “T” de núcleos de transformadores trifásicos a indução magnética não é paralela ao campo, aumentando as perdas energéticas nestes pontos. Para estas aplicações onde a indução magnética é rotacional os modelos escalares são imprecisos.

Alguns pesquisadores já trabalham com a modelagem vetorial da histerese. Tem-se encontrado resultados interessantes, mas, na sua maioria, esbarram na falta de uma modelagem de perdas segundo uma lei válida para o caso geral. Acredita-se que o primeiro passo para o desenvolvimento de uma modelagem geral e eficiente seja a obtenção de parâmetros confiáveis, provenientes da experimentação destinada a este fim.

Outro aspecto ainda em consolidação diz respeito ao método experimental de avaliação do material para obtenção de sua caracterização. Sensores de campo e indução eletromagnética, forma do quadro de indução e amostra tem sido propostos, bem como técnicas de alimentação elétrica do dispositivo utilizado no teste. Acredita-se que, em relação a este último tópico, existem na literatura poucas contribuições e equipamentos eficientes para que sejam alcançados bons resultados.

## 1.2 - Objetivos

Este trabalho teve por objetivo o desenvolvimento, a construção e a análise de uma bancada experimental para o estudo das perdas magnéticas em lâminas de aços elétricos, especificamente quando o material está sujeito a campos rotacionais. Esta bancada seguiu critérios científicos, de modo a propiciar ensaios confiáveis para a obtenção de dados para caracterização das perdas nos materiais analisados.

Para a alimentação de um quadro magnético empregado como fonte de campo foram montados conversores eletrônicos. O estágio de inversão de tensão dos conversores foi projetado de maneira a tornar possível a variação da amplitude, da frequência e da forma de onda da tensão de alimentação. O estudo da alimentação elétrica do quadro levou em conta a qualidade da forma de onda de indução imposta na lâmina sob teste. Para este fim, adequou-se aos inversores uma malha de controle fechada do tipo modo deslizante. Esta malha apresenta rápida resposta dinâmica e robustez, características próprias para aplicação em cargas não lineares.

Por considerar esta área de pesquisa como um vasto campo ainda a ser explorado, esta tese tem ainda o objetivo específico de avaliar as técnicas de medição de indução e campo magnético na amostra e, também, analisar o efeito do controle da alimentação do quadro magnético na determinação das perdas nos materiais.

Espera-se que a bancada desenvolvida possa contribuir para a caracterização de aços elétricos e com o desenvolvimento e a consolidação de modelos para simulação.



## 2 – Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os principais conceitos e dispositivos para avaliação de perdas magnéticas em aços para aplicações elétricas. O capítulo discorre sobre definições básicas até o estado da arte neste assunto.

### 2.1 – O Aço para Aplicações Elétricas

O aço, desde aquele simplesmente laminado até as ligas de ferro-silício (FeSi), é a matéria prima fundamental para a indústria de equipamentos elétricos. Este material, sendo um meio ferromagnético, tem a particularidade de concentrar um campo magnético aplicado no exterior de uma amostra [1]. Resultados de pesquisas envolvendo ligas de ferro-silício foram divulgados inicialmente por R. A. Hadfield em 1882 [2]. As seguintes melhorias obtidas em comparação com o ferro anteriormente utilizado foram: a) aumento da permeabilidade magnética; b) diminuição das perdas por histerese, c) diminuição das perdas por correntes de Foucault e d) menor deterioração com o tempo. Por outro lado, sabe-se que a inclusão de silício ao aço geralmente tende a diminuir o valor da indução de saturação.

As lâminas de ferro-silício para aplicações elétricas começaram a ser utilizadas a partir de 1905 nos Estados Unidos e de 1906 na Inglaterra. Atualmente, ligas contendo de 1,5 a 3,5% de silício são empregadas na construção de motores e geradores, enquanto motores de alto rendimento e transformadores de potência utilizam 3 a 5% de silício.

O aço para aplicações elétricas é obtido a partir de barras ou chapas, originalmente produzidas por siderurgia. As chapas são muito mais empregadas na indústria e são obtidas através da laminação de blocos de aço de espessura variável. Como o aço laminado não apresenta precisamente as mesmas características magnéticas em todas as direções do plano da chapa, as perdas magnéticas também variam em função da direção do fluxo, o que torna o termo “sentido de laminação” importante na caracterização do material. Isto é, o

processo de laminação provoca um grau de anisotropia magnética que depende do material e do processo em si.

As ligas de FeSi podem sofrer diversos processos diferentes durante a sua fabricação mas, de maneira geral, pode-se classificá-las em dois grupos: (1) materiais isotrópicos, os que apresentam as mesmas características magnéticas para qualquer direção no plano da lâmina, e (2) materiais anisotrópicos, aqueles que apresentam propriedades distintas para diferentes direções no plano da lâmina.

Os principais aços planos para fins elétricos podem ser divididos em duas famílias: os de grãos orientados (GO) e os de grãos não orientados (GNO). Os aços de grãos orientados são anisotrópicos, sendo empregados em transformadores de potência, porque estes possuem uma grande parcela do fluxo magnético alinhado com a direção longitudinal da chapa. Os aços de grãos não orientados são idealmente isotrópicos, sendo utilizados em máquinas rotativas, as quais requerem um maior grau de isotropia no plano da chapa, e em pequenos transformadores [3].

Os aços ainda podem ser classificados de acordo com outras características, tais como: densidade de silício e carbono, etapa de fabricação (semi e totalmente processado), entre outras.

Para que seja um meio eficiente de condução do fluxo magnético, o aço deve possuir alta permeabilidade e baixas perdas magnéticas, o que torna estas grandezas parâmetros de seleção do aço. Em relação às perdas magnéticas cabe ressaltar sua importância para a determinação do rendimento de uma máquina elétrica e, conseqüentemente, no sucesso do seu projeto final.

As perdas estão diretamente ligadas à relação peso da máquina versus potência elétrica consumida. O projetista busca constantemente desenvolver máquinas de alto rendimento com pouco volume, aliado com os anseios dos consumidores por produtos de baixo custo e de alta eficiência energética. Sob estes aspectos, as pesquisas atuais envolvendo aços, seja no campo de desenvolvimento de novos materiais ou na determinação de perdas e modelos matemáticos, constituem-se em uma grande contribuição à indústria e à sociedade em geral.

## 2.2 - As Perdas Magnéticas em Campos Alternados

A determinação das perdas nos materiais magnéticos laminados em chapas é um tema que tem despertado bastante interesse da comunidade científica, principalmente por não existir ainda um modelo definitivo para sua previsão.

Nos métodos experimentais, as perdas médias por ciclo são obtidas do laço  $B(H)$ . A energia dissipada por ciclo e por unidade de volume é determinada através do cálculo da área interna do laço, como apresentado na Figura 2.1. Esta mesma energia em Joules por quilograma, para um período da forma de onda da indução, é expressa pela Equação 2.1, onde  $B$  é a indução magnética,  $H$  o campo magnético,  $B_1$  e  $B_2$  definem o período da indução e  $m_v$  a massa específica do material. Neste caso, tem-se um modelo escalar, já que as grandezas vetoriais indução e campo magnético são paralelas entre si.

$$W_T = \frac{1}{m_v} \int_{B_1}^{B_2} \vec{H} \cdot d\vec{B} = \frac{1}{m_v} \int_{B_1}^{B_2} H dB \cos 0^\circ = \frac{1}{m_v} \int_{B_1}^{B_2} H dB \quad [J/kg] \quad (2.1)$$

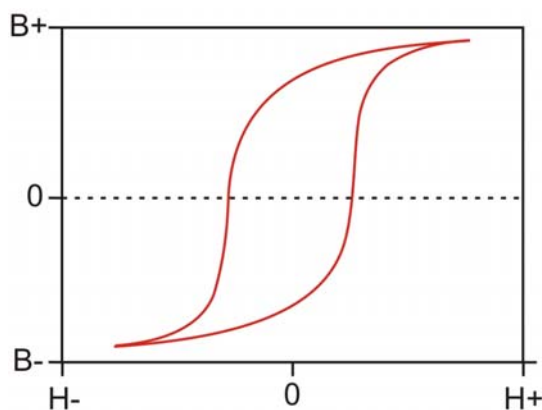


Figura 2.1 – Laço  $B(H)$  típico.

A metodologia mais utilizada atualmente para estimar e analisar as perdas é baseada em um princípio de separação, isto é, considera-se que as perdas totais nas lâminas seja a soma de três termos: perdas por histerese, perdas devido às correntes de Foucault e perdas excedentes [4,5].

A magnetização do material deve-se ao processo de alinhamento dos spins dos elétrons, que constituem o material, com o campo magnético aplicado externamente. Spins orientados em uma mesma direção no cristal formam domínios que são delimitados por paredes entre estas regiões. No processo de

magnetização estas paredes de domínio se movem, resultando as perdas por histerese. A magnetização do material acontece pela movimentação e rotação dos domínios magnéticos [6]. Assim, a existência das paredes dos domínios magnéticos, associadas também aos defeitos da microestrutura metalúrgica do material, dá origem às perdas por histerese. Esta parcela de perdas não depende da frequência, devendo ser medida com a frequência da forma de onda da excitação mais próxima possível de zero para que as componentes das perdas dinâmicas no material possam ser desprezadas. As perdas dinâmicas são compostas pelas perdas devido às correntes de Foucault e pelas perdas excedentes. Elas dependem da frequência de operação.

As perdas devido às correntes de Foucault são originadas das correntes induzidas no material. Estas correntes circulam em formas de anéis fechados, induzidas pela variação do fluxo magnético no tempo, sendo perpendiculares ao plano do fluxo [1]. Para evitar a formação de grandes anéis de corrente o material ferromagnético é laminado. Quanto menor a espessura da lâmina, maior a dificuldade para a formação dos anéis de corrente e, conseqüentemente, menor serão as perdas por correntes de Foucault. Todavia, se a composição química do material for alterada para atenuar este tipo de perdas, as perdas por histerese também sofrerão alterações.

As perdas excedentes, como o próprio nome indica, são originadas supostamente pelo excesso de correntes induzidas. A justificativa para a existência destas perdas excedentes baseia-se no fato de que o cálculo clássico das perdas por correntes de Foucault não considera a divisão do material em domínios magnéticos elementares e estes domínios modificam a distribuição das correntes induzidas, aumentando as perdas.

Várias teorias foram construídas para avaliar estas perdas chamadas excedentes. A mais aceita atualmente foi proposta por Bertotti [4], baseada em uma análise estatística da organização dos domínios e paredes magnéticas. O modelo de Bertotti permite mostrar que estas perdas em J/kg são proporcionais à raiz quadrada da frequência.

Para separar os tipos de perdas magnéticas na prática são efetuados dois ensaios: um para determinação das perdas devidas à histerese e o outro para a determinação das perdas totais. As perdas por histerese são obtidas na mais baixa frequência possível. Tipicamente as perdas totais são avaliadas em ensaios a 50 ou 60Hz. A partir das perdas totais se subtrai as perdas devidas à

histerese, resultando desta operação o valor das perdas dinâmicas (soma das perdas devidas à correntes de Foucault e as perdas excedentes) [5,7,8,9,10].

A separação das perdas dinâmicas, nas suas duas parcelas constituintes, não pode ser realizada de maneira experimental. Teoricamente, a representação matemática das perdas totais no ferro em regime senoidal foi proposta por Fiorillo e Novikov [7] e Amar e Protat [8] e é aqui dada pela Equação 2.2. Nesta equação as perdas por histerese ( $W_H$ ) são descritas conforme o modelo de Steinmetz ( $k_h$  e  $\alpha$  são parâmetros do modelo) e as dinâmicas ( $W_F$  e  $W_E$ ) são associadas aos coeficientes  $k_f$  e  $k_e$ , os quais dependem do tipo de composição das lâminas de aço e são definidos para a frequência em que foi feito o ensaio ( $f_1$ ).

$$W_T = W_H + W_F + W_E = k_h B^\alpha + \frac{f}{f_1} k_f B^2 + \sqrt{\frac{f}{f_1}} k_e B^{1.5} \quad [J / kg] \quad (2.2)$$

A evolução da relação das perdas magnéticas para os três tipos de perdas em função da frequência (com indução magnética constante) pode ser observada qualitativamente no gráfico da Figura 2.2 [6].

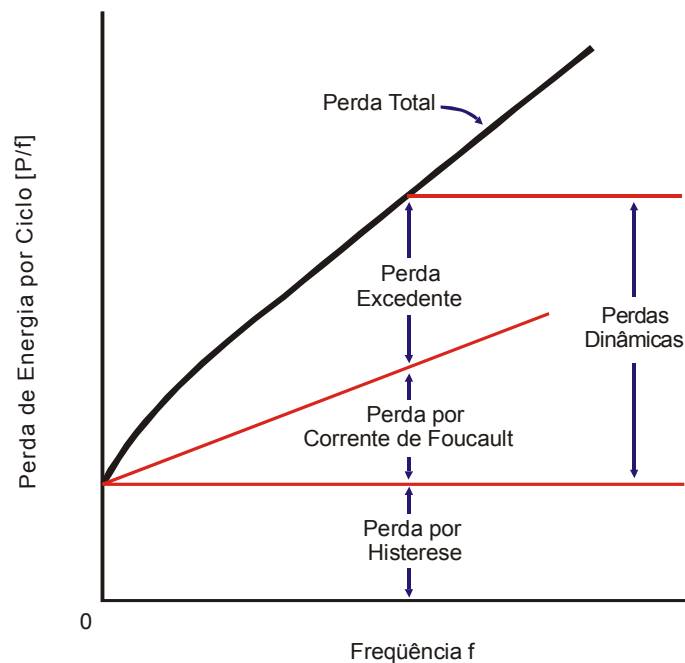


Figura 2.2 – Representação das componentes de perdas em função da frequência.

Na Figura 2.3 são apresentados laços  $B(H)$  onde as perdas por histerese, por correntes de Foucault e excedentes são consideradas sucessivamente. Pode-se observar que o laço  $B(H)$  torna-se cada vez maior com a inclusão das diferentes componentes das perdas [9,10,11], para um mesmo valor da indução máxima.

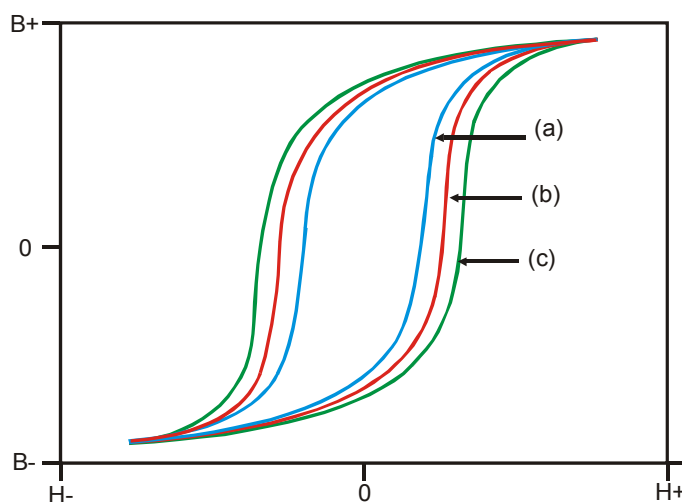


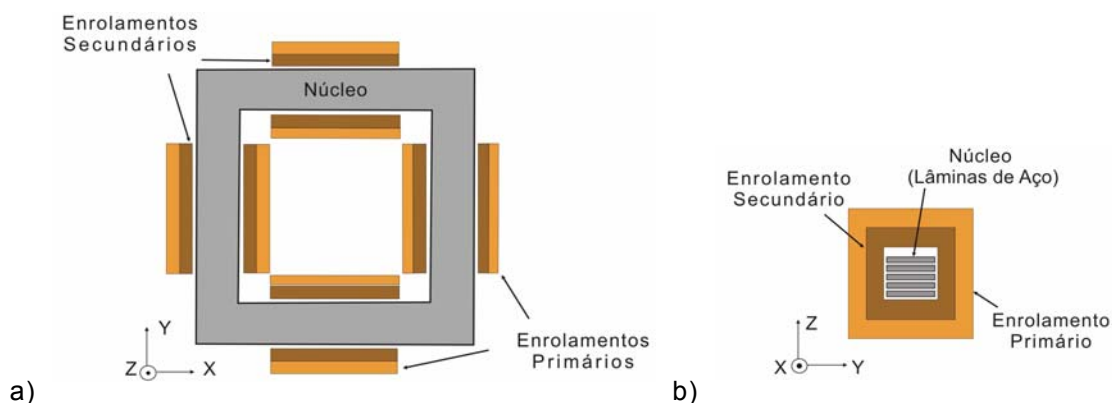
Figura 2.3 – Laços  $B(H)$  típicos levando-se em conta:  
a) Somente as perdas por histerese.  
b) Perdas por histerese e correntes de Foucault.  
c) Perdas por histerese, correntes de Foucault e excedentes.

## 2.3 – As Medições de Perdas Magnéticas em Campos Alternados

As perdas magnéticas em campos alternados podem ser mensuradas por diversas formas. Dentre os aparelhos mais utilizados estão o quadro de Epstein, o Teste de Chapa Única (da tradução original do inglês de *Single Sheet Tester* – SST) e os métodos utilizando transformador toroidal [12].

A norma brasileira NBR 5161 [13] e as principais normas internacionais indicam como referência o quadro de Epstein para a caracterização magnética de aço laminado [14]. O quadro de Epstein é um dispositivo eletromagnético sugerido por Burgwin em 1936 [15]. Este dispositivo possui dois enrolamentos. O enrolamento primário é responsável pela geração do campo magnético (excitação) e o enrolamento secundário pela medição do fluxo magnético

induzido. O quadro é composto por quatro bobinas, ligadas em série, para cada enrolamento (Figura 2.4 - a). As amostras de aço a serem caracterizadas são introduzidas no interior dos enrolamentos, formando o circuito magnético do dispositivo (Figura 2.4 - b). São exigidos no mínimo 12 amostras de aço para a realização dos ensaios [13].



No quadro de Epstein as induções magnéticas variam com o tempo, mas são puramente alternantes no volume do aço, como pode ser notado na Figura 2.5.

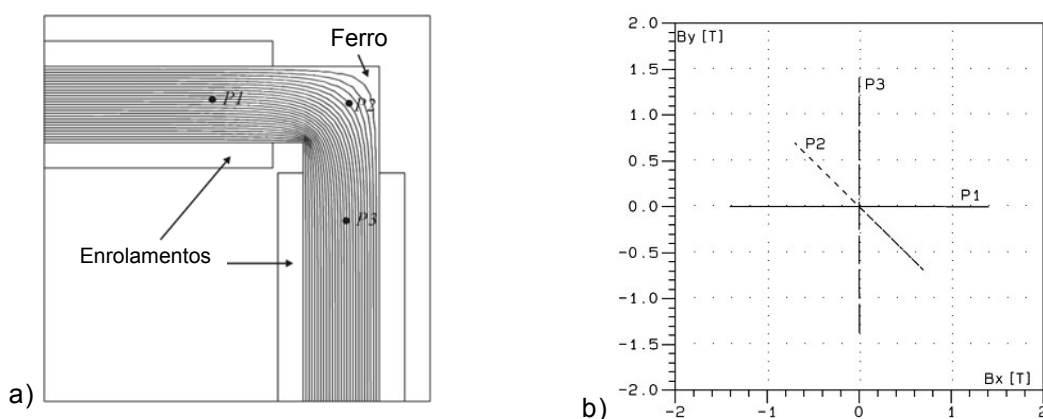


Figura 2.5 – Induções magnéticas no quadro de Epstein:  
a) Um quarto do quadro com a indicação geométrica dos pontos de análise.  
b) Os loci das induções nos três pontos indicados.

As perdas nas lâminas são determinadas a partir de grandezas elétricas do circuito (método indireto). A corrente  $i_p(t)$  do enrolamento primário de  $N_p$  espiras é uma imagem do campo magnético  $H(t)$ , enquanto a integral da tensão  $v_s(t)$  induzida no secundário de  $N_s$  espiras é proporcional à indução  $B(t)$ . As relações entre estas grandezas estão apresentadas nas equações 2.3 e 2.4,

onde  $S$  é a seção magnética efetiva,  $l_m$  o caminho médio magnético e  $T$  o período do sinal.

$$B(t) = \frac{1}{N_s S} \int_T v_s(t) dt \quad [T] \quad (2.3)$$

$$H(t) = \frac{N_p}{l_m} i_p(t) \quad [A/m] \quad (2.4)$$

O ensaio normatizado [13] utiliza instrumentos de medidas padrão para determinação das perdas: voltímetros de valor médio e eficaz, amperímetro de valor médio e wattímetro. Metodologias mais atuais utilizam as memórias de um osciloscópio ou uma placa de aquisição de dados, alojada em computador, para capturar os sinais da tensão e da corrente no tempo e, após tratamento numérico, calcular as perdas nas lâminas [9].

O método SST difere do teste de Epstein basicamente por utilizar apenas uma lâmina como amostra e poder empregar métodos diretos de medição de campo magnético [15,16].

O SST possui seu próprio circuito magnético, sendo a amostra colocada como complemento ou fechamento do circuito global. Dentre as configurações possíveis do SST [15] a mais recomendada pelas normas internacionais é a de duplo circuito magnético [17], apresentada na Figura 2.6.

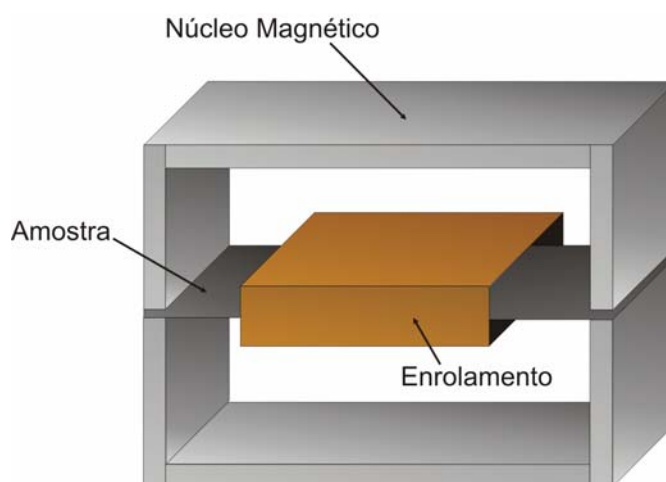


Figura 2.6 – O sistema SST

Dos métodos citados anteriormente se destacam as seguintes características:



i) No quadro de Epstein a magnetização no circuito magnético é mais homogênea do que no SST;

ii) As medições no SST são realizadas de maneira mais simples e mais rápida do que no quadro de Epstein. Todavia, são necessários vários ensaios no SST para se obter uma “característica média” do material;

iii) O SST é um ensaio mais econômico em termos de custo da obtenção da amostra do que o Epstein, pois este utiliza uma maior quantidade de lâminas no teste;

iv) No quadro de Epstein há uma sobreposição de lâminas nos seus vértices, a qual é ilustrada na Figura 2.7. Esta disposição das lâminas acarreta em um valor maior da massa total das amostras do que a massa efetivamente envolvida no processo de magnetização.

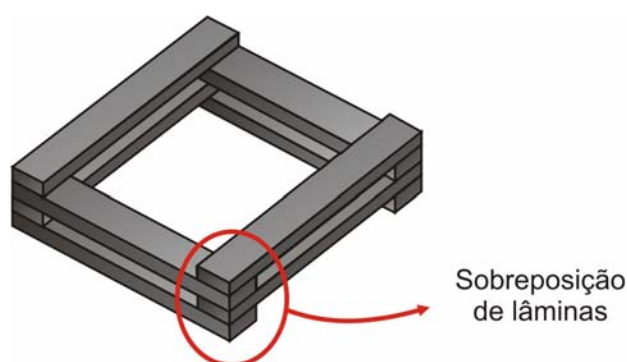


Figura 2.7 – Detalhe da sobreposição das lâminas em um vértice do quadro de Epstein.

Nos ensaios de caracterização, independente do dispositivo utilizado, a alimentação do circuito magnético deve ser feita de maneira criteriosa, de modo que as amostras sejam submetidas a uma indução puramente senoidal em, no mínimo, duas frequências. O método mais usual de ensaio consiste em traçar a curva de evolução das perdas por período, em função da amplitude da indução, a uma frequência bem baixa (inferior ou igual a 1Hz). Neste caso, as perdas medidas são consideradas devidas somente à histerese. Efetua-se um outro ensaio a uma frequência mais elevada (por exemplo em 50Hz), onde o resultado da medição representa o somatório total da parcela das perdas dinâmicas mais as perdas por histerese.

O valor das perdas dinâmicas é calculado da subtração entre o resultado obtido do ensaio em 50Hz do ensaio em 1Hz. As componentes constituintes das perdas dinâmicas, devida à corrente de Foucault e à excedente, são avaliadas

teoricamente dos resultados experimentais e sua correlação com a Equação 2.2 [9,18].

Uma estratégia de separação das perdas sem necessidade do ensaio em baixa frequência foi proposta por Mendes [18]. O resultado obtido é similar ao método tradicional, com a vantagem de eliminar as dificuldades encontradas em experimentos envolvendo baixa frequência, principalmente os níveis muito baixos das tensões envolvidas.

## 2.4 – As Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais

A indução magnética na região das ranhuras de máquinas elétricas e em certas regiões de transformadores não possui um comportamento simplesmente alternante no espaço, mas também muda de direção em pontos diferentes no material magnético. Para ilustrar uma situação deste tipo é apresentado na Figura 2.8 um pólo de motor síncrono a ímãs permanentes [19]. Na parte “a” da figura são indicados, pela numeração, diferentes pontos de análise da indução magnética. Na parte “b” pode-se observar a distribuição do fluxo magnético com o motor em vazio, obtida através do programa EFCAD [20].

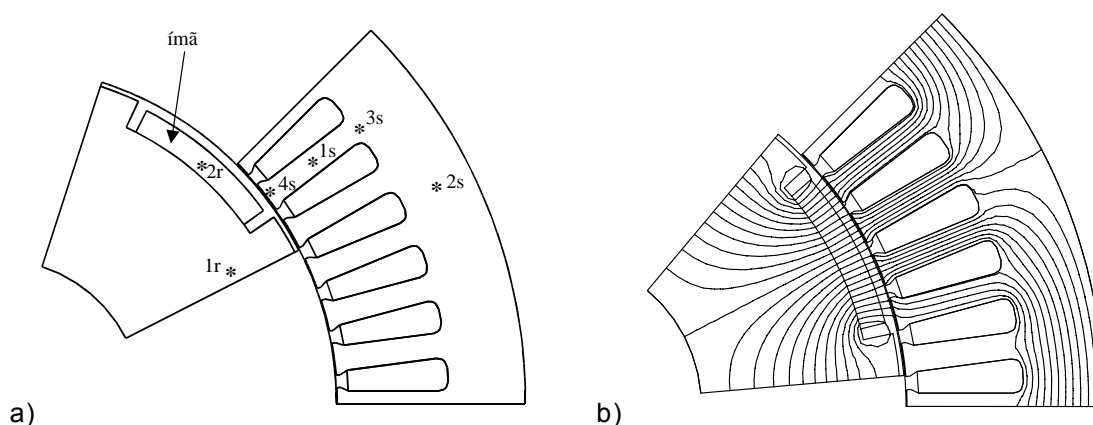


Figura 2.8 - Um pólo de motor síncrono a ímãs permanentes:  
a) Estrutura com indicação dos pontos para análise da indução.  
b) Distribuição de fluxo magnético em vazio.

Nas figuras a seguir são mostradas as evoluções das componentes radiais e tangenciais ( $B_r$  e  $B_t$ ) da indução do estator em função da posição do rotor para um período elétrico, bem como o lócus das induções  $B_t \times B_r$ . [19]

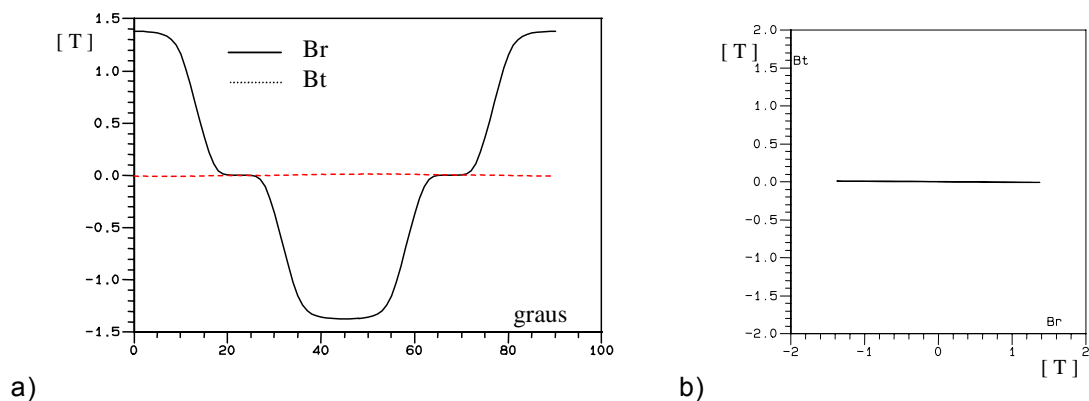


Figura 2.9 - Induções magnéticas radiais e tangenciais no ponto 1s:

a) Variação das induções em função da posição do rotor.

b) Lócus das induções  $B_t \times B_r$ .

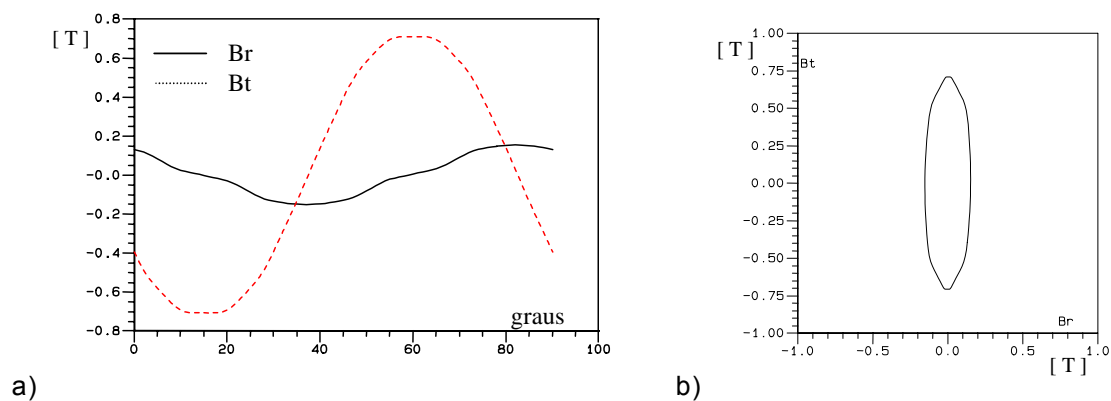


Figura 2.10 - Induções magnéticas radiais e tangenciais no ponto 2s:

a) Variação das induções em função da posição do rotor.

b) Lócus das induções  $B_t \times B_r$ .

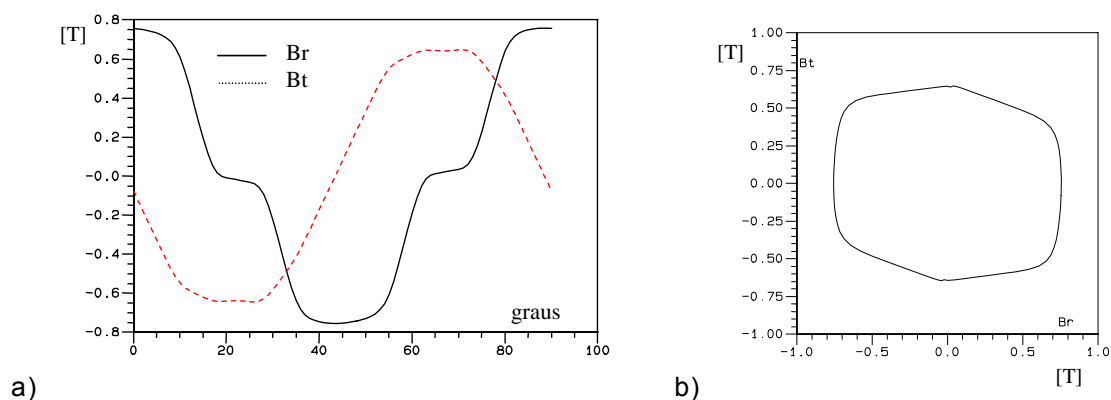


Figura 2.11 - Induções magnéticas radiais e tangenciais no ponto 3s:  
a) Variação das induções em função da posição do rotor.  
b) Lócus das induções  $B_t \times B_r$ .

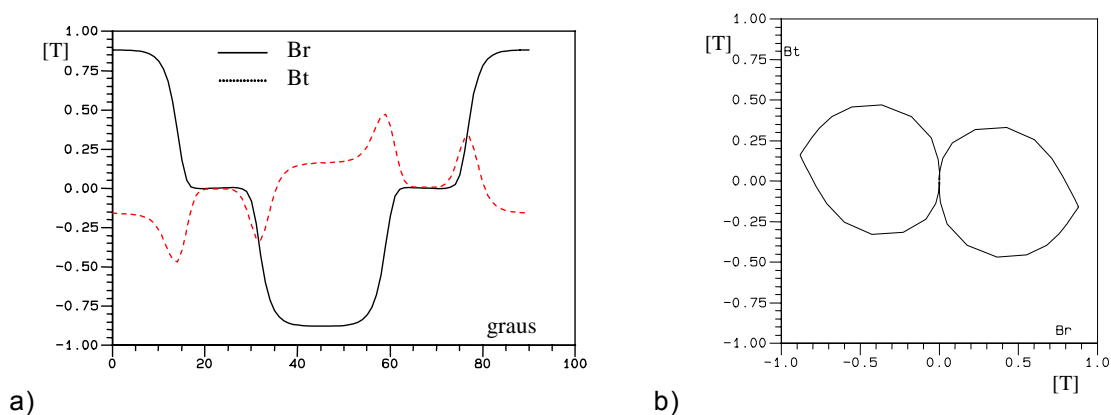


Figura 2.12 - Induções magnéticas radiais e tangenciais no ponto 4s:  
a) Variação das induções em função da posição do rotor.  
b) Lócus das induções  $B_t \times B_r$ .

Das figuras anteriores, verifica-se que existem regiões na máquina onde o vetor indução magnética varia em amplitude e em direção. A indução é, portanto, alternante e rotativa ao mesmo tempo, podendo também apresentar harmônicas. Da observação destas figuras se pode concluir que os ensaios clássicos em campos alternados, por utilizar apenas uma fonte de campo, não são capazes de fornecer informações suficientes quanto à caracterização e avaliação das perdas. Assim, outros dispositivos de medição devem ser empregados.

Em 1908 P. Weiss descreveu as perdas por histerese em um pedaço de lâmina de níquel magnetizada em um meio quase-estático [21]. Para um campo

magnético rotacional ele relatou um aumento de perdas com o incremento da indução, seguido de um decréscimo, atingindo o valor de perdas zero na saturação.

F. Brailsford publicou um artigo em 1939 [6], em que se pôde distinguir o comportamento das perdas magnéticas alternante e rotativa. As perdas foram estimadas através da medição do torque em um disco de ferro silício de grãos orientados com 3,13% de silício, sob diversos níveis de campo magnético. Na Figura 2.13 é apresentado o resultado obtido por Brailsford para perdas alternante e rotativa. Nesta figura o comportamento das perdas pode ser comparado. As perdas alternantes aumentam regularmente com o campo até a saturação, já as perdas rotacionais alcançam um ponto máximo e começam a decrescer, atingindo o valor zero na saturação.

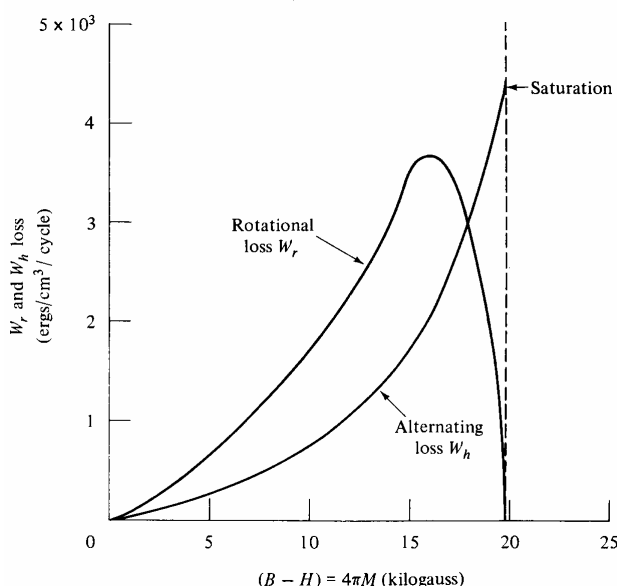


Figura 2.13 – Comportamento das perdas alternante e rotacional em função do campo magnético [6].

Acredita-se que as razões para o comportamento das perdas apresentadas na Figura 2.13 é que, em baixas induções, as paredes dos domínios magnéticos do material devem se deslocar duas vezes mais para o caso de campos rotacionais do que para campos alternantes, ocorrendo, neste caso, aproximadamente o dobro de perdas para um mesmo nível de indução. Na saturação, quando sujeita a um campo rotacional, a amostra de material estaria saturada durante todo o processo de magnetização, não havendo mais deslocamento das paredes de domínio. Por outro lado, para magnetização

puramente alternante, o material atinge a saturação para uma direção, desmagnetiza e satura novamente para uma outra direção em cada ciclo, aumentando cada vez mais as perdas com o aumento do nível de indução [6].

Outros trabalhos envolvendo medição de torque na análise de perdas rotacionais foram publicados por W. Brix em 1982 [22] e Grahan *et al.* em 1985 [23], obtendo-se resultados semelhantes ao de Brailsford.

Métodos térmicos também foram utilizados para a avaliação de perdas rotacionais. Moses e Tomas em 1973 [24] usaram amostras de lâminas de ferro silício em forma de cruz, magnetizadas por quatro enrolamentos de excitação, alimentados por uma fonte em 50Hz. A indução magnética era analisada por duas bobinas, uma para cada eixo, contendo duas espiras no centro da amostra. As perdas foram medidas a partir da elevação de temperatura obtida por termopares. Fiorillo e Rietto em 1988 [25] e Moses em 1994 [26] também utilizaram métodos de medição de temperatura e compararam com o método de medição de torque, atingindo bons resultados.

Nas décadas de 80 e 90 vários artigos foram publicados com propostas e análises de dispositivos para medição de perdas rotativas [27 a 37]. Uma característica comum nestes trabalhos foi a utilização de uma única chapa de material como amostra. Os ensaios nestes dispositivos passaram a ser denominados por Teste Rotacional de Chapa Única (da tradução do inglês de *Rotational Single Sheet Tester* - RSST). Com uma maior facilidade advinda da utilização de computadores e circuitos amplificadores mais precisos, sensores baseados na indução de tensão em bobinas puderam ser empregados para medição do campo e da indução magnética. Estes dispositivos tornaram-se usuais na comunidade científica, principalmente pela facilidade da preparação dos ensaios e da confecção da amostra. Neste aspecto se pode destacar: Sasaki *et al.* [27] utilizando amostras de lâminas do quadro de Epstein na configuração apresentada na Figura 2.14; Sievert [15] analisando vários tipos de sensores para a amostra de chapa única e comparando os resultados com os métodos térmico e do wattímetro; Sievert *et al.* [28] com núcleo na posição vertical, apresentado na Figura 2.15.

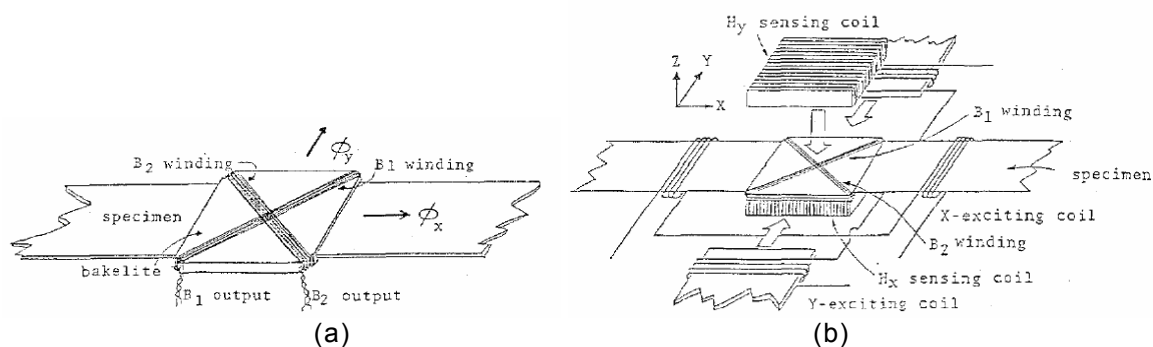


Figura 2.14 – Ilustração esquemática do dispositivo desenvolvido por Sasaki *et al.* [27].  
 a) Disposição da bobina para medição da indução.  
 b) Configuração completa.

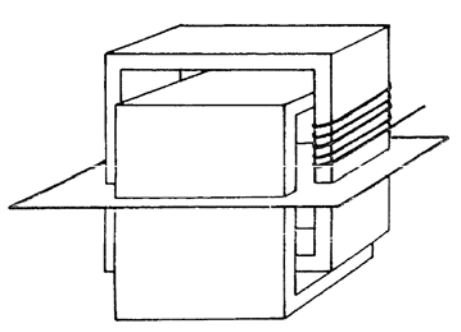


Figura 2.15 – Ilustração do dispositivo proposto por Sievert *et al.* com núcleos verticais [28].

Brix *et al.* propuseram em 1984 um quadro magnético disposto na posição horizontal com a amostra posicionada no centro do dispositivo [29]. O núcleo magnético do quadro era composto por um pacote de lâminas de aço elétrico com uma grande seção transversal, de modo que a relutância magnética do núcleo fosse muito menor do que a relutância da amostra. Duas bobinas de magnetização foram dispostas em cada eixo do dispositivo. A amostra era composta por uma só lâmina nas dimensões de 80mmx80mm. As grandes vantagens apresentadas para este dispositivo foram a homogeneidade do fluxo magnético no centro da amostra e a facilidade para sua confecção. A Figura 2.16 é uma ilustração do dispositivo proposto por Brix *et al.* [29].

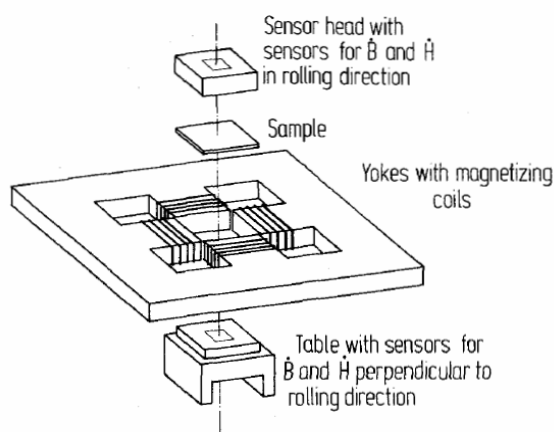


Figura 2.16 – Ilustração do dispositivo proposto por Brix *et al.* com núcleos horizontais [29]

Enokizono *et al.* [30] publicaram um artigo em 1990 expondo resultados experimentais de perdas rotacionais. A forma e as dimensões do núcleo do dispositivo e dos sensores utilizados se tornaram referência para os trabalhos posteriores. As principais mudanças apresentadas em relação ao quadro magnético proposto por Brix *et al.* [29] foram a possibilidade de ajuste do tamanho da amostra, tornando o dispositivo mais versátil, e no formato pontiagudo dos pólos do quadro. Um trabalho apresentado por Makaveev [31] indicou que este formato diminui o fluxo magnético que entra perpendicularmente na amostra, tornando também o resultado dos sensores mais precisos. A Figura 2.17 é uma ilustração do dispositivo proposto por Enokizono *et al.* [30] com a posição dos sensores de campo e indução magnética.

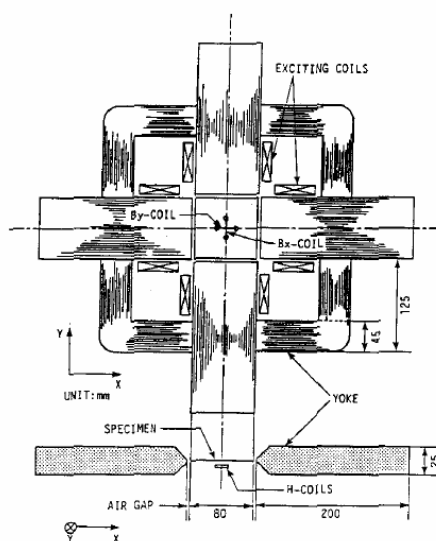


Figura 2.17 – Ilustração do dispositivo proposto por Enokizono *et al.* [30]



Nos ensaios de Enokizono *et al.* [30] foram utilizadas amostras de lâminas de aço-silício de grãos orientados com espessura de 0,27mm e de grãos não orientados com espessura de 0,5mm. A frequência do sinal da fonte de campo foi estabelecida em 50Hz e o entreferro entre os pólos do quadro e a amostra era de 0,105mm. A Figura 2.18 ilustra alguns resultados obtidos nos ensaios.

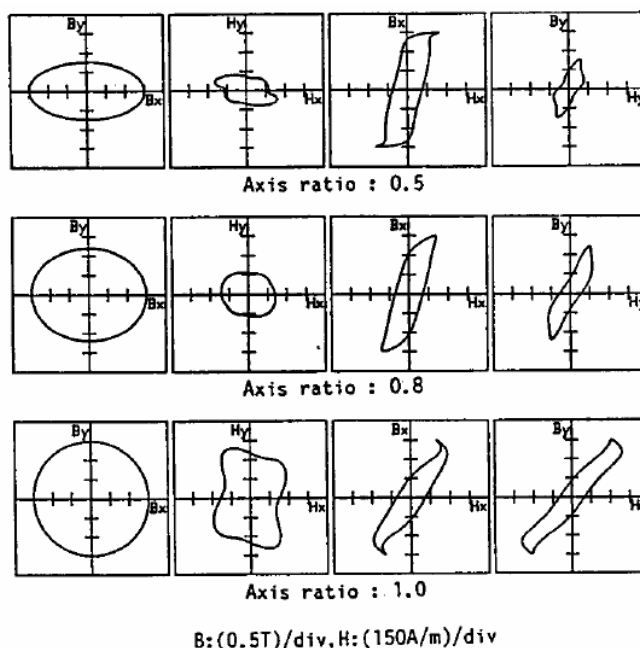


Figura 2.18 – Resultados de medidas obtidas por Enokizono *et al.* [30] para grãos não orientados.

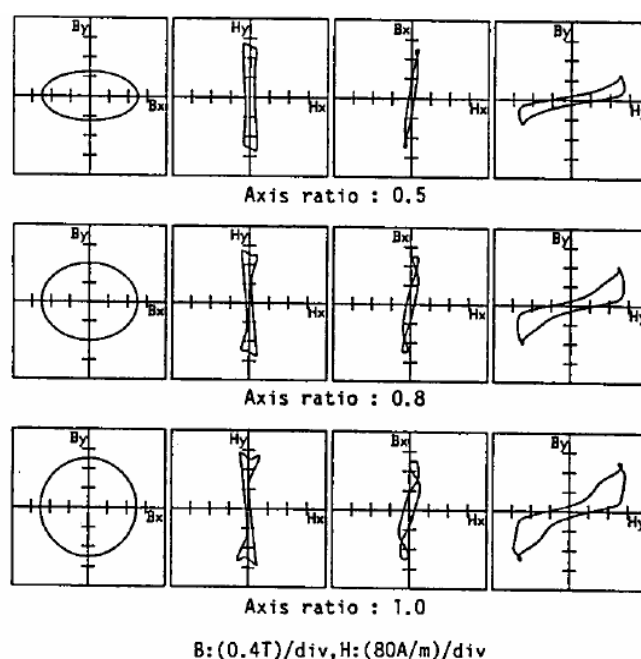


Figura 2.19 – Resultados de medidas obtidas por Enokizono *et al.* [30] para grãos orientados.

Em relação ao cálculo das perdas magnéticas em campos rotacionais, considera-se que o campo magnético é uniformemente distribuído através da seção da amostra. As perdas magnéticas totais, neste caso, podem ser calculadas pela Equação 2.5 [35].

$$W_T = \frac{1}{T m_v} \int_T \left( \vec{H} \cdot \frac{d\vec{B}}{dt} \right) dt \quad [W / kg] \quad (2.5)$$

No plano da lâmina utilizada como amostra se consideram, geralmente, somente duas componentes dos vetores de indução e de campo. Deste modo, a equação anterior pode ser expressa por [35]:

$$W_T = \frac{1}{T m_v} \int_T \left( H_x \frac{dB_x}{dt} + H_y \frac{dB_y}{dt} \right) dt \quad [W / kg] \quad (2.6)$$

## 2.5 – As medições de Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais

Tendo como base o dispositivo magnético apresentado por Enokizono *et al.* [30], vários artigos foram publicados com o objetivo de melhorar os resultados das medições, principalmente através do estudo de novas disposições e tipos de sensores de campo e indução. A análise de alguns aspectos envolvendo estes trabalhos será apresentada nas seções seguintes.

### 2.5.1 – Os Sensores de Indução Magnética

Uma alternativa para medição da indução magnética é o método das agulhas, o qual está baseado na patente de E. Czeija e R. Zawischa [21]. Neste método um par de agulhas é colocado em contato com a superfície da amostra, ver Figura 2.20 [29]. A tensão induzida entre os dois pontos da superfície pode ser medida, sendo proporcional à variação do fluxo magnético na amostra. Neste método assume-se que as correntes de Foucault são simétricas para as duas superfícies da lâmina. A assimetria no fluxo magnético causa erro nas medidas, além de não ser possível eliminar a medição da parcela de fluxo que passa pelo ar na região entre as duas agulhas. Outro problema deste método é a medição em altas induções, uma vez que a vibração da amostra nesta situação prejudica

o contato das agulhas com a mesma. Sua principal vantagem é o tempo reduzido de preparação do ensaio.

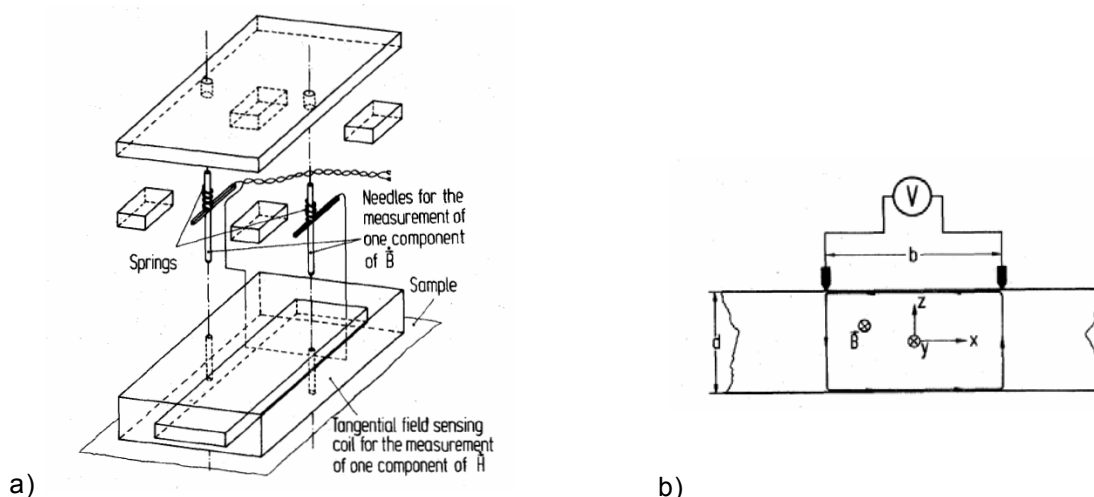


Figura 2.20 – Ilustração do sensor de indução no método das agulhas para uma direção do fluxo magnético [29].

a) Disposição do sistema na amostra.  
b) Princípio da medição.

O método tradicional para determinação da indução magnética é a utilização de bobinas sensoras. As bobinas podem envolver toda ou uma parte da amostra. A Figura 2.21 ilustra estas possibilidades. Da mesma forma que o método da agulha, o fluxo magnético variável no tempo induz uma tensão nos terminais da bobina, proporcional ao próprio fluxo que a originou, com uma resposta bastante linear.

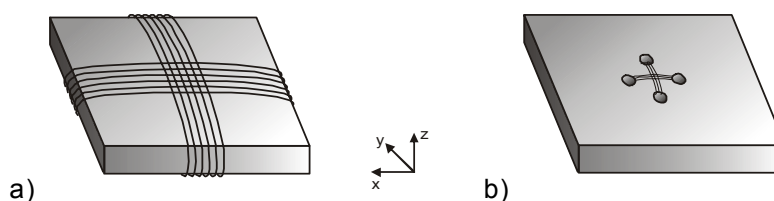


Figura 2.21 – Ilustração dos sensores de indução no método das bobinas sensoras.

a) Bobinas envolvendo toda a amostra.  
b) Bobinas envolvendo parte da amostra.

Para o caso das bobinas envolvendo parte da amostra, quatro furos são feitos na sua região central para possibilitar a introdução das espiras das bobinas. Como os furos devem ter pequeno diâmetro para não alterar o circuito magnético da amostra (a confecção dos furos pode causar estresse mecânico no

material, além do próprio espaço de ar criado), são utilizadas poucas espiras nas bobinas. Conseqüentemente, o nível da tensão induzida é baixo, principalmente em baixas induções e baixas frequências, necessitando de amplificadores de ganhos elevados para adequar o nível do sinal gerado com a escala dos instrumentos de medida. Sabe-se que amplificadores com altos ganhos não possuem boa linearidade, o que passa a ser um problema para este método. Outro inconveniente está na montagem das bobinas. Os condutores por serem de diâmetro muito pequeno são de difícil manuseio. Logo, de fácil ruptura durante a confecção das bobinas.

Quando os sensores envolvem toda a amostra é possível confeccionar as bobinas com um número maior de espiras, minimizando as dificuldades para utilização de amplificadores e evitando a necessidade de furações na lâmina. Neste caso, as espiras das bobinas podem ser arranjadas em um material não magnético, sendo a amostra inserida em seu interior, tornando a elaboração do ensaio mais simples [33]. Alguns trabalhos científicos publicados não empregam este método, por considerarem que a homogeneidade do fluxo magnético é preservada somente na área central da amostra [30,38]. Espíndola [39] realizou uma simulação em 2D para analisar o efeito da distorção do fluxo magnético causada pela não uniformidade do entreferro. No teste o quadro foi projetado com um entreferro de 0,5mm, sendo a simulação realizada com um desvio de 0,1mm no posicionamento da amostra. A Figura 2.22 apresenta o resultado da simulação, onde se observa que, mesmo com a falta de simetria do entreferro, o fluxo magnético é homogêneo tanto na região central da amostra quanto no seu prolongamento, onde comumente são dispostos os sensores de indução.

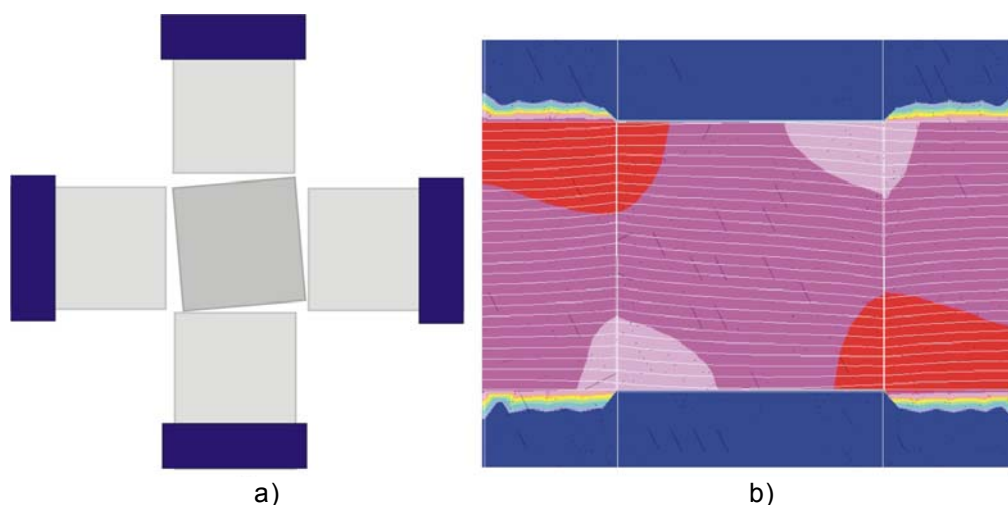


Figura 2.22 – Análise do fluxo magnético da amostra com desvio do entreferro [39].  
a) Ilustração do posicionamento.  
b) Resultado da simulação.

No método das bobinas sensoras, a indução magnética, para uma direção, é calculada por (2.7), onde  $N$  é o número de espiras da bobina sensora,  $A_B$  a área de seção transversal desta bobina e  $V(t)$  a forma de onda da tensão induzida na bobina sensora.

$$B(t) = \frac{1}{N A_B} \int_T V(t) dt \quad [T] \quad (2.7)$$

## 2.5.2 – Os Sensores de Campo Magnético

Os sensores de campo funcionam usando a propriedade da conservação da componente tangencial do campo magnético na passagem de um material ferromagnético para o ar [11]. Para detectar esta componente, alguns tipos de sensores são utilizados: sensor de efeito Hall, um fino filme de *permalloy* magnetoresistivo, meio anel, bobina em forma de meio anel (bobina de Rogowski-Chattock) e o sensor denominado bobina-H, que consiste de algumas espiras enroladas em um núcleo de material não magnético [40]. Semelhante ao sensor de indução, neste último método é medida a variação da tensão nos terminais da bobina gerada pela variação do campo magnético no tempo.

Os sensores com bobina-H são utilizados com mais frequência devido à sua relativa facilidade de confecção. Outras vantagens deste tipo de sensor são sua excelente linearidade e imunidade à componente ortogonal do campo [40]. Para se obter medidas confiáveis, os sensores devem ser fixados o mais próximo possível da superfície da amostra. Além disso, devem ser dispostos na região central da lâmina, onde a densidade de fluxo magnético é mais uniforme [41].

Na Figura 2.23 é apresentada a disposição de um sensor tipo bobina-H sobre uma amostra de aço. Neste método, o campo magnético, para uma direção, é calculado pela Equação 2.8.

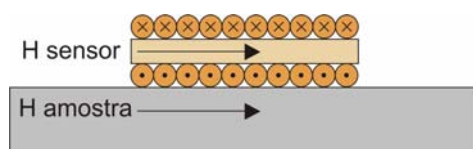


Figura 2.23 – Disposição de um sensor tipo bobina-H sobre uma amostra de aço.

$$H(t) = \frac{1}{N A_B \mu_o} \int_T V(t) dt \quad [A/m] \quad (2.8)$$

Para a detecção do campo em duas direções, dois métodos são empregados: duas bobinas-H dispostas uma abaixo e outra acima da amostra ou confeccionadas ortogonalmente no mesmo núcleo, como pode ser observado na Figura 2.24. Na primeira situação é necessário que se tenha um sistema de alinhamento adequado das bobinas, evitando que haja um erro de fase na medição das duas componentes de campo. No caso das bobinas estarem no mesmo núcleo, este problema é minimizado. Todavia, uma das bobinas estará mais distante da amostra, diminuindo a precisão na medição, já que o campo magnético tem um decréscimo de sua intensidade com o aumento da distância.

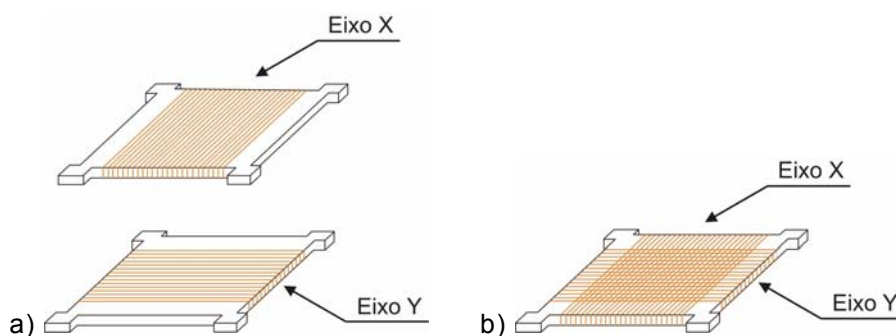


Figura 2.24 – Sensores de campo tipo Bobina-H.  
a) Confeccionadas para disposição acima e abaixo da amostra.  
b) Confeccionadas ortogonalmente no mesmo núcleo.

Nakata et al. [42] e Tumanski [40] propuseram uma melhoria na medição do campo através da utilização de múltiplos sensores. O método baseia-se na linearidade da evolução do campo magnético com a distância entre as bobinas de campo e a amostra. Através de medições simultâneas entre dois ou mais sensores, pode-se estimar com maior precisão o valor do campo magnético no interior da amostra. A Figura 2.25 apresenta duas disposições possíveis para esta proposta.

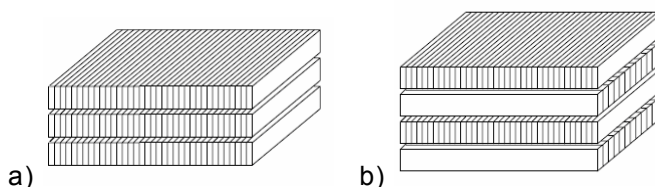


Figura 2.25 – Múltiplos sensores de campo tipo Bobina-H [40].  
a) Três sensores para a medição em uma direção.  
b) Par de sensores para medição em duas direções.

### 2.5.3 – O Efeito da Blindagem e do Entreferro

Apesar da amostra no interior do quadro magnético estar sujeita a uma densidade de fluxo preponderante no plano  $xy$ , um estudo apresentado por Makaveev *et al.* [31] mostrou que, mesmo para quadros com pólos chanfrados, linhas de fluxo magnético penetram perpendicularmente na amostra (eixo  $z$ ), gerando um erro na medição dos sensores de campo. Para minimizar esse efeito, Makaveev *et al.* sugerem que o entreferro entre a amostra e o quadro seja suficientemente grande, de modo que a homogeneidade do campo magnético no plano da amostra seja melhorada. Brix *et al.* [29] ilustraram a importância do entreferro comparando dois tipos de amostra: uma em forma de cruz e outra na forma quadrada. Na Figura 2.26, retirada desta referência, percebe-se que as linhas de fluxo magnético são mais homogêneas na amostra quando existe entreferro.

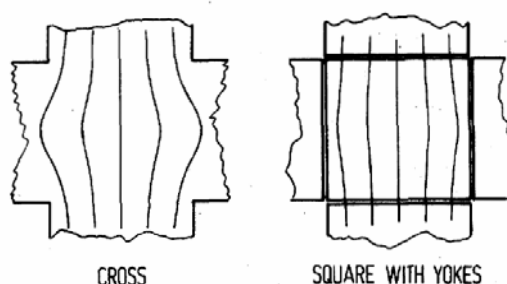


Figura 2.26 – Linhas de fluxo magnético para diferentes formas de amostra [29].

Um outro artigo publicado por Makaveev *et al.* [32] apresentou as vantagens da utilização de lâminas para blindagem do fluxo magnético, acima e abaixo da amostra. A Figura 2.27 mostra um resultado de simulação na superfície de uma amostra, acima sem e abaixo com blindagem, para um campo alternante. Pode-se observar desta figura que na parte superior da amostra existe uma grande quantidade de linhas de fluxo disperso que penetram perpendicularmente, inclusive na sua área central. Já na parte inferior, a blindagem absorve o fluxo perpendicular, de maneira que não há linhas de fluxo penetrando no sensor de campo magnético nem na amostra.

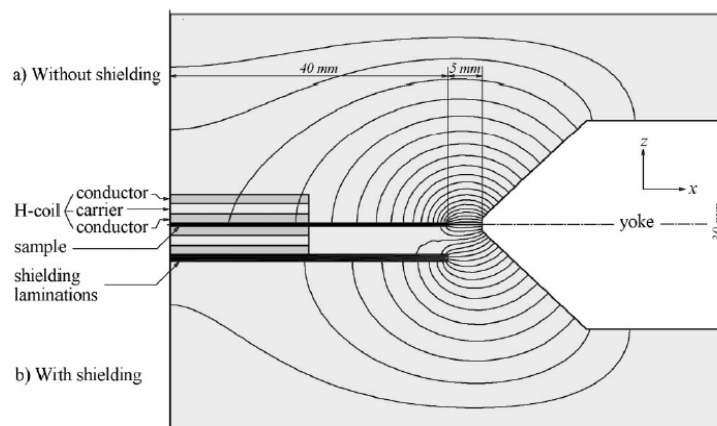


Figura 2.27 – Simulação das linhas de campo para a situação com e sem blindagem [32].

A Figura 2.28 apresenta curvas  $B(H)$  experimentais nas situações sem e com blindagem obtidas por Makaveev *et al.* [32]. Pode-se verificar nesta figura que o campo magnético máximo medido para a situação sem blindagem é cerca de três vezes maior que a situação com blindagem. Este mesmo efeito foi observado por Espíndola [39], em cujo trabalho comparou os resultados oriundos do quadro de Epstein com a curva  $B(H)$  obtida no RSST para campos alternados. Ou seja, se não for utilizada blindagem no arranjo experimental as medições das perdas magnéticas não serão exatas e, com isto, a relação  $B(H)$  do material não será a real.

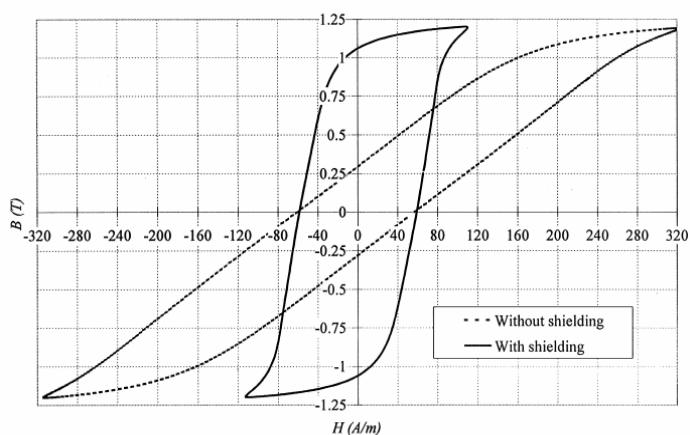


Figura 2.28 - Laços  $B(H)$  experimentais, com e sem blindagem, para campos alternantes em 50Hz [32].

Makaveev *et al.* [32] ainda afirmaram que com o uso da blindagem um só sensor de campo por eixo é suficiente para se obter medições precisas, não sendo necessário o emprego de múltiplos sensores.



### 2.5.4 – O Controle da Forma de Onda da Indução

O ensaio para caracterização do material da amostra deve ser realizado controlando-se a forma de onda da indução magnética aplicada. Este cuidado mostra-se relevante uma vez que vários trabalhos demonstram uma modificação no valor das perdas magnéticas, para um mesmo valor máximo de indução, dependendo do conteúdo harmônico [9].

Para a criação de modelos matemáticos ou determinação de perdas, utiliza-se geralmente indução na forma senoidal, embora outros regimes possam ser empregados. De qualquer modo, a alimentação para sensibilização da lâmina da amostra deve ser capaz de fornecer indução em frequência variável com controle da forma de onda da indução. Uma vez que várias partes constituintes do sistema têm comportamento não linear, tais como o acoplamento magnético entre os dois eixos do quadro e a própria não linearidade magnética dos materiais, esta característica é uma das principais dificuldades para construção de uma bancada de caracterização, principalmente quando a amostra é submetida a altas induções e/ou a baixas frequências.

Nakata *et al.* [43], utilizando um dispositivo para testes em chapa única, estudaram variações da aplicação de um indutor mútuo para compensação do fluxo disperso de modo a controlar a distorção do fluxo magnético na amostra. Os autores demonstraram no artigo que as características das impedâncias dos enrolamentos de excitação afetam a forma de onda da indução na lâmina sob teste. Este método, além de pouco eficaz nas altas induções, necessita de constante ajuste no valor da indutância mútua para formas de ondas arbitrárias.

Fontes lineares de excitação (amplificadores lineares) são largamente utilizadas, mas os resultados advindos deste equipamento são pouco precisos nas altas induções. Este equipamento não possui uma característica dinâmica de resposta compatível com a necessidade da carga e, conseqüentemente, apresenta uma alta taxa de distorção harmônica no sinal de saída.

Espíndola [39] apresentou resultados com loci de indução para alguns tipos de aço. Em seus experimentos eram empregados dois amplificadores lineares, sem uma malha fechada de controle. Pode-se verificar claramente dos seus resultados que os loci obtidos não são circulares, mesmo para induções muito aquém do ponto de saturação do material.

As fontes chaveadas, por possuírem sistemas de controle realimentado, são uma boa alternativa nesta aplicação. Todavia, a dificuldade para o emprego das fontes chaveadas reside no fato de escolher e projetar a malha de controle com uma resposta dinâmica rápida, aplicável para o caso em questão. Em se tratando do controle da fonte chaveada, a estrutura clássica da malha de realimentação é a do tipo PID (proporcional integral derivativo), aplicável predominantemente em cargas lineares. Este tipo de controle possui parâmetros constantes e é ajustado para pontos específicos de operação, não sendo, portanto, adequado para variações da carga. Em cargas não lineares, a componente derivativa é retirada de modo a obter um controle menos susceptível à oscilações, porém a resposta do controle passa a ser mais lenta. Como na caracterização de um material magnético é necessário variar a indução em nível e frequência e, ainda, variar o tipo de material, tem-se uma carga bastante variável sob o ponto de vista da fonte de energia. Para este tipo de controle seria preciso alterar constantemente os seus parâmetros, algo bastante trabalhoso para ser efetuado na prática.

Tendo como dispositivo de ensaios o quadro de Epstein, Batistela [9] implementou um inversor de tensão com malha de controle por modo deslizante [44,45] com possibilidade de variação da alimentação do dispositivo com frequência variável de 1 a 400Hz. Por este tipo de controle ter um caráter preditivo, Batistela obteve bons resultados, inclusive para altas induções.

Métodos digitais de controle também são utilizados em testes com chapa única, tanto em campos rotacionais como em campos alternantes [43 a 50]. Nos métodos digitais a forma de onda de tensão para excitação do sistema é gerada via computador e introduzida como referência em uma fonte linear. Inicialmente, uma forma de onda é previamente estimada através de um algoritmo a partir dos parâmetros elétricos e magnéticos do sistema e, posteriormente, injetada como fonte de alimentação. É conveniente que se saiba *a priori* a característica do material ensaiado para diminuir o tempo de processamento. A tensão induzida na amostra, correspondente ao fluxo desejado, é medida e comparada com um valor de referência. Através de uma equação de dependência é determinada a tensão de excitação da próxima iteração. Estes passos se repetem até que seja atingido um fator de forma pré-estabelecido. Os procedimentos do método despendem um longo tempo para a realização dos ensaios, pois muitas vezes os resultados das iterações não convergem.

Na literatura consultada, os métodos digitais não mostram resultados de ensaios quando o material começa a saturar, muito menos na região de saturação. Como este caso não é apresentado ou comentado, pode-se pôr em dúvida a eficácia deste método nesta região de operação.

## **2.6 – Outras Considerações**

A partir da literatura se pode fazer ainda as seguintes considerações em relação ao teste rotacional com chapa única:

- i)* Diversas geometrias e dimensões para o quadro magnético, amostra e sensores foram publicadas, todas elas mostram resultados promissores;
- ii)* Em 1996 foram comparados resultados experimentais entre seis laboratórios europeus [51]. Os autores do trabalho sugerem que novas pesquisas sejam realizadas antes que normas regendo ensaios com RSST sejam definidas;
- iii)* O RSST parece ser o mais versátil e adequado método para o estudo de perdas rotacionais.

## 3 – Aparato Experimental

Neste capítulo são descritas as partes integrantes da bancada RSST (*Rotational Single Sheet Tester*) implementada neste trabalho, apresentadas suas principais características e especificações técnicas.

### 3.1 – Considerações Iniciais

Para alcançar os objetivos propostos no trabalho, definiu-se que o sistema a ser empregado na bancada experimental para o estudo das perdas magnéticas em campos rotacionais fosse o RSST, sendo o quadro magnético alimentado por um conjunto de inversores de frequência com malhas de controle realimentadas.

Inicialmente, avaliou-se que o quadro magnético projetado e utilizado por Espíndola [39] durante a realização de seu mestrado no GRUCAD, em virtude da sua disponibilidade e características construtivas, integraria a bancada em desenvolvimento. As atenções, a partir desta definição, passaram a ser quanto a alimentação elétrica do RSST, ao controle da forma de onda da indução e ao sistema de aquisição e tratamento de dados.

Com o objetivo de definir os requisitos principais para o sistema de alimentação do RSST, bem como realizar uma análise preliminar do desempenho de um controle realimentado, foi realizado um teste empregando um conversor existente no GRUCAD [9] desenvolvido para o emprego no quadro de Epstein. Neste ensaio, uma lâmina de teste foi colocada no interior do quadro magnético e o conversor forneceu energia para uma direção de magnetização. Os resultados experimentais apontaram que a topologia e o tipo de controle utilizado por Batistela [9,44] poderiam ser empregados com sucesso no RSST, desde que algumas modificações para suprir as particularidades e exigências para a alimentação do quadro do RSST fossem implementadas.

Dos ensaios preliminares se puderam definir as seguintes características da alimentação elétrica do quadro magnético:

- i) Duas fontes de alimentação sincronizadas em relação à forma de onda de saída;
- ii) Fontes isoladas galvanicamente da rede comercial;

- iii) Capacidade para impor formas de onda de tensão independentes para cada eixo de magnetização, tanto em forma quanto em amplitude e frequência;
- iv) Existência de uma malha de “terra” geral para medição e controle;
- v) Baixa impedância de saída, com possibilidade de alterar os filtros de saída em função da frequência aplicada no quadro;
- vi) Nível contínuo na tensão de saída próximo a valores nulos;
- vii) Operação em uma larga faixa de frequências;
- viii) Capacidade de corrente na saída adequada, com impedância de saída a menor possível, permitindo a possibilidade de redimensionamento ou utilização de outros quadros magnéticos;
- ix) Rápida resposta dinâmica e robustez do controle, adaptado para as características da carga;
- x) Modular para que possa sofrer intervenções ou mudanças futuras;
- xi) Circuito de potência com 3.000VA de capacidade em cada fonte, pois em operação na região de saturação a potência instantânea fornecida ao sistema é elevada.

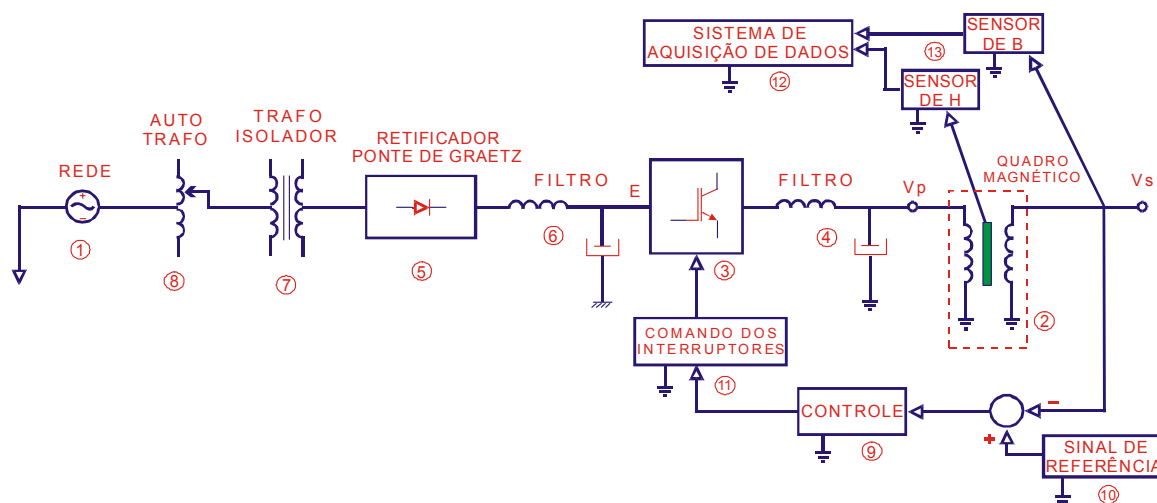


Figura 3.1 – Diagrama de blocos de uma fonte do sistema para o RSST.

A Figura 3.1 mostra o diagrama de blocos de uma das fontes do sistema, alimentando um eixo do quadro magnético. Como pode ser notado, há vários pontos de referências distintos ou “terras”: terra da rede comercial, terra da fonte de alimentação em tensão contínua do inversor e terra de controle e medição. Com este arranjo se podem referenciar as duas fontes em um mesmo ponto,

possibilitando que os sinais de cada eixo sejam sincronizados. Além disso, os sinais provenientes dos sensores de campo e indução podem ser conectados diretamente na placa de aquisição/medição com um ponto comum, garantindo segurança ao sistema.

Nas seções seguintes se especifica cada bloco funcional do diagrama mostrado na figura anterior.

### 3.2 - Bloco Funcional 1: Rede de Energia Comercial

O sistema é energizado a partir da rede de energia elétrica comercial, alimentação trifásica, 380V e 60Hz. Um disjuntor trifásico termo-magnético é utilizado na entrada da alimentação para proteção contra curto-circuito e sobrecorrente do sistema.

### 3.3 - Bloco Funcional 2: Quadro Magnético

O quadro magnético é composto da sobreposição de lâminas de aço-silício tipo E230 da ACESITA [52], de 0,5mm de espessura [39]. A excitação é obtida por intermédio de dois conjuntos de bobinas, nas direções x e y. Estas bobinas são alimentadas por duas fontes elétricas independentes. Um controle das fontes de alimentação propicia a geração do fluxo magnético desejado no teste. A Figura 3.2 ilustra a geometria e as dimensões do quadro magnético em questão.

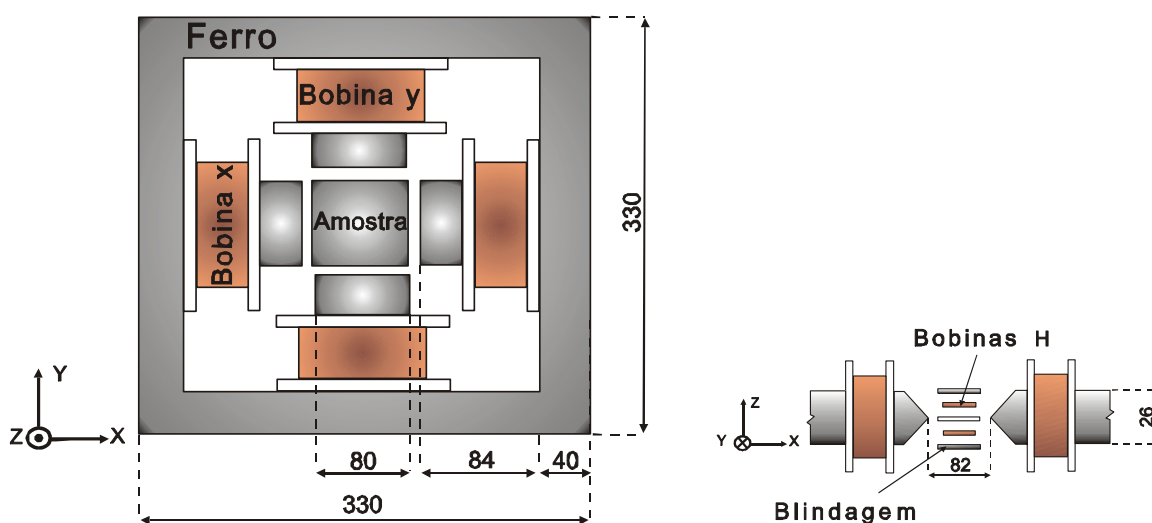


Figura 3.2 – Ilustração do quadro magnético, vista superior e lateral.  
(Cotas em milímetros)

A Figura 3.3 apresenta a fotografia do quadro magnético utilizado na bancada de testes.

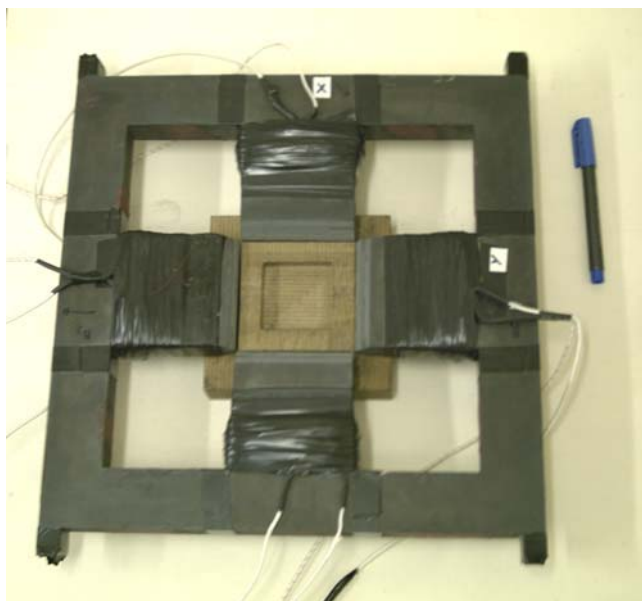


Figura 3.3 – O quadro magnético.

O quadro magnético foi projetado para operar com alimentação entre as frequências de 1 a 400Hz, tensão de pico máxima de 100V e corrente máxima de 30A [39].

### **3.4 - Bloco Funcional 3: Inversor de Tensão**

O inversor de tensão tem a configuração ponte completa, apresentada na Figura 3.4. Os interruptores empregados são do tipo IGBT (código 50MT060WH da empresa International Rectifier) com as seguintes características: corrente média de 50A, corrente de pico de 150A, tensão máxima de 600V.

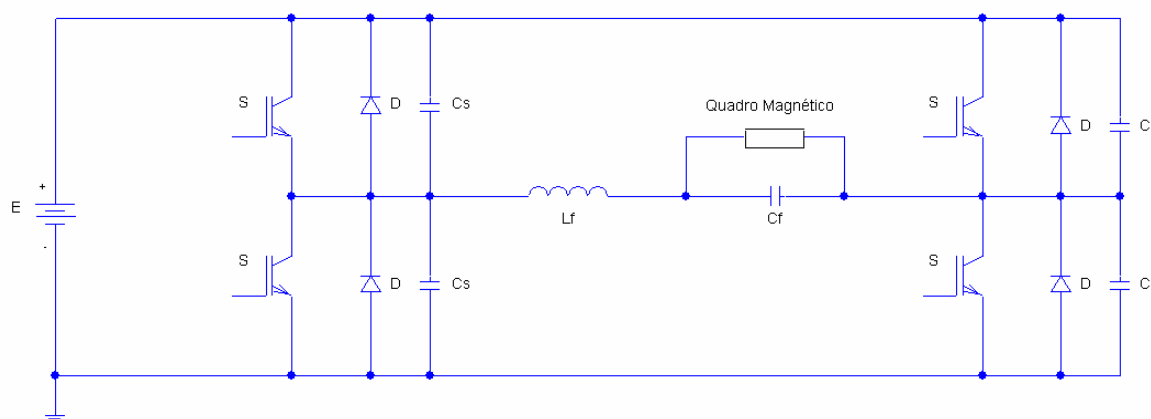


Figura 3.4 – Topologia do inversor (configuração ponte completa).

Na figura anterior  $S$  representa os interruptores IGBT,  $D$  os diodos de roda livre,  $C_s$  as capacitâncias parasitas dos interruptores,  $L_f$  e  $C_f$  são elementos do filtro de saída do inversor e  $E$  corresponde à tensão média no capacitor  $C_e$  da Figura 3.5.

Os interruptores comutam em uma frequência fixa de 80kHz em modulação do tipo PWM (*Pulse Wide Modulation*).

Houve alguns problemas com ruídos na primeira montagem das fontes. Inicialmente, escolheu-se utilizar IGBTs individuais, a fim de se poder utilizar transistores com maior rapidez na comutação. As proteções dos transistores no *drive* de comando atuavam aleatória e freqüentemente. Resolveu-se, após estudos e análises do inversor, constituir a ponte inversora com módulos de IGBTs. A descoberta de que o inversor construído com IGBTs individuais não era adequada levou um intervalo de tempo considerável. Devido ao sistema ser em malha fechada, julgava-se que o problema advinha da malha de controle, gerado pelos ruídos típicos do sistema. Após uma série de modificações no circuito eletrônico da malha, constatou-se que o problema não estava sendo resolvido ou até mesmo atenuado. Por fim, verificou-se que as indutâncias parasitas existentes entre as ligações dos IGBTs no primeiro protótipo geravam sobretensões e/ou ruídos que se propagavam, falseando comandos de gatilho, chegando às vezes a produzir curtos de braço. Devido às proteções implementadas, o sistema desligava, não danificando nenhum componente do circuito eletrônico.

Para retirar possíveis níveis de tensão contínua na saída do inversor (não eliminadas pela malha de controle) foi inserido um transformador isolador no circuito entre a saída do inversor e o quadro magnético. Apesar de se incluir uma



impedância elétrica entre a fonte de tensão e o quadro magnético, devido a ação do controle, ela não interfere significativamente no desempenho dinâmico do sistema.

### 3.5 - Bloco Funcional 4: Filtro de Saída

O filtro de saída do inversor de tensão é composto por uma indutância ( $L_f$ ) de  $40\mu\text{H}$  e por uma capacitância ( $C_f$ ) de  $146\mu\text{F}$ . Como o valor do indutor escolhido possui um valor relativamente baixo em vista das impedâncias parasitas da fonte  $E$  até o quadro magnético, por exemplo, para a frequência de operação de  $150\text{Hz}$  a impedância é de  $9,5\text{m}\Omega$ , ele praticamente não limita a evolução da corrente no circuito. Deste modo, há uma transferência adequada de potência da fonte  $E$  para o quadro magnético na região de saturação da amostra em teste, o ponto mais crítico de funcionamento do sistema.

### 3.6 - Blocos Funcionais 5 e 6: Fonte de Tensão Contínua

A estrutura da fonte de tensão contínua de alimentação de cada inversor pode ser vista na Figura 3.5. Ela é composta por uma ponte retificadora trifásica do tipo Graetz ( $D1$  a  $D6$ ), com um filtro constituído por um banco de capacitores ( $C_e$ ), totalizando  $17\text{mF}$ , e por um indutor ( $L_e$ ) de  $28\text{mH}$ . As fontes de tensão  $V1$  a  $V3$  representam a rede de energia, o autotransformador regulável (descrito no Item 3.8) e o transformador isolador (descrito no Item 3.7).

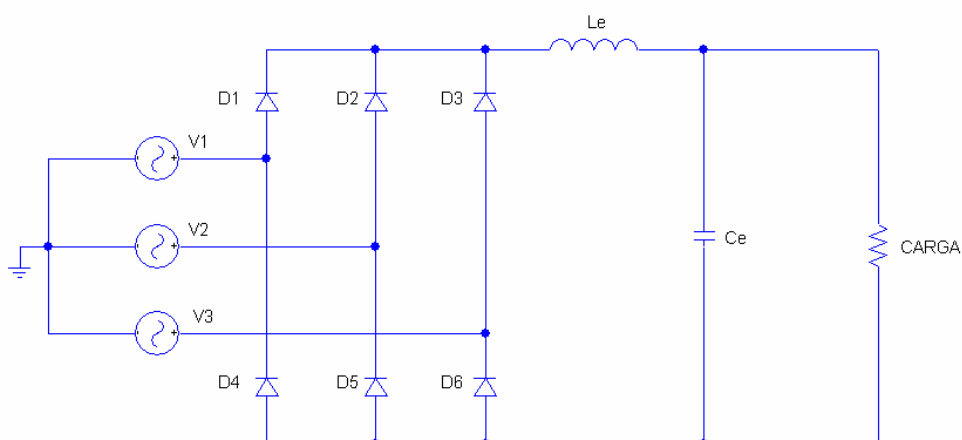


Figura 3.5 – Topologia do retificador (configuração ponte de Graetz).

### **3.7 - Bloco Funcional 7: Isolamento Galvânico**

Para isolar galvanicamente o sistema da rede comercial se empregou, para cada retificador, um transformador trifásico com as seguintes características: tensão de entrada nominal de 380V, tensão de saída 127V, esquema de ligação triângulo/estrela.

### **3.8- Bloco Funcional 8: Autotransformador Regulável**

A tensão de alimentação do quadro magnético varia em função da frequência de operação e da amplitude da indução na amostra. Esta variação é obtida da associação de dois fatores: primeiro por meio da mudança do nível do sinal de referência, o qual altera o índice de modulação da técnica PWM e, segundo, pela mudança do valor da tensão contínua na entrada do inversor. Esta última operação é executada manualmente, através do ajuste de um autotransformador regulável em tensão, que interliga o transformador isolador e a rede comercial.

O autotransformador empregado na bancada é trifásico, tensão de entrada de 380V, corrente máxima de saída de 6,3A, podendo variar a tensão de saída entre 0 a 413V.

### **3.9- Bloco Funcional 9: Controle do Inversor**

As malhas de controle dos inversores de tensão têm por objetivo garantir a geração do fluxo magnético desejado no teste. O controle empregado na malha é do tipo não linear, especificamente o controle por modo deslizante [44,45] no que diz respeito a sua topologia, acrescido de uma malha com controlador PI (Proporcional Integral) e somando-se o próprio sinal de referência ao sinal de controle. A malha de controle é do tipo analógica, sendo seu projeto baseado em Batistela [9]. Seu diagrama de blocos é apresentado na Figura 3.6.

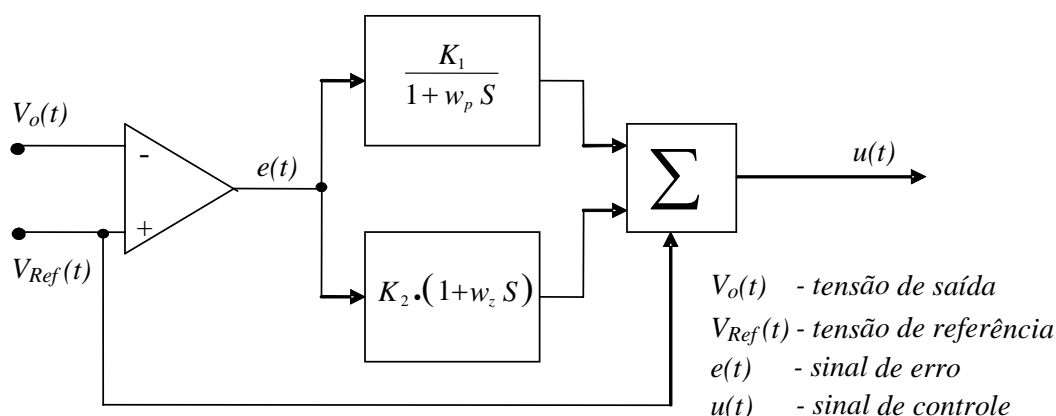


Figura 3.6 – Diagrama de blocos da malha de controle.

A malha de controle implementada proporciona que a forma de onda da indução na lâmina em teste esteja em fase com a referência, algo incomum em termos de sistemas controlados. Ela propicia que as fontes elétricas tenham as seguintes características:

- i) Operação em frequência fixa de comutação dos interruptores de potência dos inversores;
- ii) Poder seguir formas de onda arbitrárias criadas pelo usuário;
- iii) Alimentar cargas lineares ou não lineares, regulando a amplitude instantânea da tensão de saída;
- iv) Baixo conteúdo harmônico da tensão de saída quando operando com forma de onda senoidal pura;
- v) Poder variar em frequência e amplitude a forma de onda da tensão de saída.

O método de controle utilizado na bancada se diferencia dos demais métodos encontrados na literatura por possuir uma resposta eficaz, capaz de manter a forma de onda da indução magnética na amostra com baixo conteúdo harmônico (para induções senoidais), como poderá ser observado nos resultados experimentais dos capítulos seguintes. Esta é uma vantagem importante em relação aos métodos digitais, pois não depende de cálculos para ajustar a forma de onda da tensão de alimentação do quadro magnético. Sabe-se que devido a não linearidade do sistema, para determinados pontos de operação o procedimento de cálculo nos métodos digitais não atinge uma solução adequada. Além disso, o método implementado não necessita de nenhum ajuste circuital na malha para geração de formas de onda arbitrárias, variação de frequência ou

amplitude, simplesmente muda-se o sinal de referência para o controle. Esta característica do sistema permite que os ensaios sejam realizados com maior rapidez que os métodos digitais de controle.

### **3.10- Bloco Funcional 10: Sinal de Referência**

Os sinais de referência para as malhas de controle dos inversores provêm da placa modelo PCI-4451 da National Instruments residente em um microcomputador. Foram desenvolvidos Instrumentos Virtuais (VI – *Virtual Instruments*) no ambiente LabVIEW [53] para ajustar a forma, o valor da amplitude e a frequência do sinal de referência.

O ajuste dos sinais de referência para os dois inversores de tensão em relação à forma de onda, amplitude e defasagem é realizado de maneira independente. Porém, os sinais são sincronizados entre si.

### **3.11- Bloco Funcional 11: Comando dos Interruptores**

Os sinais de comando para os interruptores do inversor, provenientes da placa de controle, são condicionados por placas da Semikron, modelo SKHI23/12, as quais isolam inversor e controle, e possuem um sistema de proteção de sobretensão e sobrecorrente nos interruptores.

### **3.12 - Bloco Funcional 12: Sistema de Aquisição de Dados**

O sistema de aquisição e tratamento de dados da bancada RSST está baseado na aplicação de programas numéricos utilizando Instrumento Virtual (VI) [54], desenvolvidos no ambiente LabVIEW, para obter valores instantâneos de indução e campo magnético, calcular as perdas envolvidas por ciclo elétrico e apresentar os resultados graficamente, de maneira rápida, clara e precisa.

O Instrumento Virtual implementado está residente em um computador pessoal, com a plataforma LabVIEW versão 7.1. O computador é equipado com uma placa de aquisição/geração de dados da National Instruments PCI 6251, a qual possui uma taxa máxima de amostragem de 1,25 MS/s (*Mega Samples per second*).

O *software* na plataforma LabVIEW pode ser compreendido como se possuísse duas partes distintas: a aquisição dos sinais de tensão provenientes dos sensores de indução e campo magnético da bancada e o tratamento dos dados adquiridos.

A configuração da aquisição dos sinais requer que os canais de entrada da placa tenham seus ganhos (escalas) configurados individualmente. O modo de conexão utilizado para os sinais foi de terra comum, devido às conexões físicas da bancada experimental.

Os dados adquiridos ficam armazenados como vetores de números decimais, correspondentes aos níveis de tensão dos diferentes canais de entrada da placa. Também são armazenados os intervalos de tempo entre duas medidas para a devida correspondência com o sinal real.

Na Figura 3.7 são apresentados os campos de controle do usuário do VI e um exemplo dos resultados dos cálculos das grandezas magnéticas. As saídas gráficas deste VI são mostradas nos capítulos seguintes.

The screenshot displays a LabVIEW front panel with several sections for user control and data display:

- AJUSTE DOS SENSORES:** Controls for sensor parameters including  $N_{hx}$ ,  $N_{hy}$ ,  $A_{hx}$ ,  $A_{hy}$ ,  $A_{juste\ Hx}$ ,  $A_{juste\ Hy}$ ,  $N_{by}$ ,  $A_{by}$ ,  $N_{bx}$ ,  $A_{bx}$ ,  $N_{bx\ 2}$ ,  $A_{bx\ 2}$ ,  $N_{by\ 2}$ , and  $A_{by\ 2}$ .
- Dados da Lâmina:** Input fields for  $Largura\ Y\ (m)$ ,  $Largura\ X\ (m)$ ,  $espessura\ (m)$ ,  $massa\ (kg)$ , and  $Densidade\ de\ Massa\ Calculada$ .
- Descrição das Constantes:** A table listing constants and their descriptions:
 

$N_{hy}, N_{hx}$	Numero de espiras enrolamento sensor de campo Y e X
$A_{hy}, A_{hx}$	Area seção transversal do sensor de campo Y e X
$N_{by}, N_{bx}$	Numero de espiras sensor de indução Y e X
$A_{by}, A_{bx}$	Area da seção transversal sensor de indução Y e X
$Ganho\ HxHy$	Ganho teorico dos amplificadores de campo Y e X
$Ganho\ BxBy\ Aten$	Ganho teorico dos atenuadores de indução Y e X
$Ganho\ BxBy\ Ampl$	Ganho teorico dos amplificadores de indução Y e X
$Ajuste\ HxHy$	Constante de ajuste do sensor de campo - teste solenóide
- AJUSTES DOS SINAIS:** Controls for  $Ganho\ Hx$ ,  $Ganho\ Hy$ ,  $Frequência$ ,  $G\ BxBy\ Ampl\ 1$ ,  $G\ BxBy\ Aten1$ ,  $G\ BxBy\ Ampl\ 2$ , and  $G\ BxBy\ Aten\ 2$ .
- Controle de Ganho dos Canais:** A table for setting minimum and maximum gain for six channels:
 

Mínimo	Máximo	Canal
-5,00	5,00	Canal 0
-5,00	5,00	Canal 1
-5,00	5,00	Canal 2
-5,00	5,00	Canal 3
-5,00	5,00	Canal 4
-5,00	5,00	Canal 5
- RESULTADOS:** Displays calculated values for external and internal sensors, including  $B_{x1\ max}$ ,  $B_{y1\ max}$ ,  $P_x\ (W/kg)$ ,  $P_y\ (W/kg)$ ,  $P_t\ (W/kg)$ ,  $H_{x\ max}$ ,  $H_{y\ max}$ ,  $B_{x2\ max}$ ,  $B_{y2\ max}$ ,  $P_{x2}\ (W/kg)$ ,  $P_{y2}\ (W/kg)$ , and  $P_{t2}\ (W/kg)$ .
- Nome do Arquivo:** A text field showing the file path: `C:\Usuarios\Pedro\dados\E230\blindagem_10_3mm\50Hz\rot_1T.txt`.

Figura 3.7 – Campos de controle do usuário e resultados dos cálculos das grandezas magnéticas e de perdas em uma amostra.

### 3.13 - Bloco Funcional 13: Sensores de Indução e Campo Magnético

Os sensores de indução e campo magnético foram escolhidos e desenvolvidos baseados nos aspectos levantados na Seção 2.5. A seguir, traçam-se detalhes destes sensores.

#### 3.13.1 – Os Sensores de Indução Magnética

A função dos sensores de indução magnética na bancada RSST implementada vai além do fornecimento de informações do nível e da forma de onda da indução para o sistema de aquisição. A tensão induzida nestes sensores também integra a malha de controle dos inversores, sendo responsável por prover uma imagem da variável a ser controlada (sinal  $V_o(t)$  da Figura 3.6). Sendo assim, definiu-se utilizar o método das bobinas sensoras para determinação da indução magnética. Este método, por apresentar níveis de tensão induzida maiores que o método da agulha, para um mesmo valor de indução magnética, está menos sujeito a interferência e ruído que poderiam comprometer o funcionamento da malha de controle.

Outro fator motivador para não utilizar o método das agulhas é que sua aplicação traz mais dificuldades para o emprego de lâminas para blindagem do fluxo magnético disperso.

Na montagem das bobinas sensoras se optou por confeccioná-las, em uma mesma amostra, de duas maneiras distintas: bobinas envolvendo toda e também parcialmente a lâmina a ser testada. Deste modo, por se tratar de uma bancada em desenvolvimento, teve-se a possibilidade de analisar os resultados dos ensaios para estas duas maneiras de execução das bobinas.

Em cada eixo de magnetização foram enroladas bobinas sensoras com as seguintes características:

- i) Bobina externa: 100 espiras de fio esmaltado com seção de  $0,0040\text{mm}^2$  (41 AWG) em torno da amostra;
- ii) Bobina interna: 10 espiras de fio esmaltado com seção de  $0,0025\text{mm}^2$  (43 AWG) na região central da amostra, em dois furos de 0,5mm de diâmetro distanciados entre si de 40mm.

A Figura 3.8 apresenta a disposição das bobinas sensoras implementadas em uma lâmina com dimensões de 80x80mm<sup>2</sup>. Nesta figura as bobinas internas não podem ser notadas porque foram sobrepostas pelas bobinas externas.



Figura 3.8 – Disposição das bobinas sensoras de indução na amostra.

Para adaptar o nível das tensões induzidas nas bobinas com as tensões envolvidas na malha de controle, foram montados circuitos eletrônicos que podem ser tanto atenuador como amplificador de sinais. Com o aumento da frequência e/ou indução na amostra, o valor das tensões induzidas nas bobinas são maiores, necessitando que este sinal seja atenuado. No sentido inverso este efeito é oposto, necessitando a amplificação do sinal.

### 3.13.2 – Os Sensores de Campo Magnético

Para aplicação na bancada RSST os sensores de campo magnético foram confeccionados no mesmo núcleo e dispostos ortogonalmente entre si. As espiras do sensor foram enroladas com fio de seção 0,0040mm<sup>2</sup> (41 AWG), em uma base quadrada de fenolite nas dimensões de 40x40mm<sup>2</sup> de lado e 1,55mm de espessura.

Por se tratar de sensores construídos no mesmo núcleo, a área da bobina interna (mais próxima do núcleo) é menor que a área da bobina mais externa. Para que o nível da tensão induzida nas duas bobinas fosse o mesmo, o número de espiras de cada bobina foi calculado de maneira a compensar a diferença de suas áreas internas. Deste modo, a bobina interna (utilizada para o eixo y) foi

enrolada com 1.800 espiras e a bobina externa (para o eixo x) com 1.300 espiras. A Figura 3.9 apresenta os sensores de campo montados.



Figura 3.9 – Disposição das bobinas sensoras de campo magnético.

Devido à acomodação das espiras umas sobre as outras, a área interna da bobina se tornou uma variável de determinação imprecisa. Conseqüentemente, para aplicação direta da Equação 2.7 na determinação do campo magnético é necessário encontrar um fator de ajuste para o sensor. A calibração destes sensores foi realizada empregando-se um solenóide de referência, cuja técnica é apresentada no Anexo.

Na aplicação no RSST a tensão nos sensores de campo é de baixa amplitude, principalmente para baixas induções e/ou frequências (ordem de micro ou poucos milivolts). Para estes casos foi projetado um amplificador para cada eixo de campo, empregando circuitos integrados operacionais de alta precisão (amplificadores de instrumentação), que servem de pré-amplificadores para o sistema de aquisição. O ganho de tensão destes amplificadores pode ser ajustado entre os valores de 1 a 1.000 V/V.

Os circuitos de amplificação de sinais e suas conexões elétricas foram planejados para atenuar ruídos da melhor forma possível. De outro modo, o nível de ruído seria da mesma ordem de grandeza do sinal a ser medido.



### 3.14 – Aspectos Gerais

A Figura 3.10 apresenta uma fotografia da montagem das placas constituintes do circuito inversor.

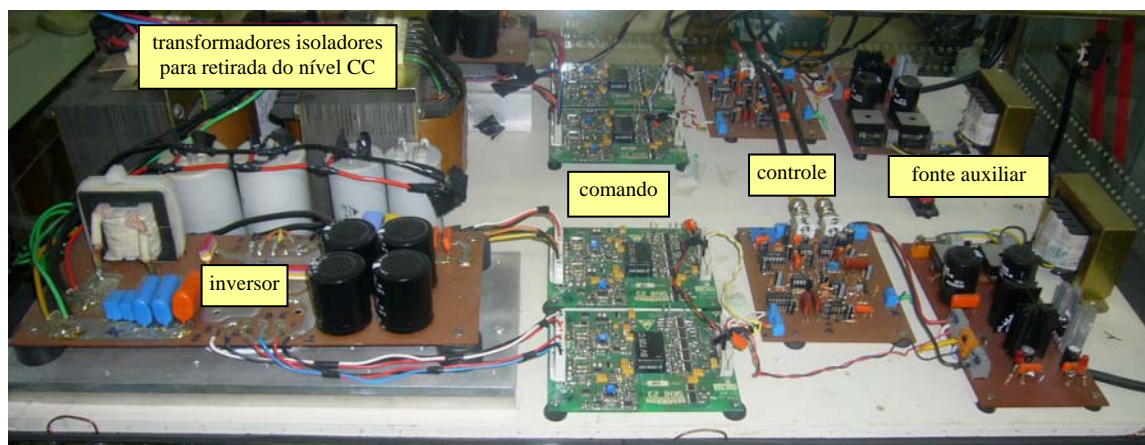


Figura 3.10 – Aspecto geral da montagem das placas constituintes do circuito inversor.

A bancada RSST está montada como mostra a Figura 3.11, sendo a seguinte disposição dos equipamentos (de baixo para cima): Na primeira prateleira estão as duas fontes de corrente contínua e os transformadores isoladores, na segunda os dois auto-transformadores e na terceira os circuitos inversores com suas respectivas placas de controle e comando. Na parte superior encontram-se o quadro magnético e os amplificadores dos sinais de indução e campo magnético.

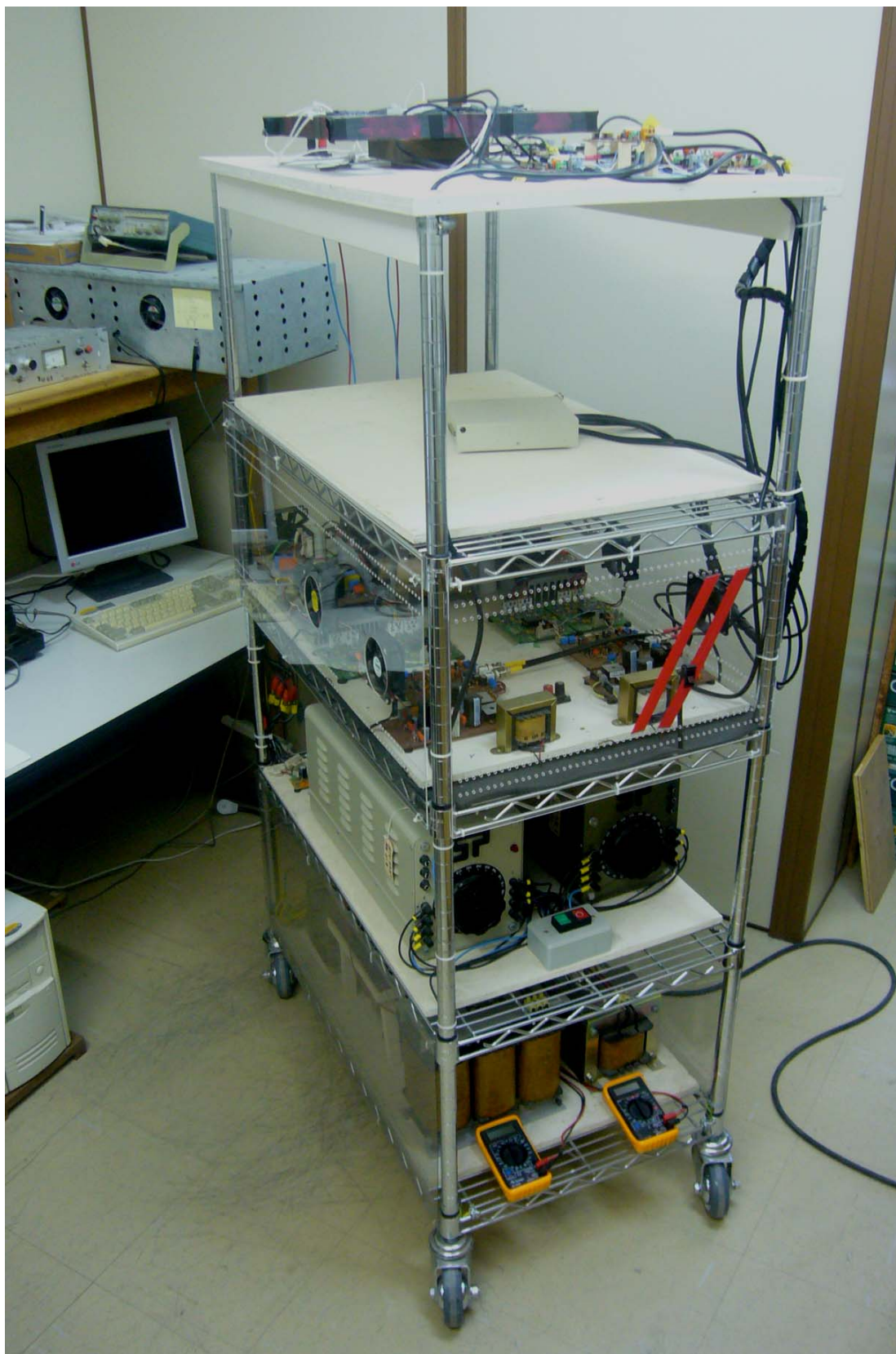


Figura 3.11 – Bancada RSST.

## **4 – Análise da Influência da Blindagem**

Neste capítulo é estudada a influência da blindagem na bancada RSST. Uma análise é realizada em campos alternantes de modo que os resultados possam ser comparados com os obtidos no teste padrão no quadro de Epstein. Também são realizadas simulações numéricas e avaliados resultados experimentais em campos rotacionais.

### **4.1 – Resultados Experimentais em Campos Alternantes para Variação da Distância da Blindagem**

Para validação de todo o sistema desenvolvido para o RSST se fez necessária uma comparação dos resultados obtidos nesta bancada de testes com um equipamento padrão. Como o método RSST ainda não é normatizado e não havia outro dispositivo para ensaios em campos rotacionais disponível, optou-se por comparar os resultados em campos alternantes oriundos do RSST com as medições efetuadas usando o teste de Epstein.

Conforme apresentado no Item 2.5.3, o efeito da blindagem da amostra para o RSST foi observado, evidenciando-se a necessidade da utilização deste acessório em todas as medições. Porém, observou-se ainda que os laços  $B(H)$  obtidos via RSST em campos alternantes modificam sua forma em função da distância entre a blindagem e a amostra de aço ensaiada. Este fenômeno ainda não havia sido comentado na literatura [55].

Amostras de lâminas do mesmo tipo de aço, material E230 – grãos não orientados – FeSi 3% [52], espessura de 0,5mm e pertencentes ao mesmo lote de fabricação foram testadas no RSST e no quadro de Epstein na frequência de 50Hz, com a indução máxima de 1T. No quadro de Epstein foram realizados ensaios distintos: lâminas com corte (estampagem) no sentido longitudinal ao de laminação e no sentido transversal. No RSST foram realizados ensaios com somente um eixo de magnetização em funcionamento para medições no sentido transversal de laminação e outros ensaios para o sentido longitudinal. A amostra neste caso tinha dimensões de 80x80mm<sup>2</sup>.

Face ao exposto anteriormente, realizaram-se medidas de campo magnético em quatro situações distintas: sem a utilização de blindagem e para

uma distância entre a blindagem e a amostra de 5,9; 7,3 e 10,3mm. Detalhes da montagem são apresentados na Figura 4.1, onde:  $a$  - espessura da amostra (0,5mm);  $b$  - espessura do sensor de indução e do isolamento dos condutores (0,3mm);  $c$  - altura total do sensor de campo (5,59mm) e  $d$  - distância total entre a amostra e a blindagem (variável).

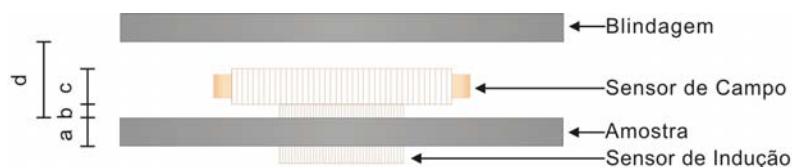


Figura 4.1 – Detalhes da montagem para variação da distância da blindagem.

A lâmina de blindagem era do mesmo material da amostra e foi posicionada com a mesma orientação de laminação desta última.

Nas figuras 4.2 a 4.6 são apresentados os laços  $B(H)$  nos dois sentidos de laminação da amostra (sentido longitudinal à esquerda e transversal à direita das figuras) dos ensaios com variação da distância da blindagem. Nestas figuras o lócus obtido via quadro de Epstein é representado em vermelho. Para verificar a repetitividade dos ensaios no RSST foram realizadas quatro série de testes, sendo cada série composta de três medições distintas para cada distância da blindagem (traços azul, verde e laranja das figuras). Neste conjunto de medições a amostra e a lâmina de blindagem foram retiradas e recolocadas no quadro magnético. Os entreferros entre os pólos do dispositivo magnético e cada uma das bordas da amostra foram ajustados para que tivessem as mesmas distâncias.

A diferença entre as quatro séries de testes constitui-se no fato que, para cada uma delas, os sensores de campo foram retirados e posteriormente recolocados, sendo que em duas séries os sensores foram posicionados girando o seu eixo em  $90^\circ$ . Esta manobra teve a finalidade de avaliar se haveria diferença nas medidas de campo magnético em função de um dos sensores estar mais distante da lâmina do que o outro, como explanado na Seção 3.13.2.

A situação sem blindagem é apresentada apenas para uma série de medidas. Dá-se a ela apenas um caráter ilustrativo, pois o efeito das medições de campo para este caso já são conhecidos.

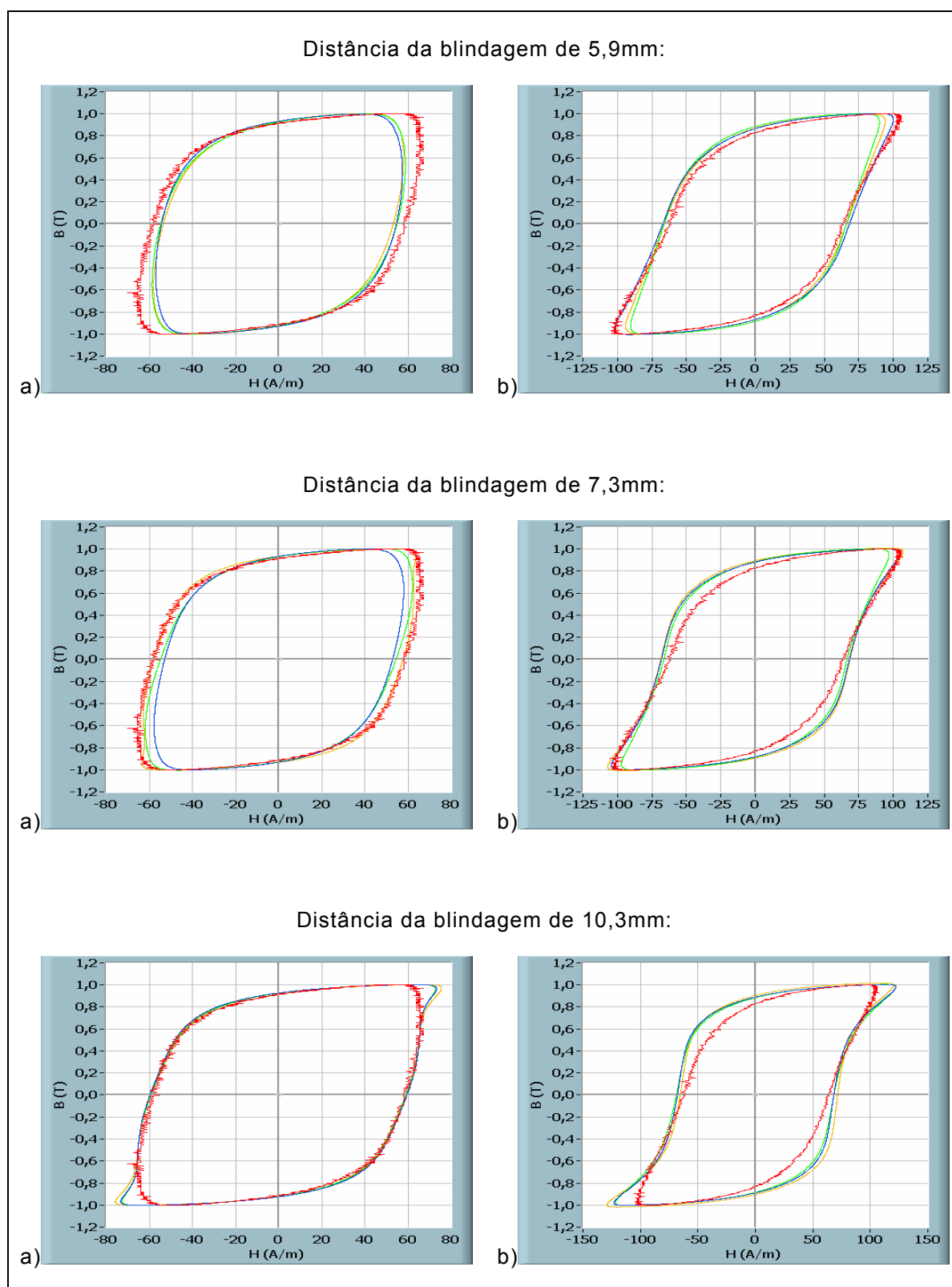


Figura 4.2 – Laços  $B(H)$  para a primeira série de testes.  
a) Sentido longitudinal de laminação.  
b) Sentido transversal de laminação.



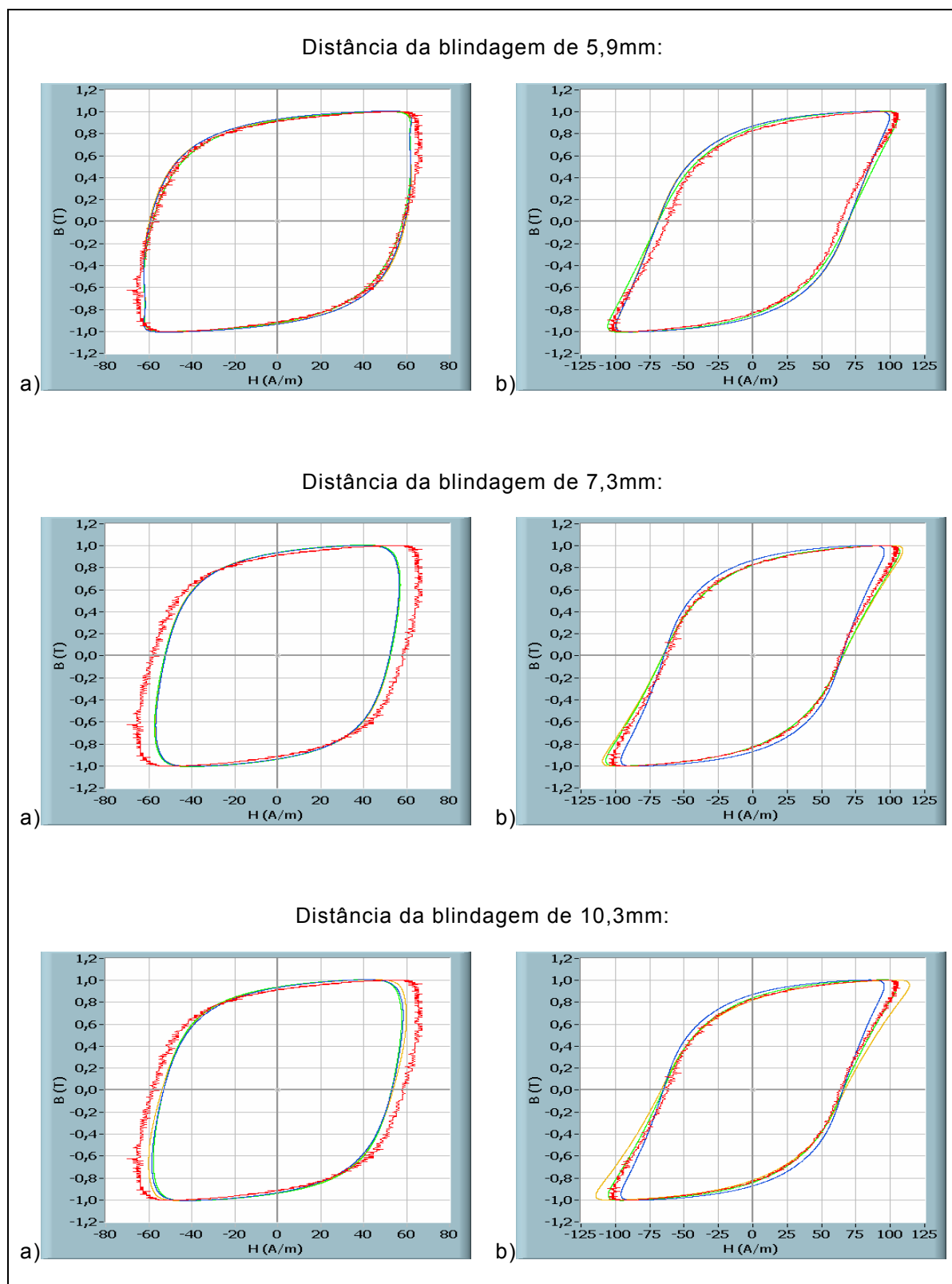


Figura 4.3 – Laços B(H) para a segunda série de testes.  
a) Sentido longitudinal de laminação.  
b) Sentido transversal de laminação.

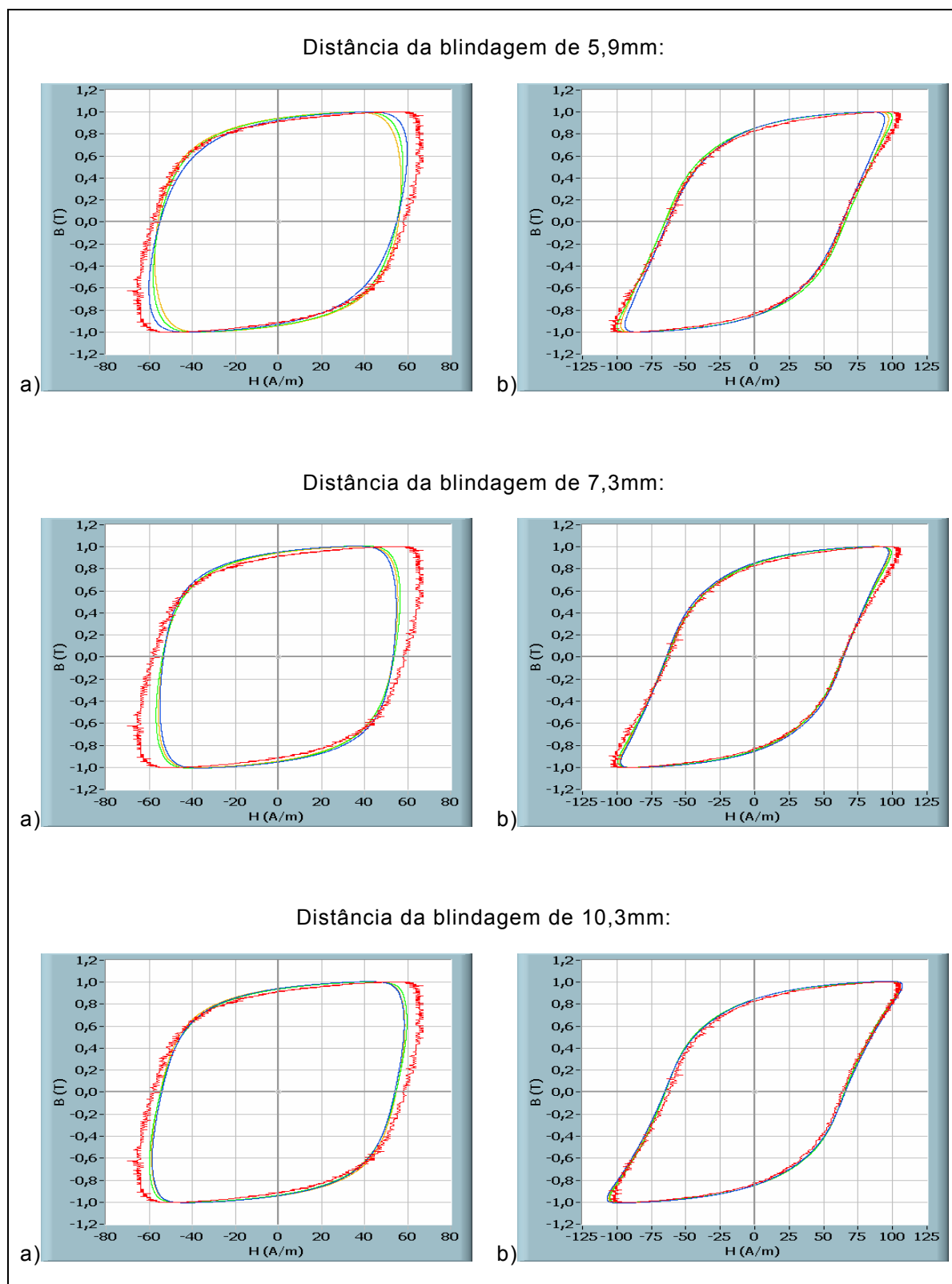


Figura 4.4 – Laços B(H) para a terceira série de testes.  
a) Sentido longitudinal de laminação.  
b) Sentido transversal de laminação.

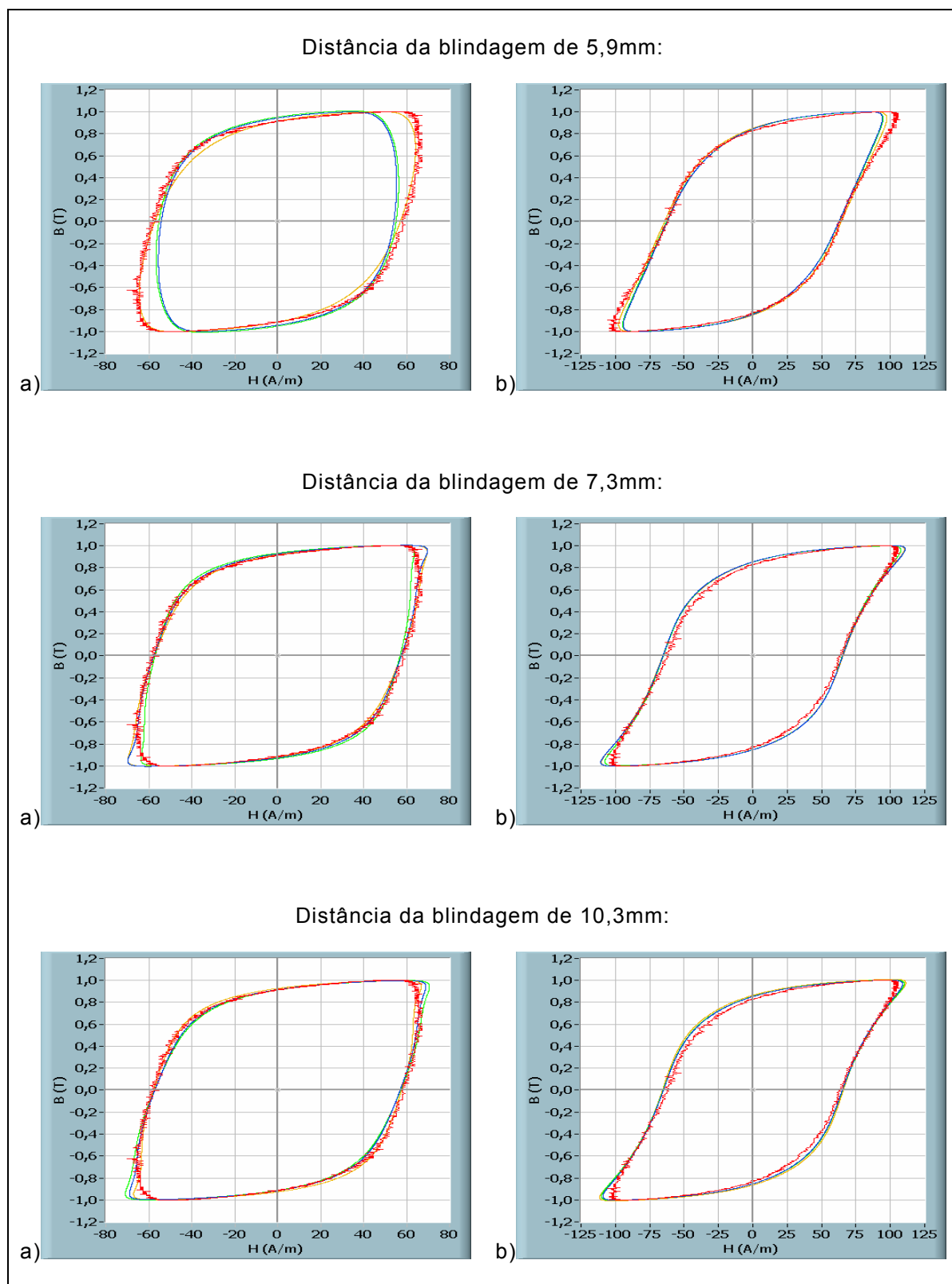


Figura 4.5 – Laços B(H) para a quarta série de testes.  
a) Sentido longitudinal de laminação.  
b) Sentido transversal de laminação.



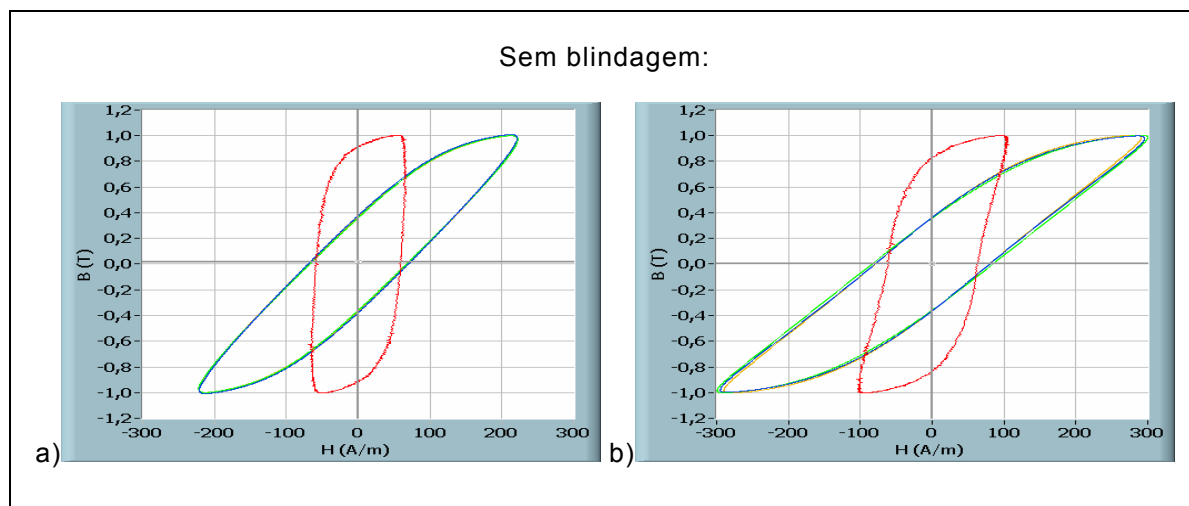


Figura 4.6 – Laços  $B(H)$  para a primeira série de testes.

a) Sentido longitudinal de laminação.

b) Sentido transversal de laminação.

Dos ensaios realizados observa-se que o teste sem blindagem apresenta as maiores discrepâncias. Na Figura 4.6 se pode notar que o campo magnético medido pelo sensor na bancada RSST é bem maior que o obtido pelo quadro de Epstein, fenômeno já descrito na literatura.

Aplicando a lâmina de blindagem no sistema RSST os loci  $B(H)$  ficaram mais próximos dos encontrados utilizando o quadro de Epstein, bem como os valores das perdas magnéticas medidas nos dois dispositivos de testes.

Nos resultados dos ensaios apresentados nas figuras 4.2 a 4.5 não se pode inferir qual a distância adequada entre a blindagem e amostra de modo que o RSST apresente o resultado mais preciso. Esta análise pode ser ratificada observando-se os resultados para a distância de 10,3mm, na qual foram obtidas boas concordâncias na terceira e quarta série de testes para ambos os sentidos de laminação. Em contrapartida, para a primeira e segunda série de testes estes resultados não se repetiram.

Algumas vezes a execução de uma série de testes trouxe melhoria nas medições para um sentido de laminação e piora para o outro. Isto pode ser observado em uma comparação entre as figuras 4.2 e 4.4 para a distância de 5,9mm. Em outras medições o simples reposicionamento da blindagem e da amostra no dispositivo trouxe mudanças significativas na forma do lócus, o que pode ser observado claramente na Figura 4.3 para a distância de 10,3mm no sentido transversal de laminação.

Uma das dificuldades no desenvolvimento das séries de testes é posicionar os sensores de campo magnético exatamente ortogonais em relação à amostra. Entre si os sensores são perfeitamente ortogonais, já que foram construídos em um mesmo núcleo. O posicionamento inadequado do sensor de campo poderia ser uma das fontes de erro nas medições. Todavia, observa-se em alguns resultados que este erro deveria ser sistemático. Ou seja, se o erro é maior para um sentido de laminação este efeito deveria ser notado para todas as variações de distância daquela série de testes, o que não ocorreu na prática.

Na investigação sobre a repetitividade do sistema se pode concluir que o RSST é bastante sensível à pequenas variações de entreferro e ao posicionamento da amostra. Todavia, se a amostra é fixada no dispositivo e somente a lâmina de blindagem é deslocada, o valor do campo magnético medido é cada vez maior na proporção em que a distância entre a blindagem e a amostra aumenta. Os resultados experimentais desta análise podem ser observados nas figuras 4.7 e 4.8 para as distâncias de 7,3; 10,3 e 13,3mm.

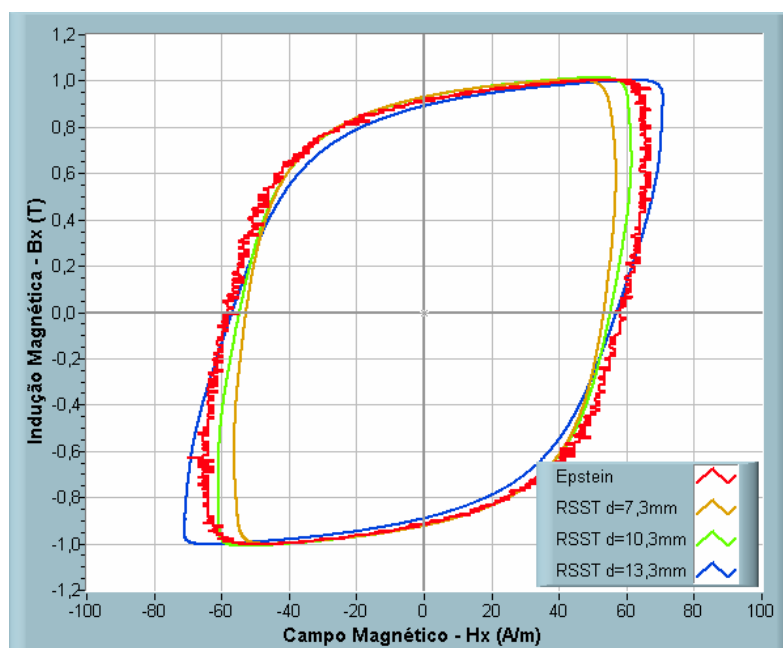


Figura 4.7 – Laços B(H) obtidos no quadro de Epstein e no RSST para diferentes distâncias da blindagem (direção longitudinal).

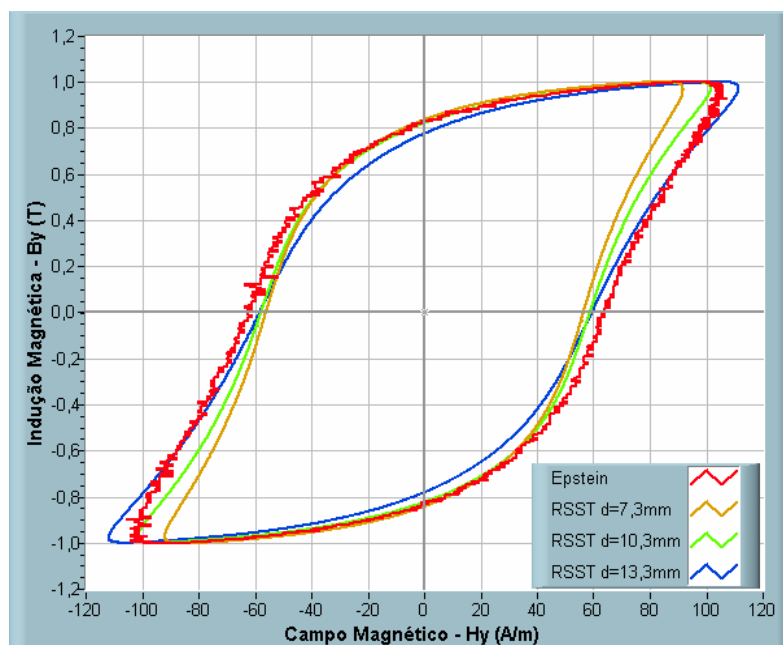


Figura 4.8 – Laços B(H) obtidos no quadro de Epstein e no RSST para diferentes distâncias da blindagem (direção transversal).

As figuras a seguir mostram o efeito da variação da distância da blindagem na medição das perdas magnéticas na amostra em função da indução magnética. Na Figura 4.9 são apresentados os resultados para a direção longitudinal de laminação e na Figura 4.10 para direção transversal.

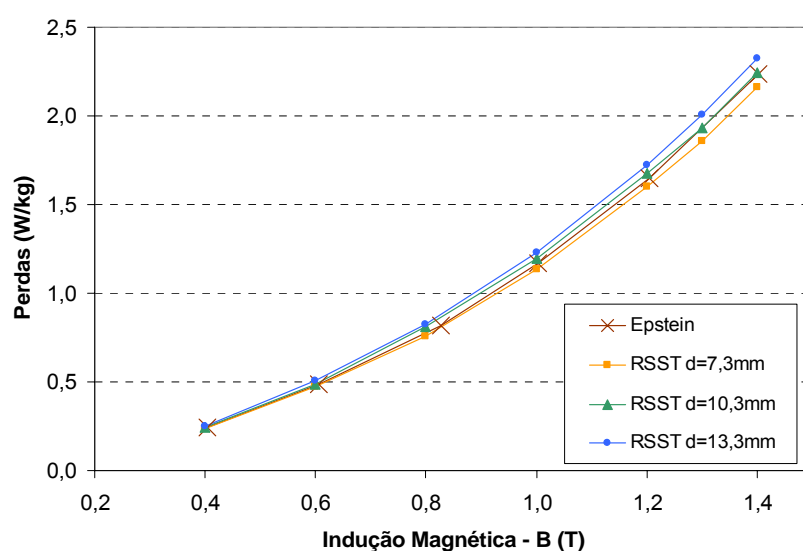


Figura 4.9 – Perdas magnéticas medidas pelo quadro de Epstein e no RSST para diferentes distâncias da blindagem (direção longitudinal).

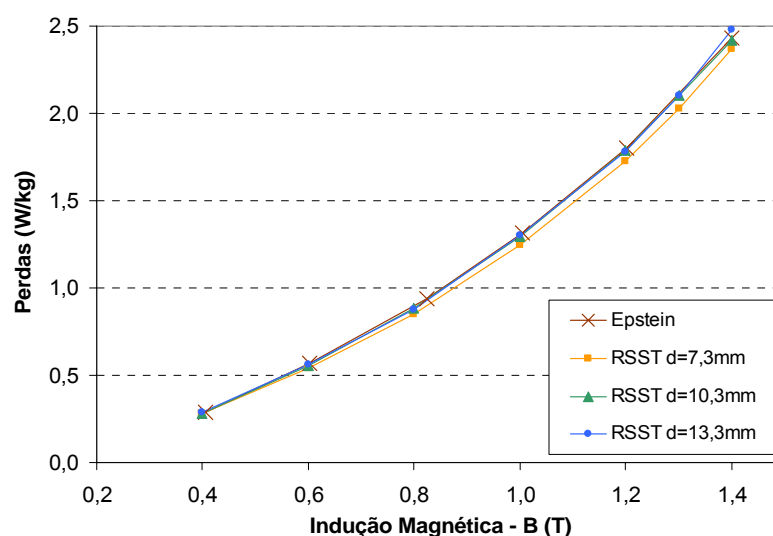


Figura 4.10 – Perdas magnéticas medidas pelo quadro de Epstein e no RSST para diferentes distâncias da blindagem (direção transversal).

Dos ensaios realizados com medição de potência no RSST e apresentados nas figuras anteriores, verifica-se que há um acréscimo no valor das perdas medidas na lâmina na medida em que a blindagem se afasta da amostra. Este efeito é mais facilmente perceptível visualmente na Figura 4.9, porém acontece para ambas as direções de laminação como pode ser observado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Perdas magnéticas para diferentes distâncias da blindagem no RSST e no quadro de Epstein.

B(T)	Perdas Magnéticas (W/kg)							
	Sentido Longitudinal				Sentido Transversal			
	RSST para diferentes distâncias de blindagem			Epstein	RSST para diferentes distâncias de blindagem			Epstein
	7,3mm	10,3mm	13,3mm		7,3mm	10,3mm	13,3mm	
1,4	2,162	2,245	2,325	2,236	2,370	2,421	2,479	2,433
1,3	1,861	1,935	2,010	-	2,025	2,100	2,100	-
1,2	1,604	1,677	1,720	1,646	1,724	1,786	1,782	1,798
1,0	1,137	1,197	1,233	1,172	1,247	1,295	1,302	1,312
0,8	0,759	0,808	0,822	0,819	0,852	0,882	0,887	0,941
0,6	0,476	0,485	0,509	0,485	0,544	0,557	0,562	0,570
0,4	0,234	0,242	0,249	0,240	0,280	0,280	0,290	0,290

Da Tabela 4.1 se pode ratificar que para ambas as direções as perdas são maiores para maiores distâncias entre a blindagem e a amostra (para a maioria dos pontos medidos). A observação anterior só não é válida para os pontos 0,8 e 1,2T no sentido transversal de laminação, nos quais os valores de perdas medidas foram menores para a distância de 13,3mm do que para 10,3mm. Este fato realça mais uma vez a sensibilidade do sistema e a dificuldade que se tem para a repetição dos ensaios. Esta não é uma particularidade da bancada RSST desenvolvida, outros sistemas para medição de perdas magnéticas em chapa única apresentam esta mesma característica [12].

Para eliminar os erros que possam ocorrer no posicionamento da amostra com a variação da blindagem, a bancada RSST será analisada na próxima seção por simulação numérica.

## 4.2 – Simulação em Campos Alternantes para Variação da Distância da Blindagem

Para analisar o efeito da variação da distância da blindagem por cálculo numérico foi utilizado o programa CARMEL, desenvolvido no L2EP - *Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique de Puissance* de Lille na França, em cálculo 3D com elementos finitos. Todo o conjunto magnético (quadro, blindagem, amostra e bobinas) foi inserido no programa com as mesmas dimensões da bancada RSST.

Um mesmo arquivo de desenho continha três blindagens com distâncias distintas: 5,9, 7,3 e 10,3mm a partir da amostra. Deste modo pôde-se elaborar somente uma malha (um único arquivo) para a simulação de cada distância requerida. A blindagem pôde ser retirada ou inserida alterando-se a configuração de material no programa (ar ou ferro). Um detalhe da disposição das blindagens é apresentado na Figura 4.11.

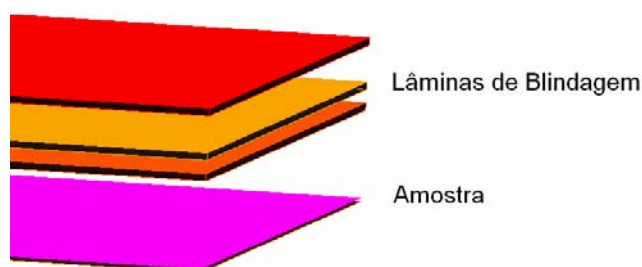


Figura 4.11 – Detalhe da disposição das blindagens no arquivo de simulação.

Levando-se em consideração a simetria do sistema e condições de contorno apropriadas, somente metade da estrutura foi modelada. Para descrever o comportamento não-linear da amostra e da blindagem foi empregada a expressão analítica 4.1 (curva anisterética).

$$H(B) = \frac{B}{\mu_o} \left( \frac{c B + \tau \varepsilon}{B^{2\alpha} + \tau} \right) \quad (4.1)$$

Os coeficientes de ajuste da equação foram identificados dos resultados experimentais do aço E230 em 50Hz (não estavam disponíveis na ocasião os resultados em baixa frequência). A Tabela 4.2 apresenta os valores dos coeficientes para o sentido transversal de laminação, para o qual serão apresentados os resultados de simulação.

Tabela 4.2 – Coeficientes para o sentido transversal de laminação.

Coeficiente	Valor
$c$	$45 \cdot 10^{-3}$
$\alpha$	8
$\tau$	$100 \cdot 10^3$
$\varepsilon$	$125 \cdot 10^{-6}$

A grande dificuldade para a realização das simulações foi conseguir confeccionar uma malha 3D que pudesse trazer resultados precisos e ao mesmo tempo não fosse demasiadamente grande. Como as relações de dimensões da estrutura são bastante distintas (o quadro magnético tem 330x330mm<sup>2</sup>, enquanto a lâmina da amostra tem 0,5mm de espessura) isto não foi realizado de maneira trivial. Para otimizar o tempo de cálculo a escolha adequada seria uma malha “espessa” para o quadro e para a caixa de ar que envolve a estrutura; e uma malha “fina” para a amostra e as blindagens. Porém, esta escolha muitas vezes faz com que o malhador não gere uma malha adequada e o programa de cálculo numérico não funcione. A malha utilizada para a apresentação dos resultados tem uma relação de dimensão entre 2 e 10 entre os menores e os maiores elementos, que se julgou ser adequada para a realização do cálculo.

Na Figura 4.12 é mostrada a malha gerada do quadro magnético e na Figura 4.13 um detalhe dos pólos do quadro e da amostra. A malha possui 314.504 elementos e 59.854 nós.

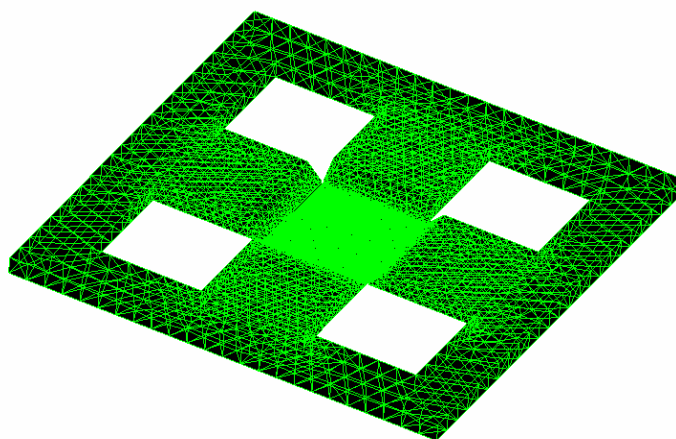


Figura 4.12 – Quadro magnético com a malha gerada.

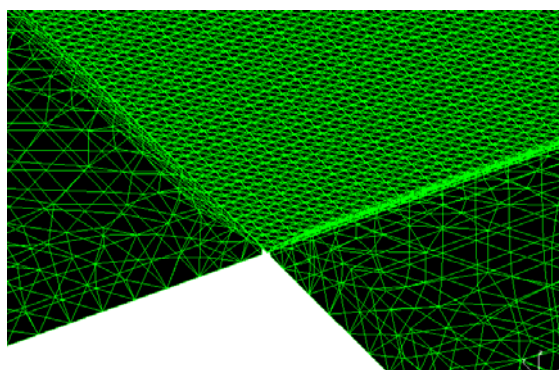


Figura 4.13 – Detalhe da malha em dois pólos do quadro e na amostra.

As bobinas dos pólos do quadro foram alimentadas com fontes de corrente.

Para tornar o tempo de cálculo menor optou-se por realizar simulações estáticas para as diferentes alturas de blindagem, obtendo-se resultados sob o enfoque mais qualitativo do problema. Após a geração da malha, foi escolhido um elemento no centro da amostra e outro elemento na posição do sensor de campo experimental. O programa numérico, depois de atingida a precisão especificada, dá como resposta as induções e os campos nestes elementos (“elemento do sensor” e “elemento da amostra”). A partir de várias simulações,

alterando a altura da blindagem e o valor da indução magnética, pôde-se construir as curvas apresentadas na Figura 4.14.

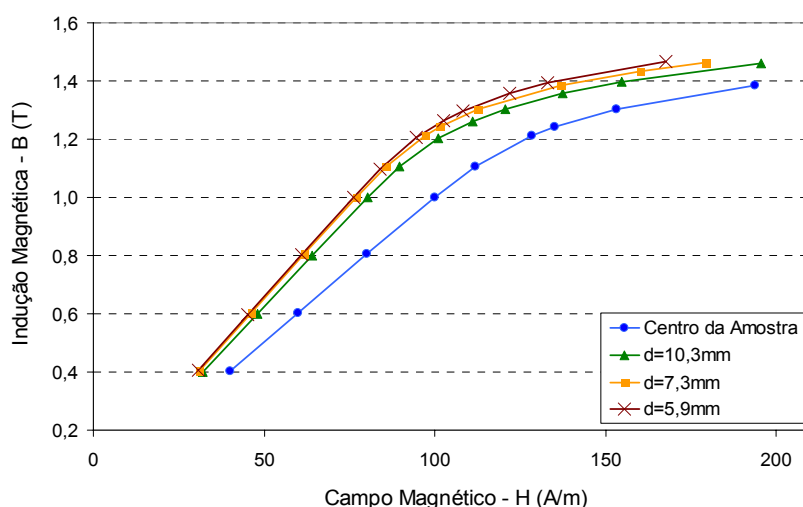


Figura 4.14 – Resultados de simulação no “elemento da amostra” e no “elemento do sensor” com variação da distância da blindagem.

De modo qualitativo, observa-se na Figura 4.14 que a distância da blindagem exerce uma influência no campo medido no “elemento do sensor”. Porém, pequenas variações na distância (menores que 2mm) não trazem diferenças significativas (relação de resultados entre as distâncias 5,9 e 7,3mm). Dado um nível de indução, o campo magnético aumenta com o acréscimo da distância entre a blindagem e a amostra. Este é o mesmo comportamento encontrado na experimentação.

Dos resultados obtidos se poderia inferir que, para o “elemento sensor” possuir a mesma curva do “elemento da amostra” seria necessário distanciar a blindagem ainda mais. Na prática verificamos que isto não corresponde a realidade já que, quando se distancia demasiadamente a blindagem, ocorre alteração no laço  $B(H)$  em função dos campos dispersos que penetram no sensor e na amostra.

### 4.3 – Ensaios em Campos Rotacionais para Variação da Distância da Blindagem

Do mesmo modo que em campos alternados, ensaios foram realizados em campos rotacionais, com induções senoidais, variando-se a distância entre a blindagem e a amostra, em 50Hz. A mesma amostra utilizada para os testes em



campos alternantes foi empregada. A amostra e os sensores de campo foram mantidos fixos no quadro magnético.

Para a medição em campos rotacionais, as duas fontes de tensão que alimentam o quadro magnético do RSST são ligadas simultaneamente, com os sinais de referências defasados de  $90^\circ$  entre si.

Para efeito ilustrativo, a Figura 4.15 mostra os loci rotacionais de B para diferentes valores de indução magnética para a distância da blindagem de 10,3mm. Nestas e nas figuras subseqüentes o índice x indica a direção longitudinal de laminação e o y a transversal.

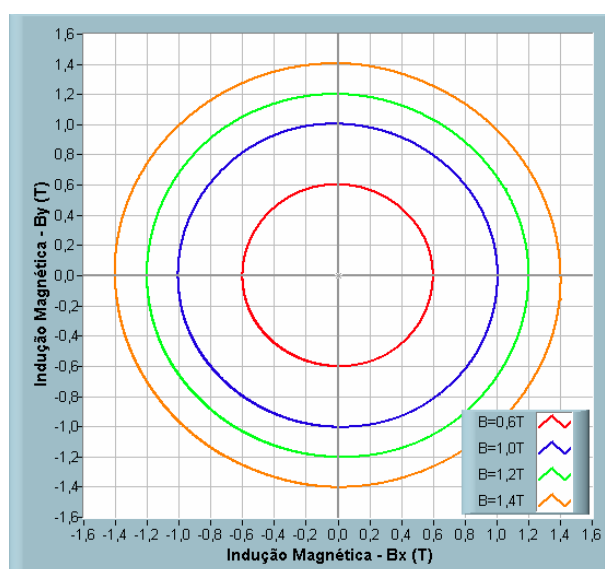


Figura 4.15 – Loci de induções magnéticas para a distância da blindagem de 10,3mm.

A evolução das perdas magnéticas em campos rotacionais em função da indução, para diferentes valores da distância da blindagem, é mostrada na Figura 4.16. As perdas magnéticas avaliadas pelo quadro de Epstein, em composição mista de lâminas com corte longitudinal e transversal, é inserida no mesmo gráfico como referência.

Da Figura 4.16, inicialmente, confirma-se que o valor das perdas em campos rotacionais é superior ao medido para campos alternados até próximo a saturação do material. Na região vizinha a este limite, como já apresentada na literatura, as perdas em campos rotacionais decrescem.

Em campos rotacionais observa-se que quanto menor a distância entre a blindagem e a amostra maiores são os valores das perdas magnéticas medidas.

Este comportamento é o oposto ao encontrado para campos simplesmente alternantes.

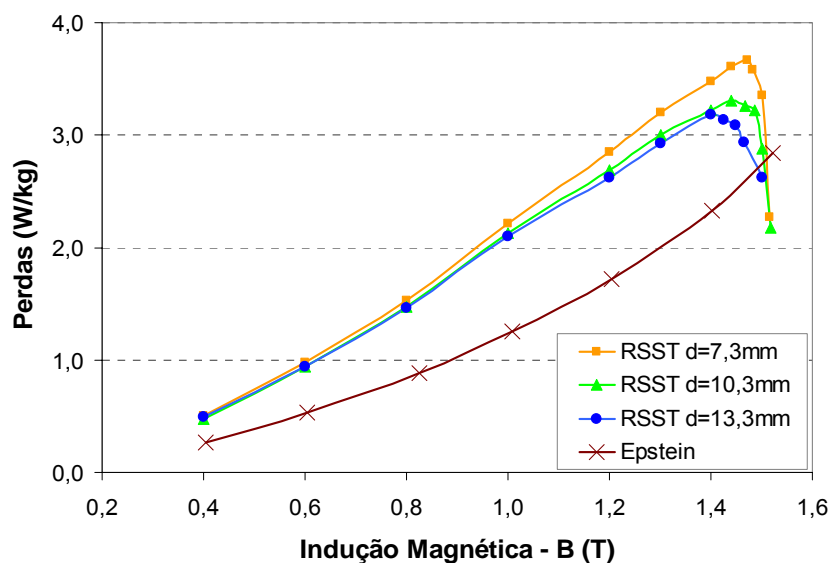


Figura 4.16 – Perdas magnéticas em função da indução, no RSST em campos rotacionais e no quadro de Epstein para campos alternados (frequência 50Hz).

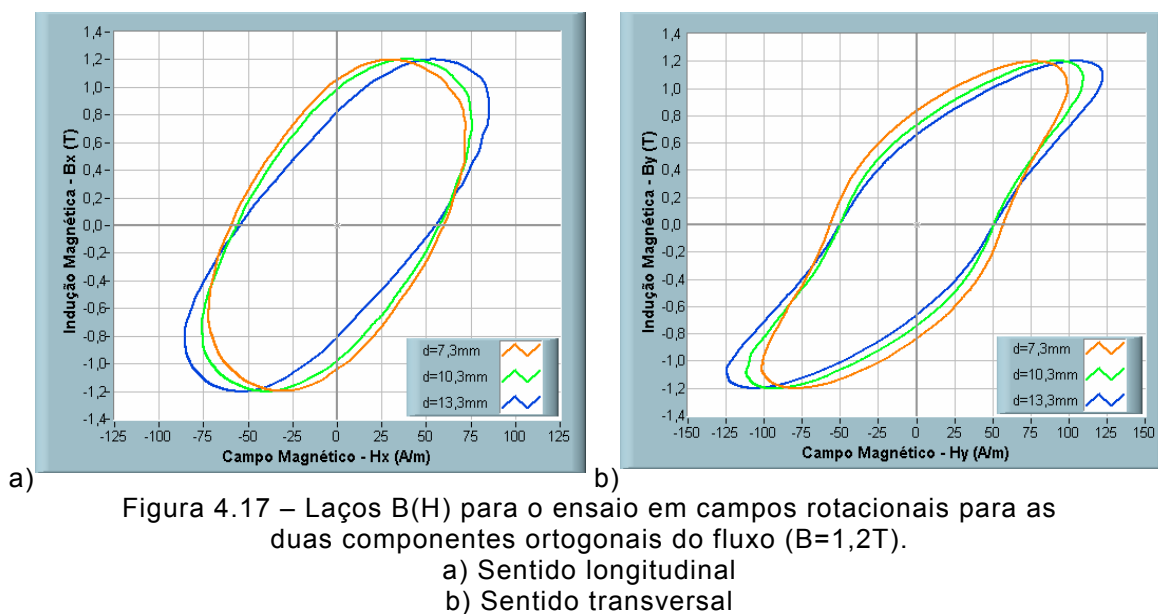


Figura 4.17 – Laços B(H) para o ensaio em campos rotacionais para as duas componentes ortogonais do fluxo ( $B=1,2T$ ).

a) Sentido longitudinal  
b) Sentido transversal

Analisando-se as componentes ortogonais individualmente dos loci B(H) (direções longitudinal e transversal) do teste em campo rotacional, pode-se verificar na Figura 4.17, tomando-se a indução  $B=1,2T$  como exemplo, que o valor do campo magnético máximo na amostra aumenta com o distanciamento da blindagem. Este comportamento é similar ao encontrado para campos alternantes. Todavia, as perdas magnéticas em campos rotacionais são

calculadas pela Equação 2.6, baseada em medições das duas componentes ortogonais e dependente da área do lócus  $B(H)$  de cada direção magnética. Observando novamente a Figura 4.17, nota-se que a área do laço fica menor na medida em que a distância da blindagem aumenta. Isto justifica os resultados obtidos na medição das perdas magnéticas em campos rotacionais.

#### 4.4 – Outros Testes com Blindagem

No início dos estudos da bancada RSST acreditava-se que a questão da blindagem estava definida no meio científico. O propósito desta lâmina era posto como exclusivamente de blindar o sensor de campo magnético e a amostra contra fluxos dispersos. Porém, os resultados apresentados nas seções anteriores mostraram que o simples distanciamento da lâmina de blindagem provoca alteração nas medições de campo magnético.

Além do exposto anteriormente, resultados de simulação da bancada RSST mostram que a parcela de fluxo magnético que circula pela blindagem é expressiva, como se verifica na Figura 4.18. A simulação foi realizada em 3D para campos alternantes considerando o efeito de histerese do material [56].

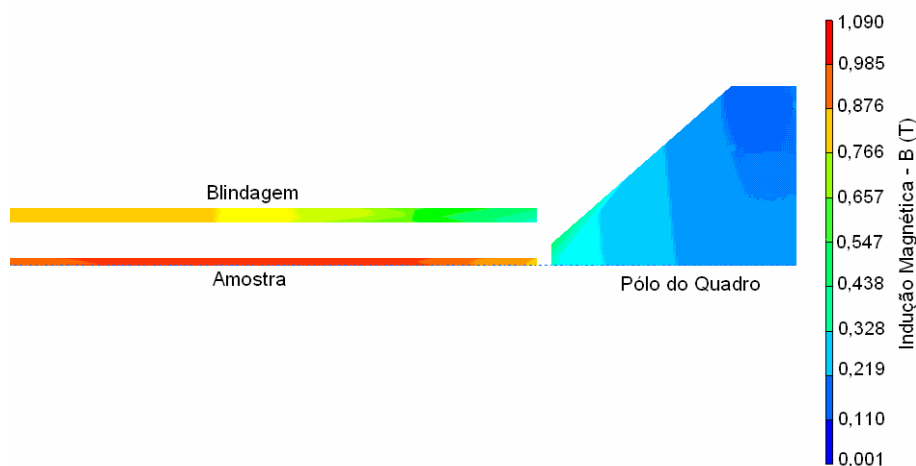


Figura 4.18 – Detalhe da distribuição da indução magnética no RSST.

Do resultado anterior se pode inferir que quando o sensor de campo magnético é inserido entre a amostra e a blindagem ele não detecta somente o campo na amostra, mas uma composição dos campos magnéticos presentes tanto na amostra quanto na própria blindagem.

Os resultados experimentais em campos alternantes apresentados na Figura 4.19 corroboram com a análise anterior. Nesta figura tem-se os laços B(H) do aço E-230, amostra de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ , para os dois sentidos de laminação em quatro teste distintos: os resultados do ensaio de Epstein e no RSST apresentados anteriormente e indicados na figura por i) Epstein e ii) RSST 1 Lâmina, respectivamente; quando a lâmina de blindagem tem seu sentido de laminação invertido em relação ao da amostra iii) RSST 1 Lâm. Invert.; e o emprego de duas lâminas de blindagem, ambas com a mesma direção de laminação da amostra iv) RSST 2 Lâminas.

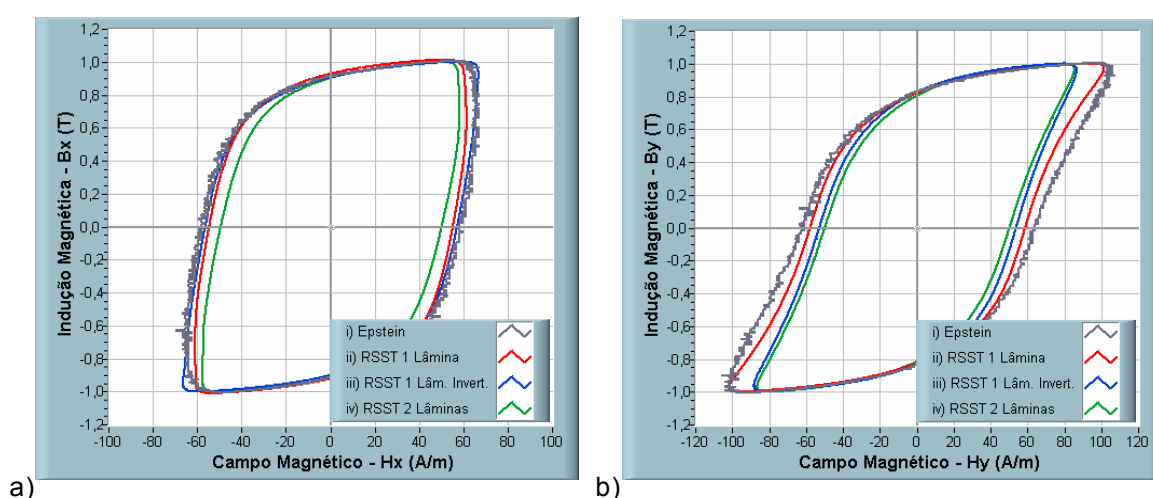


Figura 4.19 – Laços B(H) de ensaios em campos alternantes para diversas composições da blindagem (B=1T).

a) Sentido longitudinal  
b) Sentido transversal

A Figura 4.19 mostra que a medição do campo é sensível a variação da blindagem, resultando na modificação da forma dos loci. Quando a lâmina de blindagem é invertida, percebe-se que a anisotropia do material faz com que o campo medido na amostra tenha seu valor acrescido para o sentido longitudinal de laminação e decrescido para o sentido transversal, tomando-se como base a posição original da blindagem. Já quando se utiliza duas lâminas na blindagem, ambas com o mesmo sentido de laminação da amostra, o campo medido é menor para ambos os sentidos, uma vez que a relutância do circuito magnético torna-se menor em ambas as direções de laminação.

Outro teste realizado foi a alteração do valor do entreferro entre os pólos magnéticos e a amostra para avaliação do campo disperso e das perdas. Como o quadro magnético possui seus pólos fixos, utilizou-se lâminas para a amostra e

para a blindagem com dimensões de  $76 \times 76 \text{ mm}^2$ . Deste modo, o entreferro passou para 5mm (para lâmina de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  o entreferro era de 1mm). As amostras de  $76 \times 76 \text{ mm}^2$  do aço E-230 foram confeccionadas a partir do mesmo lote de fabricação das lâminas de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$ , sofrendo o mesmo tratamento térmico.

Os valores de perdas magnéticas em campos alternados para os entreferros de 1mm e 5mm podem ser observados nas figuras 4.20 e 4.21. Nestes ensaios a distância entre a blindagem e a amostra foi mantida em 10,3mm e a frequência em 50Hz. Os valores das perdas medidas no quadro de Epstein também são inseridos nas figuras como referência.

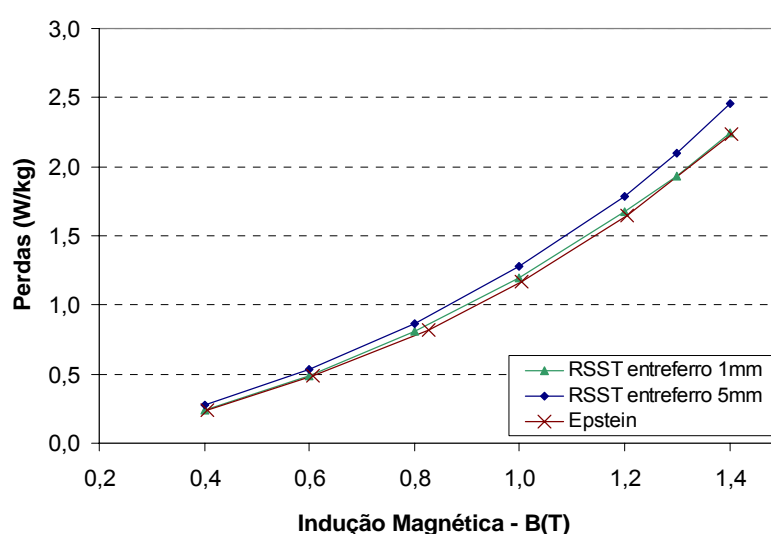


Figura 4.21 – Perdas magnéticas medidas no RSST para diferentes entreferros e no quadro de Epstein (direção longitudinal).

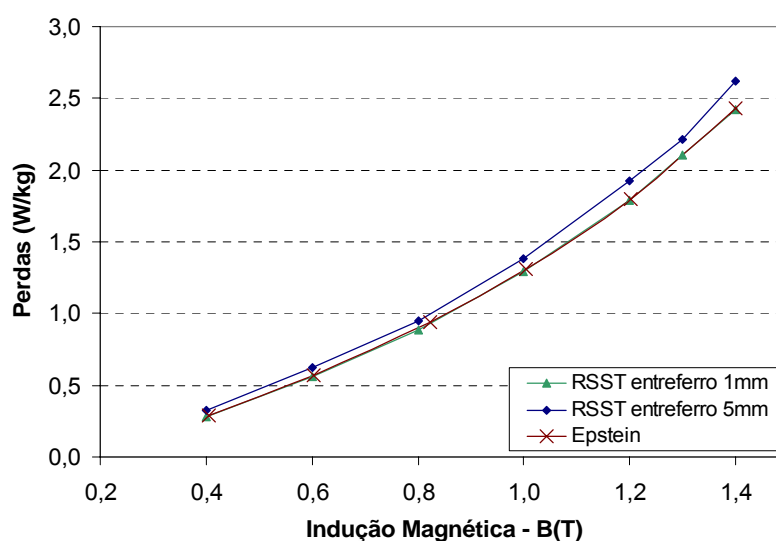


Figura 4.22 – Perdas magnéticas medidas no RSST para diferentes entreferros e no quadro de Epstein (direção transversal).

Das figuras anteriores, nota-se um acréscimo nos valores das perdas magnéticas na alteração do entreferro para 5mm. Devido ao aumento do campo disperso na amostra, este efeito ocorre tanto em campos alternantes como em campos rotacionais, como pode ser observado na Figura 4.23.

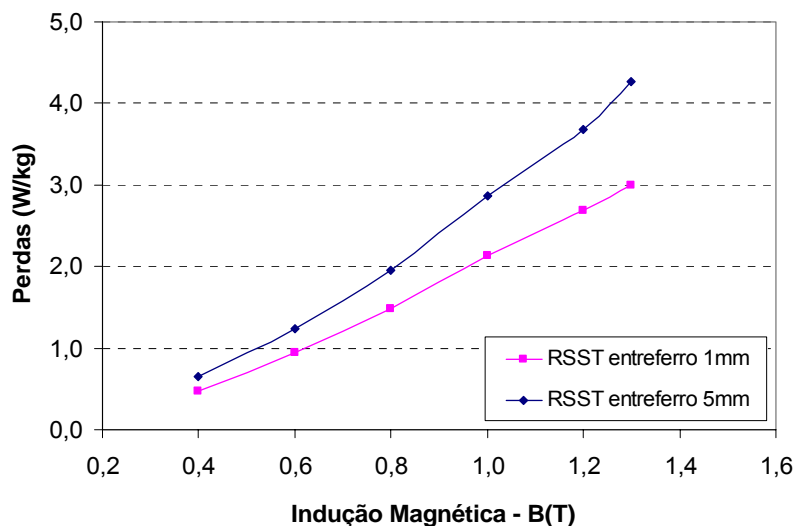


Figura 4.23 – Perdas magnéticas medidas no RSST para diferentes entreferros em campos rotacionais.

O fato de utilizar um maior valor de entreferro no ensaio pode não estar diretamente ligado com medições errôneas de perdas magnéticas. Para ter os valores equivalentes ao encontrado no quadro de Epstein em campos alternantes seriam necessários outros testes para avaliar se existiria uma distância ideal da blindagem para o novo valor do entreferro. Outra alternativa seria utilizar amostra de  $76 \times 76 \text{ mm}^2$  com lâmina de blindagem de  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  para julgar se este arranjo amenizaria o efeito dos campos dispersos. Um fato observado é que os laços B(H) e, conseqüentemente, as perdas estão menos susceptíveis a influência da variação da distância da blindagem para um entreferro maior.

O estudo da influência do entreferro foi realizado de forma incipiente. Para uma avaliação sistemática do seu efeito sobre a medição do campo seria necessário desenvolver um novo quadro magnético. Neste novo projeto a variação do entreferro se daria pelo deslocamento dos pólos magnéticos, em deslocamentos precisos e mensuráveis com exatidão. A amostra, os sensores e a blindagem permaneceriam fixas no centro do dispositivo, evitando-se possíveis erros de medições oriundos da montagem.

## 4.5 – Conclusão do Capítulo

Neste capítulo foi apresentada a influência exercida pela blindagem nas medições de campo magnético da bancada RSST. As análises foram efetuadas por meio de resultados experimentais e simulações em 3D.

O estudo aponta que existe uma distância ótima entre a blindagem e a amostra de forma que sejam obtidos resultados similares entre o RSST e o teste de Epstein para campos alternantes. O reflexo da variação da distância da blindagem também foi observado nas medições de perdas magnéticas em campos rotacionais.

Como conclusão deste capítulo se destacam os seguintes pontos:

- i) os resultados obtidos no RSST são sensíveis a variações no entreferro entre a amostra e o quadro magnético e no posicionamento da amostra;
- ii) o teste com quadro de Epstein é um importante aliado para aferição e ajuste da bancada RSST;
- iii) a blindagem não exerce um papel de simples coadjuvante no sistema, mas interfere diretamente nas medições do campo magnético e, conseqüentemente, nos resultados oriundos dos ensaios.

## 5 - Análise do Posicionamento dos Sensores de Indução Magnética

Neste capítulo é analisada a influência que o posicionamento dos sensores de indução exerce sobre as medições de perdas magnéticas. Em campos rotacionais, são realizadas simulações e ensaios para avaliar os resultados obtidos nas duas técnicas empregadas no método das bobinas sensoras: bobinas envolvendo toda a amostra e bobinas envolvendo parte da amostra.

### 5.1 – Simulação em Campos Rotacionais

Para avaliar a distribuição de fluxo magnético na amostra, principalmente na região onde se localizam os sensores de indução, foram realizadas simulações em 3D em baixas e altas induções. Para este estudo foi confeccionado um novo desenho e uma nova malha contendo uma única blindagem. A malha foi constituída de 81.962 elementos e 16.731 nós, com uma relação de dimensão entre 2 a 12 entre os menores e os maiores elementos.

Foram empregados o mesmo programa e coeficientes apresentados na Seção 4.2, porém realizando-se agora uma simulação dinâmica do sistema.

Nas figuras a seguir são apresentados resultados de simulação no momento temporal quando as fontes  $x$  e  $y$ , que alimentam as bobinas do quadro magnético, possuem o mesmo valor instantâneo. Neste ponto o fluxo magnético instantâneo na lâmina tem resultante  $45^\circ$  (instante  $\omega t = 225^\circ$  na simulação, frequência 50Hz). As figuras mostram as resoluções para as induções de 1T (região de baixa indução para o material) e 1,5T (saturação).



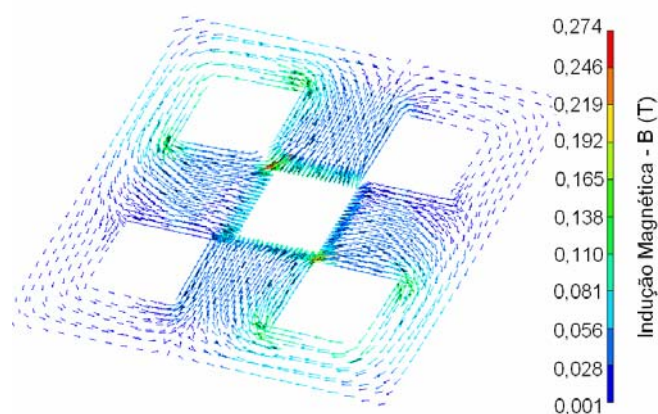


Figura 5.1 – Distribuição do fluxo magnético no quadro para indução de 1T na amostra.

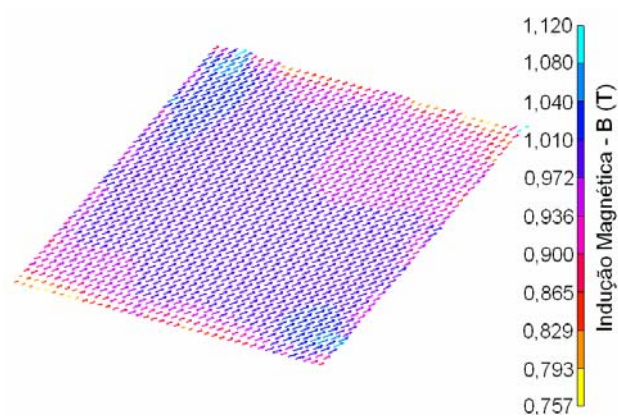


Figura 5.2 – Distribuição do fluxo magnético na amostra para indução de 1T.

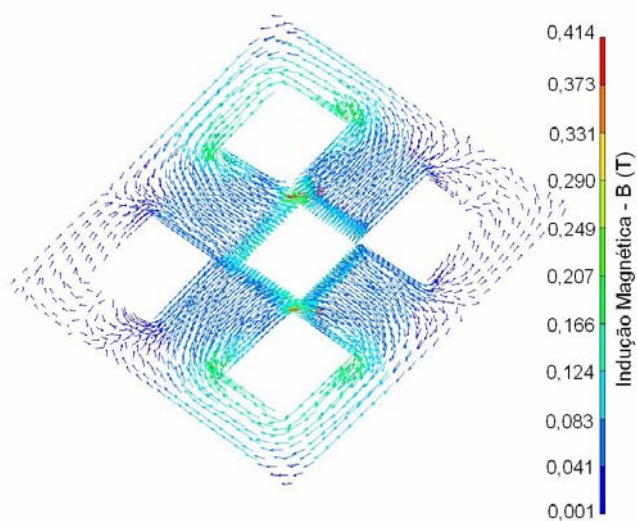


Figura 5.3 – Distribuição do fluxo magnético no quadro para indução de 1,5T na amostra.

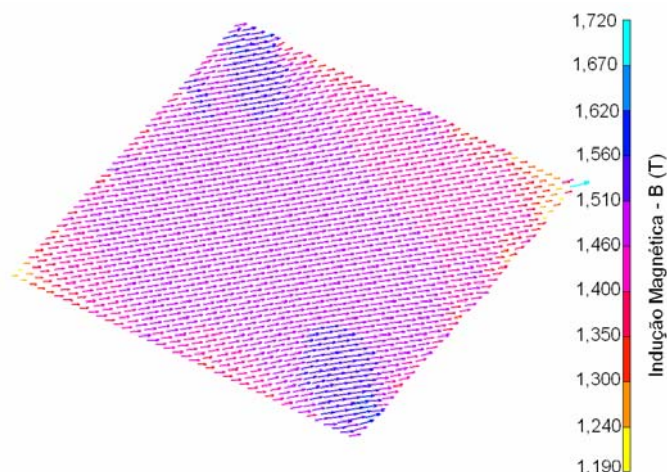


Figura 5.4 – Distribuição do fluxo magnético na amostra para indução de 1,5T.

Das figuras 5.2 e 5.4 se observa que o fluxo é homogêneo em quase toda a área da amostra, exceção feita apenas nos cantos da mesma.

Na região onde atuam os sensores de indução, tanto em baixas induções como na região de saturação do material o fluxo é uniformemente distribuído. Para destacar esta análise, a posição física dos sensores de indução que envolvem a amostra é representada pela marcação em verde da Figura 5.5 (simulação para indução de 1,5T na amostra).

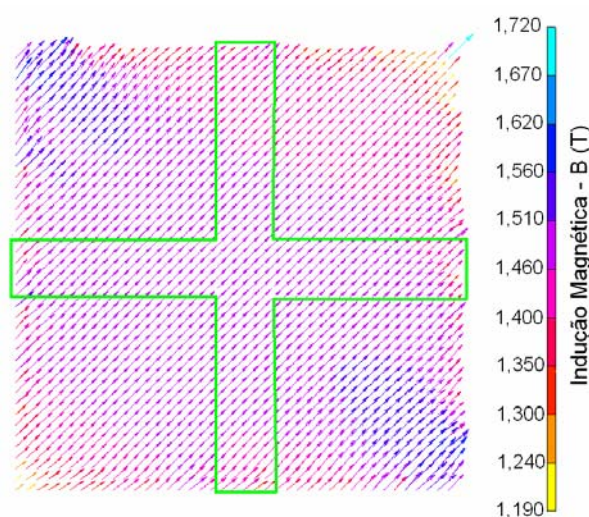


Figura 5.5 – Distribuição do fluxo magnético na amostra com destaque (em verde) da região onde atuam os sensores de indução.

A Figura 5.7 mostra resultados de simulação para evolução temporal da indução magnética nas direções  $x$  e  $y$ . Nesta simulação, para 1,5T na amostra, foram calculadas as induções em diferentes elementos da malha. Os elementos foram escolhidos ao longo do eixo  $x$ , do centro a borda da lâmina, como apresentado na Figura 5.6.

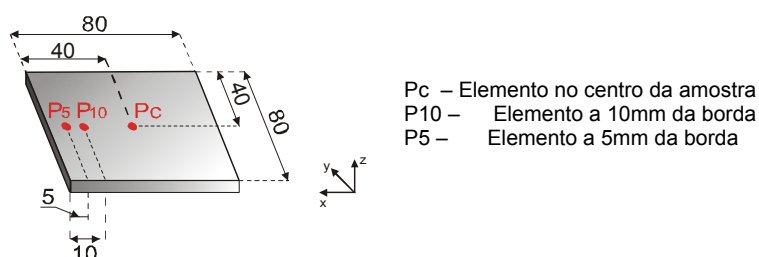


Figura 5.6 – Posicionamento dos elementos da malha para análise.  
(cotas em milímetro)

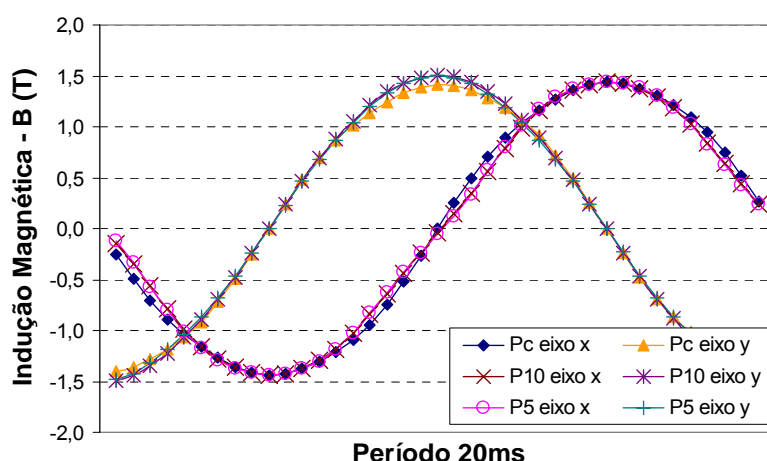


Figura 5.7 – Evolução da indução magnética em diferentes elementos da malha.

Nota-se da Figura 5.7 que a evolução da indução magnética é similar nos três elementos da malha, mesmo próximo da borda, onde o fluxo tende a ser menos homogêneo. Pode-se considerar destes resultados que a distribuição do fluxo é homogênea ao longo do segmento onde os sensores de indução atuam, tanto o do tipo que envolve toda a amostra quando aquele que envolve apenas parte dela.

## 5.2 – Resultados Experimentais em Campos Rotacionais

Os ensaios para avaliar a distribuição de fluxo magnético foram realizados empregando as bobinas sensoras envolvendo toda e parcialmente a amostra, em uma mesma lâmina de teste, realizando-se a leitura dos dados no mesmo instante, para ambas as técnicas de construção dos sensores.

A montagem dos sensores de indução e seus respectivos circuitos atenuadores ou amplificadores permite que os inversores sejam controlados tanto com os sinais oriundos dos sensores que envolvem a amostra quanto por aqueles localizados na área central da lâmina. Inicialmente, como a escolha de uma destas técnicas para realimentação do controle influencia nos resultados de medição da outra, optou-se por operar como se os inversores estivessem em malha aberta. O sinal da variável a ser controlada foi oriundo das tensões nos terminais de alimentação da bobina do quadro magnético. Deste modo o fluxo magnético teve um grau de liberdade, não sendo imposto pelo controle na região dos sensores.

A Figura 5.8 apresenta a evolução das induções nos sensores para uma indução máxima na amostra de 1T. Percebe-se que neste ponto a indução possui a mesma forma em ambas as técnicas de medição. Já a Figura 5.9 mostra os resultados das medições em 1,5T. Neste caso, como se aproxima da região de saturação do material, o fluxo na lâmina é distorcido, principalmente devido ao fato do circuito estar em malha aberta. A anisotropia intrínseca do material se torna evidente pela diferença nas formas de onda de indução entre os dois eixos de magnetização da lâmina. Todavia, a diferença entre as duas técnicas de medição da indução continua a ser muito pequena.

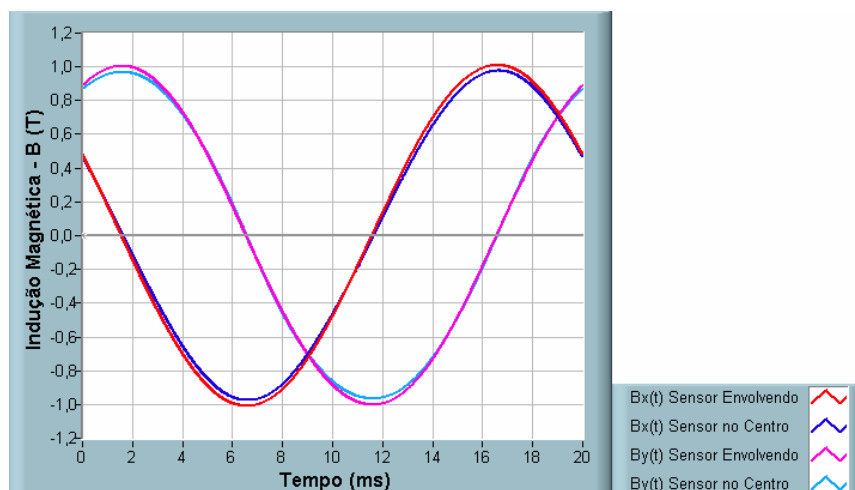


Figura 5.8 – Evolução da indução magnética nas duas técnicas de medição da indução - controle em malha aberta, 1T, 50Hz.

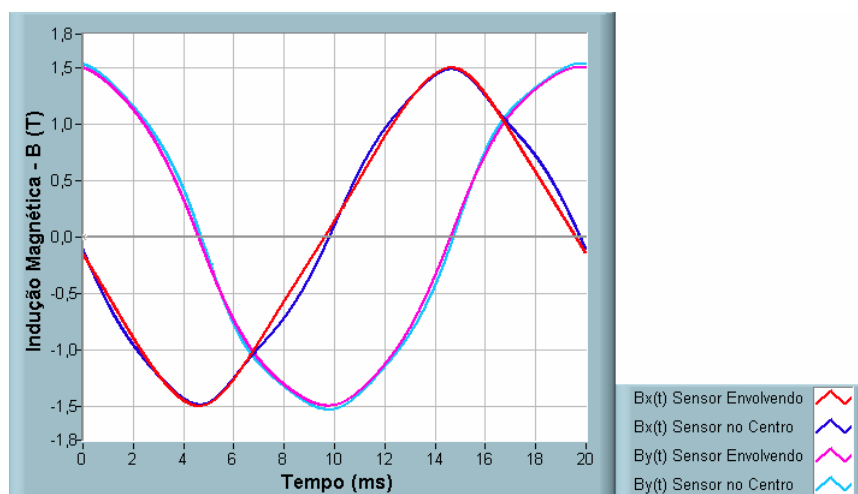


Figura 5.9 – Evolução da indução magnética nas duas técnicas de medição da indução - controle em malha aberta, 1,5T, 50Hz.

A análise dos resultados anteriores não permite inferir de forma direta qual das técnicas se adapta melhor a bancada. Porém, quando se associam as formas de onda das induções com os campos magnéticos para compor o valor das perdas na amostra em campos rotacionais, percebe-se que na região de altas induções as medições oriundas dos sensores que envolvem toda a lâmina possuem um comportamento mais de acordo com o fenômeno físico em questão. Pelas figuras 5.10 e 5.11, nota-se que as perdas estimadas pelos sensores envolvendo parte da amostra tende a um crescimento na região próxima a saturação do material, enquanto as perdas avaliadas pelos sensores envolvendo toda a lâmina possuem um comportamento típico para o fenômeno, tanto em alta quanto em baixa frequência do ensaio.

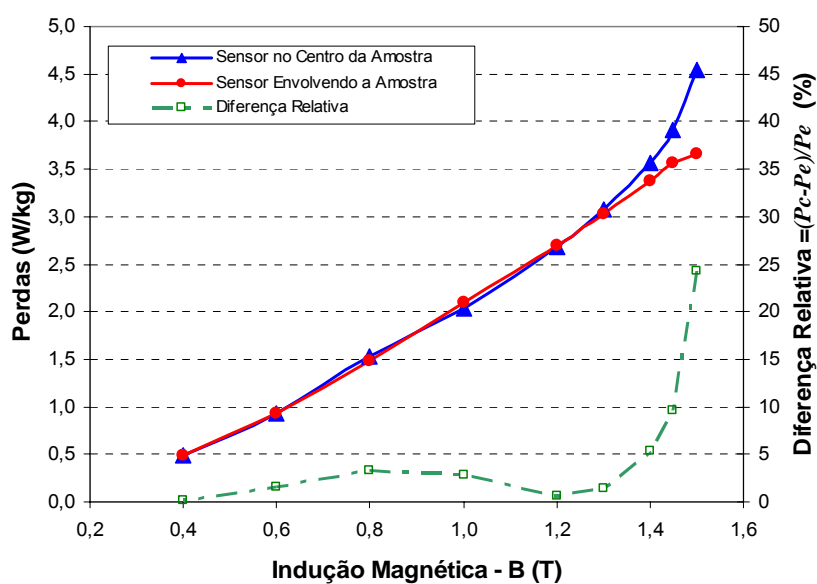


Figura 5.10 – Comparação das perdas magnéticas duas técnicas de medição da indução - controle em malha aberta, 50Hz.

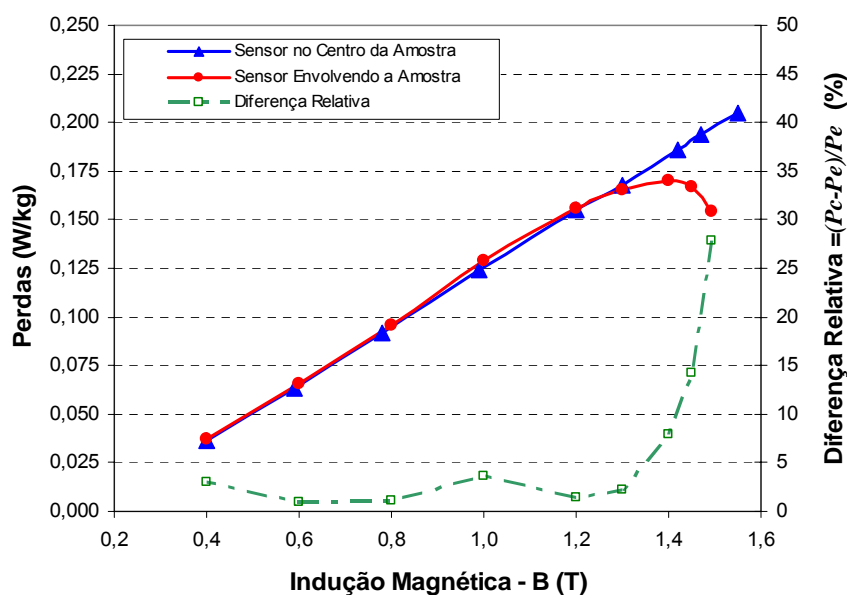


Figura 5.11 – Comparação das perdas magnéticas duas técnicas de medição da indução - controle em malha aberta, 5Hz.

As análises das diferenças relativas indicadas nas figuras 5.10 e 5.11 (onde  $P_e$  e  $P_c$  são as perdas magnéticas medidas utilizando os sensores de indução envolvendo a amostra e dispostos na região central, respectivamente) denota que as técnicas de medição da indução são equivalentes até próximo da região de saturação do material, onde os erros relativos entre as duas técnicas ficam

abaixo de 3,6%. Entretanto, na vizinhança da saturação os resultados são divergentes.

O estudo das perdas magnéticas em campos rotacionais, utilizando-se as duas técnicas de medição de indução, também foi realizado com o circuito operando em malha fechada. A Figura 5.12 apresenta os resultados destes experimentos, onde o controle pôde receber os sinais de realimentação originários dos sensores posicionados no centro e envolvendo a amostra.

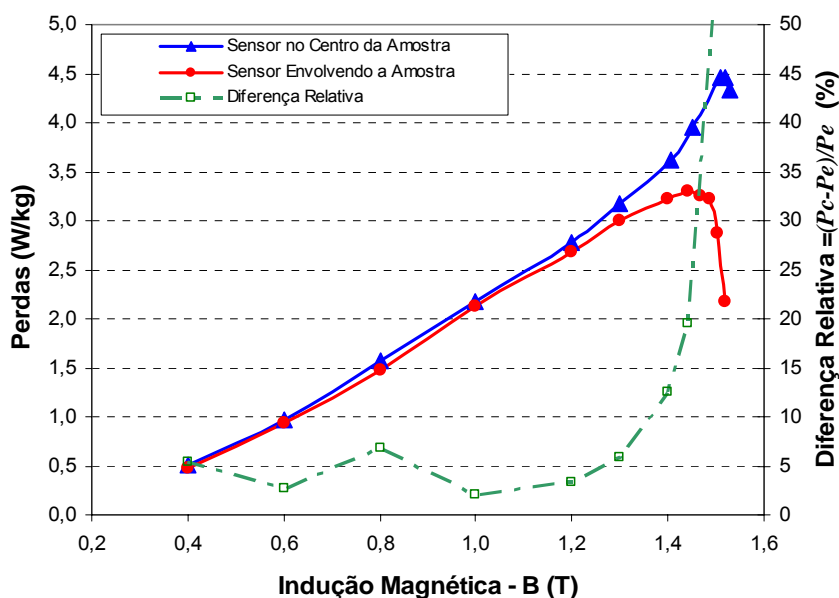


Figura 5.12 – Comparação das perdas magnéticas duas técnicas de medição da indução - controle em malha fechada, 50Hz.

A análise comparativa das perdas magnéticas em malha fechada é similar ao encontrado em malha aberta. Os valores de perdas nas duas técnicas de medição de indução são equivalentes para baixas induções e diferem significativamente próximo à saturação. Mesmo sendo empregado controle em malha fechada nos dois ensaios, para a malha de controle, percebe-se que é muito mais difícil manter a forma de onda da indução quando o sinal para a realimentação vem dos sensores posicionados no centro da amostra.

### 5.3 – Conclusões do Capítulo

As simulações e ensaios apresentados neste capítulo demonstram que as técnicas de medição de indução magnética envolvendo parte ou toda a amostra em teste apresentam resultados aparentemente similares, podendo ambas serem utilizadas na bancada RSST até um certo grau de saturação do material. Os valores de medições de perdas magnéticas em campo rotacional indicam que o método das bobinas sensoras envolvendo toda a amostra apresenta resultados mais precisos em altas induções.

Devido à complexidade que envolve o assunto e a correspondente dificuldade para o desenvolvimento de ferramentas de investigação, buscou-se neste capítulo mostrar o desempenho do sistema frente às possibilidades de implementação dos sensores de indução. No Capítulo 6 esta análise tem continuidade com a avaliação da taxa de distorção harmônica total nas tensões nos sensores de indução magnética.



## 6 - Análise do Método de Controle da Indução Magnética na Amostra

Em campo alternante as perdas magnéticas dependem do conteúdo harmônico da forma de onda da indução. Para avaliar este efeito em campos rotacionais, neste capítulo é realizada uma análise dos resultados experimentais com o controle da bancada RSST operando em malha aberta e em malha fechada.

### 6.1 – Medições de Perdas Magnéticas em Campos Rotacionais

Uma maneira de determinar o nível de deformação de um sinal é calcular sua taxa de distorção harmônica total (*Total Harmonic Distortion* – THD do original em inglês), definida por uma relação entre o valor eficaz das componentes harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental de um sinal. Quanto menor for o valor da distorção harmônica total, mais próximo estará o sinal de uma forma senoidal. O valor da THD é determinado pela Equação 6.1, onde  $V_{ef_n}$  representa o valor eficaz da harmônica correspondente e  $V_{ef_1}$  o valor eficaz da componente fundamental do sinal.

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_{ef_n}^2}}{V_{ef_1}} \quad (6.1)$$

Tradicionalmente, os trabalhos na literatura mostram resultados de distorção harmônica da indução magnética, quando estes são avaliados. Todavia, como apresentado na Seção 2.5.1, a indução magnética é determinada por meio da integração do sinal da tensão induzida nos sensores. A operação matemática de integração do sinal de tensão é um filtro natural para o resultado da indução. Portanto, se forem avaliados simplesmente os valores de THD na indução magnética ter-se-á os resultados mascarados pelo “filtro”, perdendo-se o real comportamento da variável magnética. Como exemplo, as figuras 6.1 e 6.2 mostram resultados experimentais das tensões nos sensores de indução e a indução magnética para os dois eixos de magnetização de uma amostra,

respectivamente. A THD de cada forma de onda é indicada nas legendas. O lócus de induções é mostrado na Figura 6.3, onde se acrescenta um sinal senoidal puro como referência (círculo perfeito) para facilitar a observação do efeito da distorção nas formas das induções magnéticas.

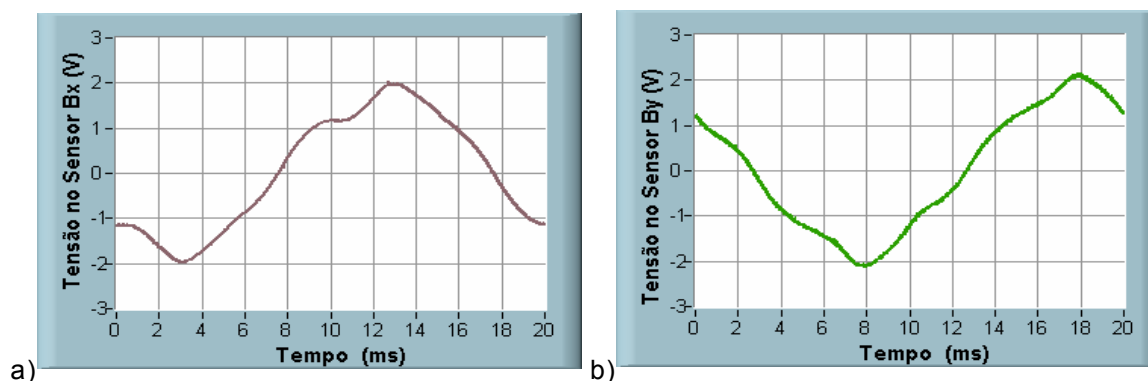


Figura 6.1 – Tensões induzidas nos sensores de indução magnética.

a) Sentido longitudinal, THD=11,83%.

b) Sentido transversal, THD=9,44%.

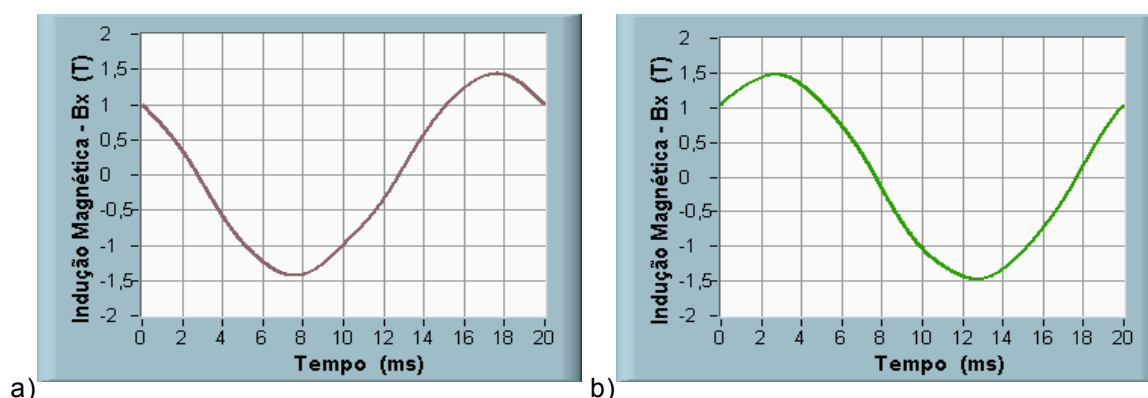


Figura 6.2 – Resultado dos cálculos das induções magnéticas.

a) Sentido longitudinal, THD=2,15%.

b) Sentido transversal, THD=1,83%.

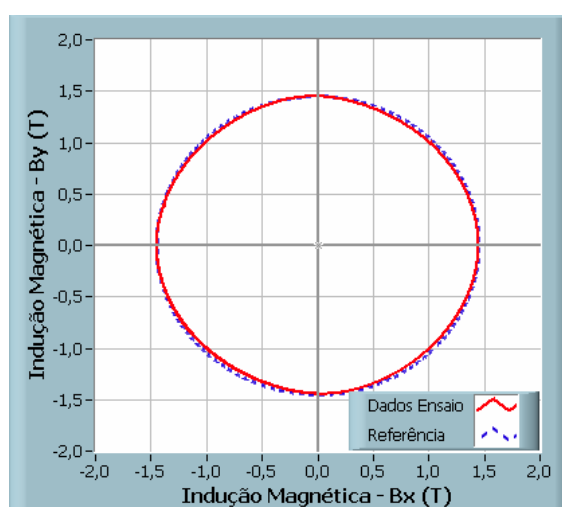


Figura 6.3 – Lócus de induções magnéticas referentes à Figura 6.2.

Observando a Figura 6.1 se percebe graficamente a distorção do sinal nas tensões induzidas nos sensores. Os altos valores da THD para ambos os eixos de magnetização nesta figura complementam a informação que os sinais estão deformados. Por outro lado, como explanado anteriormente, se forem observados apenas os sinais das induções magnéticas (Figura 6.2), tem-se a sensação que o sinal é de boa qualidade.

O lócus apresentado na Figura 6.3 é uma maneira auxiliar para identificar visualmente as distorções nos sinais das induções magnéticas. Se as induções nos eixos tiverem a forma senoidal pura, com defasagem de  $90^\circ$  entre si, o lócus de induções será uma forma circular perfeita.

Em todos os experimentos apresentados neste trabalho se adotou a metodologia de analisar os resultados dos cálculos de THD nas formas de onda das tensões nos sensores de indução. Esta análise teve o objetivo de ajustar as formas de onda das tensões nos sensores de indução, o mais próximo possível de uma onda senoidal, antes de gravar os dados da aquisição. Para o cálculo da THD foi empregado um aplicativo no Instrumento Virtual do programa LabVIEW [54].

Para analisar o efeito da distorção harmônica nas medições de perdas magnéticas em uma amostra sujeita a campos rotacionais foram realizados dois ensaios em 50Hz: com o controle dos inversores funcionando em malha aberta (sem realimentação) e em malha fechada (com realimentação através dos sensores de indução envolvendo a amostra). Os resultados destes experimentos são mostrados na Figura 6.4, da qual observa-se que os valores das perdas se mantêm próximos para os dois métodos de controle, até a região de saturação. Acima de 1,4T as perdas se tornam maiores para o controle em malha aberta. Isto se deve ao maior conteúdo harmônico no sinal de indução na lâmina, apresentando o mesmo comportamento do caso de induções alternantes com harmônicos.

Para os ensaios referentes à Figura 6.4, os valores da THD da tensão nos sensores de indução magnética, em função do nível de indução na amostra, são apresentados na Tabela 6.1, para os dois eixos de magnetização. Pode-se notar nesta tabela que próximo ao valor da saturação do material a taxa de distorção harmônica aumenta para ambos os ensaios. Este efeito fica mais evidente quando o circuito opera em malha aberta devido ao fraco acoplamento existente entre os terminais do quadro magnético e a lâmina em teste. Nesta situação a

fonte não consegue transferir para a carga níveis suficientes de energia nos pontos de saturação e, na desmagnetização, retirar a energia armazenada no quadro, fazendo com que a tensão induzida no sensor (e conseqüentemente na forma de onda da indução magnética na lâmina) seja cada vez mais distorcida na medida em que se aproxima da saturação do material.

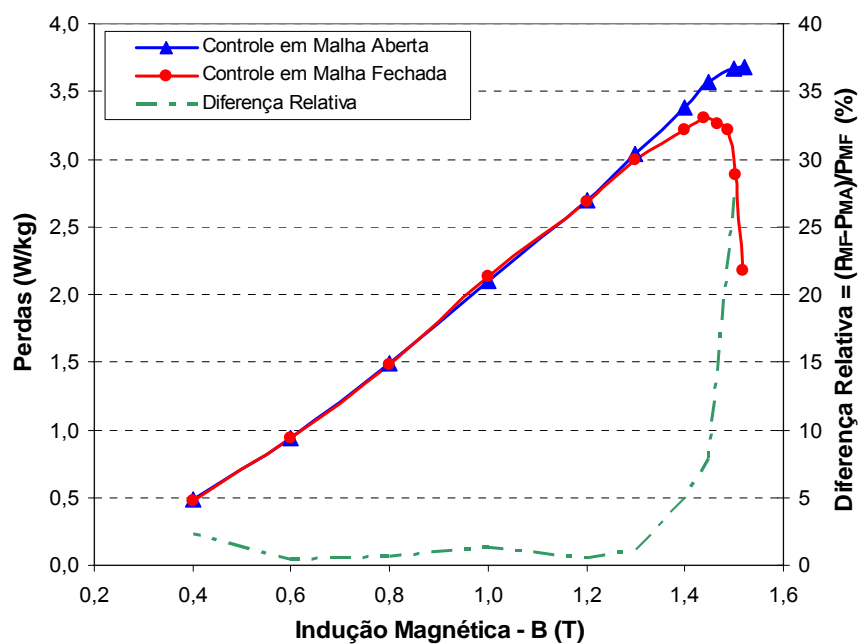


Figura 6.4 – Comparação das perdas magnéticas medidas com o controle dos inversores funcionando em malha aberta e em malha fechada, 50Hz.

Tabela 6.1 – THD para os dois eixos de magnetização em função da indução e do tipo de controle.

B(T)	THD(%)			
	Controle em Malha Aberta		Controle em Malha Fechada	
	Longitudinal	Transversal	Longitudinal	Transversal
1,52	26,40	19,77	13,50	16,16
1,50	20,91	14,42	9,48	11,30
1,45	6,95	5,42	3,01	2,97
1,40	3,67	3,84	1,79	2,10
1,30	2,47	2,93	1,27	1,17
1,20	1,87	2,59	0,85	0,95
1,00	1,60	2,18	0,91	0,89
0,80	0,99	2,08	0,97	0,85
0,60	0,91	1,69	0,81	0,61
0,40	0,90	1,14	0,50	0,57

## 6.2 – Trajetórias dos Campos Magnéticos Rotacionais

O item anterior tratou da análise das perdas magnéticas, porém, um outro aspecto importante na análise de materiais é a permeabilidade magnética. O comportamento da permeabilidade é descrito por meio das trajetórias de campo magnético, já que a trajetória da indução é imposta pelo sistema. Neste contexto, um fato constatado é que, mesmo tendo valores de perdas semelhantes na faixa de indução abaixo da saturação, o comportamento do campo magnético é significativamente influenciado pelo conteúdo harmônico no sinal de indução. Este efeito pode ser observado na Figura 6.5, na qual estão traçados os campos magnéticos rotacionais para alguns valores de indução nos dois métodos de controle. Se forem avaliados somente os loci de induções este efeito não fica evidenciado, como pode ser observado na Figura 6.6.

Na Figura 6.6, destaca-se ainda que no ponto de 1,5T o nível de distorção harmônica nos sinais de tensão nos sensores de indução faz com que os loci não sejam circulares, tanto com o controle operando em malha fechada quanto em malha aberta, apesar do conteúdo harmônico dos sinais originados do controle em malha fechada ser menor.

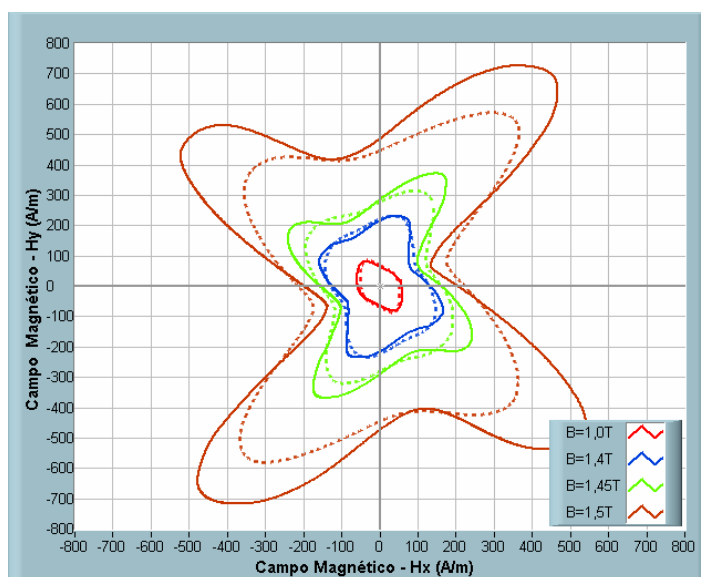


Figura 6.5 – Conjunto de trajetórias de campos magnéticos para vários valores de induções (linha contínua controle em malha fechada, linha tracejada controle em malha aberta).

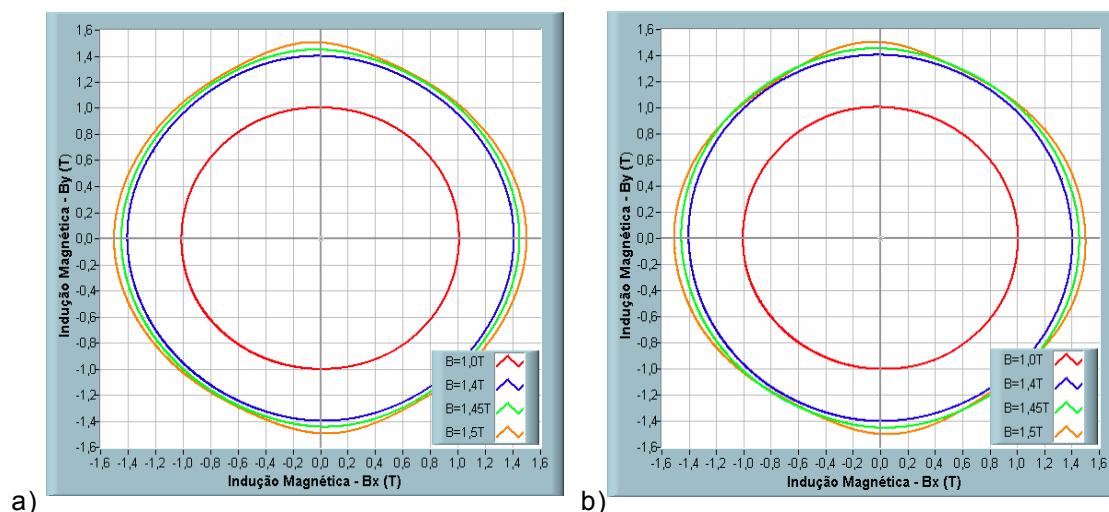


Figura 6.6 – Loci de induções magnéticas para:  
a) controle em malha aberta  
b) controle em malha fechada

Um dos propósitos para a realização dos ensaios de caracterização de materiais é levantar dados experimentais para identificar e determinar parâmetros de modelos matemáticos para aplicação numérica. Alguns modelos necessitam de laços  $B(H)$  em diferentes frequências e induções para poderem ser desenvolvidos [56]. Por isto o comportamento das grandezas magnéticas no material deve ser descrito com exatidão pelos dados experimentais.

Na Figura 6.7 são traçados os laços  $B(H)$  para os dois eixos de orientação magnética. Os gráficos são um caso particular da Figura 6.5 para a indução de 1,4T. Percebe-se nestes gráficos que os loci têm forma diferenciada para os dois métodos de controle empregados, ficando evidenciada a importância do controle para a precisão dos dados experimentais.

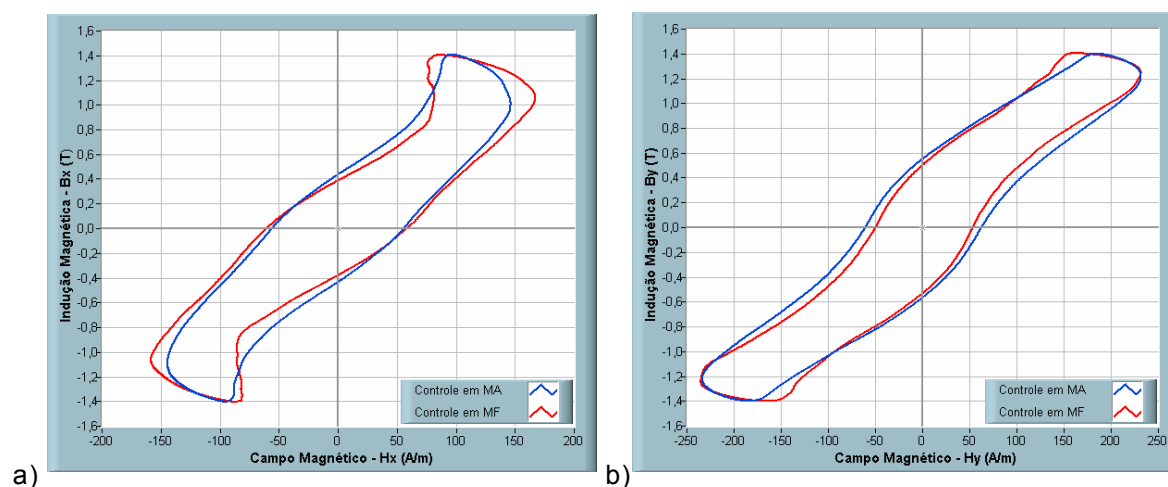


Figura 6.7 – Laços  $B(H)$  de ensaios em campos rotacionais para o controle operando em malha aberta (MA) e em malha fechada (MF).

a) Sentido longitudinal  
b) Sentido transversal

## 6.3 – Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados resultados experimentais onde se avaliou o efeito do controle da forma de onda da indução magnética na amostra.

Como conclusão deste capítulo se destacam os seguintes pontos:

*i)* em baixas induções, quando a THD das tensões nos sensores de indução ficam abaixo de 3%, as perdas magnéticas medidas com o controle dos inversores operando em malha fechada e em malha aberta são próximas;

*ii)* na região próxima à saturação do material as potências avaliadas pelos dois métodos de controle são divergentes e, como ocorre em campos alternados, um acréscimo na taxa de distorção harmônica no sinal da indução aumenta as perdas magnéticas no material;

*iii)* a análise das trajetórias do campo magnético no material realçou a importância da utilização de uma malha de controle adequada. Principalmente no que diz respeito a utilização dos dados experimentais em modelos matemáticos.

## **7 – Resultados Experimentais para Análise de Desempenho da Bancada RSST**

Neste capítulo são apresentados diversos resultados que ressaltam as características e as potencialidades da bancada desenvolvida. Os ensaios são para o aço E-230, amostra de 0,5mm de espessura, dimensões 80x80mm<sup>2</sup>, blindagem 10,3mm de distância, medição da indução por sensores envolvendo a lâmina e controle dos inversores operando em malha fechada.

### **7.1 – Resultados Experimentais em Campos Rotacionais para Sinais Senoidais**

Na Seção 3.12 foi exibida uma parte do Instrumento Virtual desenvolvido, da qual constavam os campos de controle do usuário e os resultados dos cálculos das grandezas magnéticas. A título de ilustração, é apresentada a seguir a saída gráfica do VI para um ensaio com induções senoidais na frequência de 50Hz. As figuras 7.1 e 7.2 mostram o conjunto de sinais adquiridos provenientes dos sensores de indução e campo magnético e, na sequência, os resultados dos cálculos das grandezas magnéticas para as induções de 1T e 1,3T, respectivamente.

Os gráficos da Figura 7.1 associados com a Figura 3.7, referenciada no Capítulo 3, representam a tela do VI implementado. Os sinais adquiridos e os resultados dos cálculos são mostrados de maneira instantânea. O usuário pode interagir imediatamente com todos os valores lidos e calculados do ensaio.

Para mostrar com fidelidade todo o comportamento das variáveis magnéticas medidas se buscou tratar os sinais sem nenhuma técnica de filtragem. Isto foi possível para o caso das tensões oriundas dos sensores de campo magnético. Contudo, para os sensores de indução, como estes fazem parte do circuito de controle dos inversores, foi necessário acrescentar um capacitor de desacoplamento na saída do sinal dos sensores. A função deste capacitor é retirar as componentes de alta frequência (ruídos) geradas pela comutação dos inversores. Este capacitor de desacoplamento não altera a informação do sinal original.



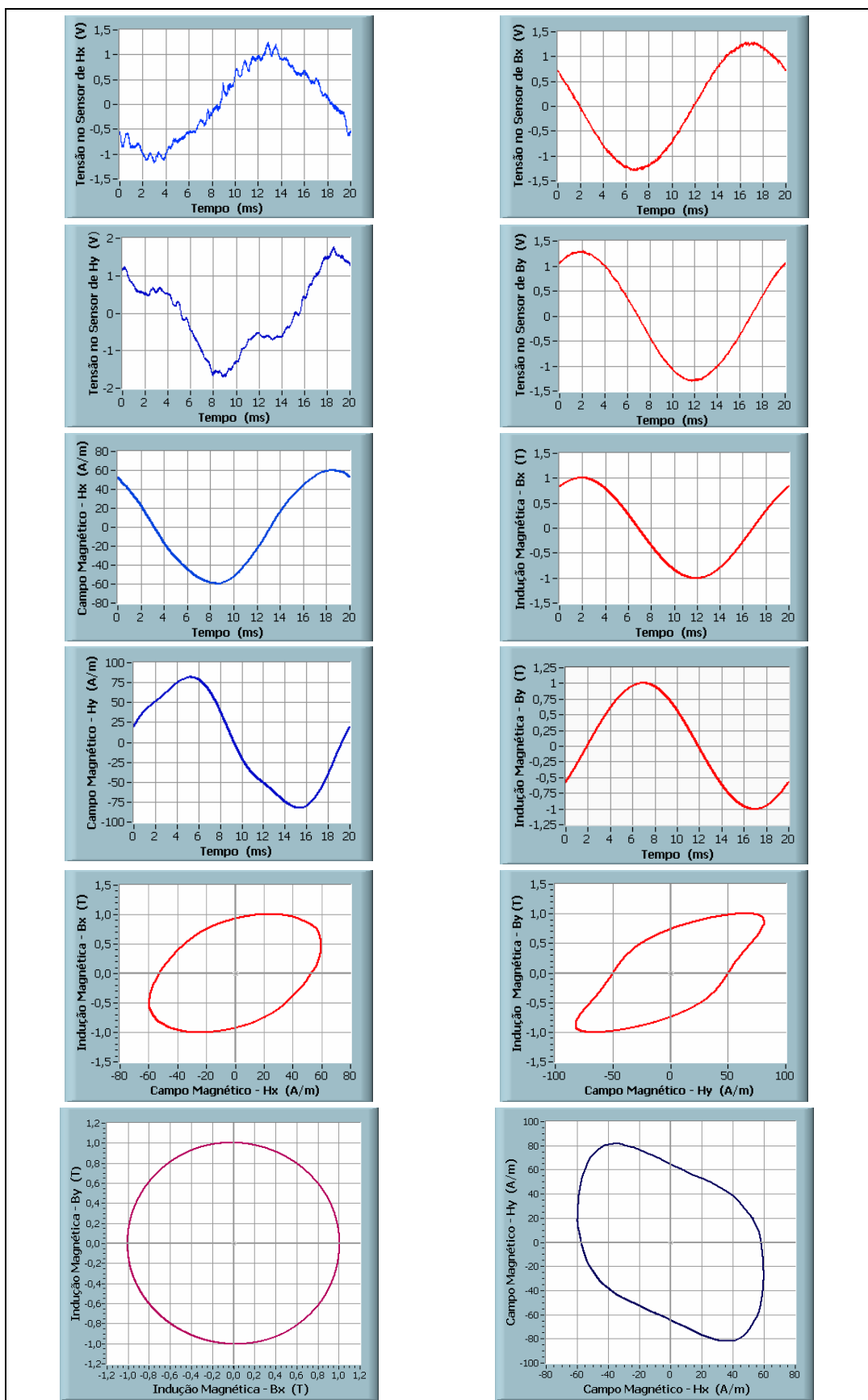


Figura 7.1 – Conjunto de sinais e resultados para o RSST no ponto de operação 1,0T e 50Hz (x – sentido longitudinal, y – sentido transversal).

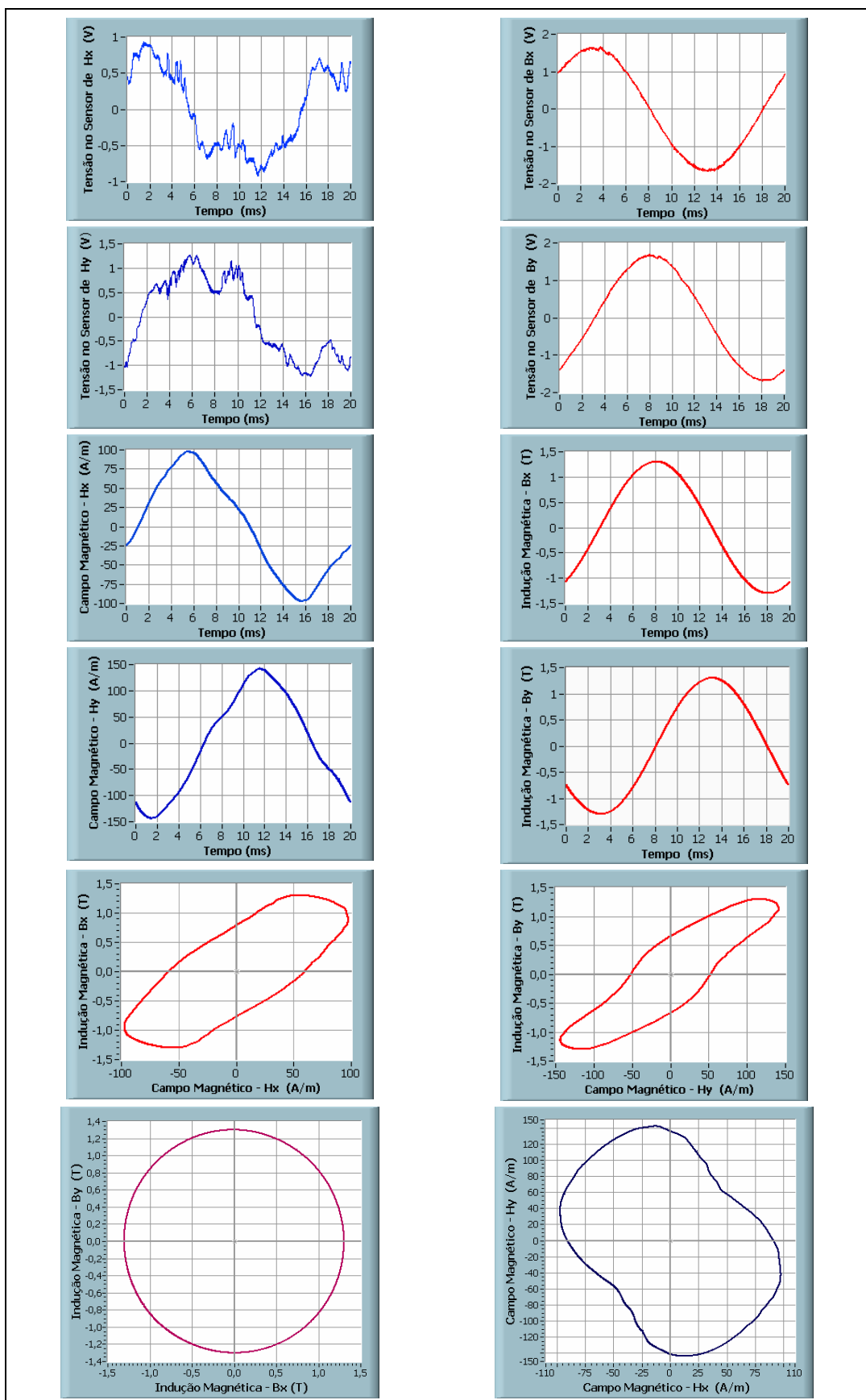


Figura 7.2 – Conjunto de sinais e resultados para o RSST no ponto de operação 1,3T e 50Hz (x – sentido longitudinal, y – sentido transversal).

Um ensaio necessário para obtenção dos parâmetros de caracterização de materiais, sujeitos a campos rotacionais, consiste na análise de perdas magnéticas em função da frequência. Deste ensaio, a Figura 7.3 apresenta resultados da evolução das perdas para um valor de indução constante de 1,0T. Na figura pode-se comparar ainda o comportamento das perdas magnéticas em campo rotacional com o ensaio em campo alternante. Para a medição das perdas em campo alternante foi utilizado o quadro de Epstein com amostras contendo 50% de lâminas estampadas no sentido longitudinal e 50% no sentido transversal de laminação.

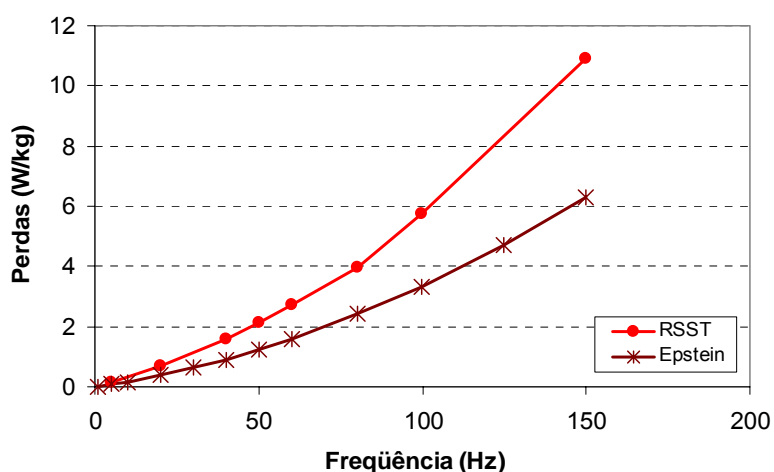
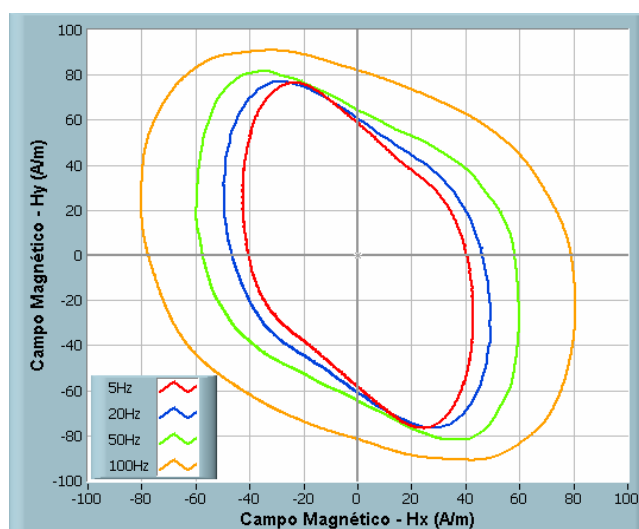
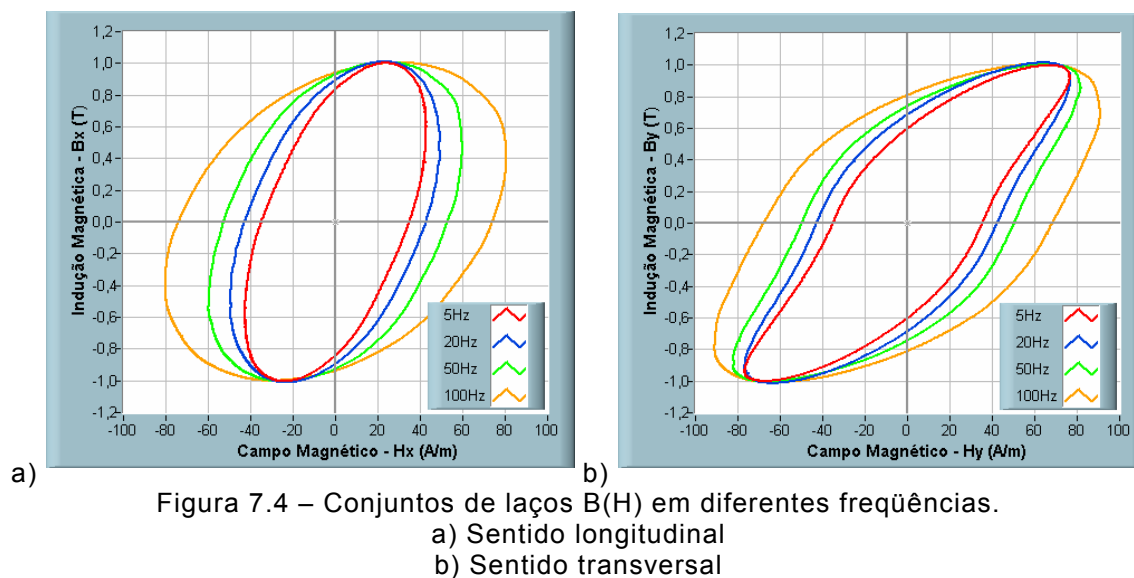


Figura 7.3 – Perdas no RSST para campos rotacionais e no quadro de Epstein para campo alternante em função da frequência ( $B=1T$ ).

Os valores experimentais da Figura 7.3 mostram que a relação média entre as perdas rotacionais e as perdas alternantes é de 1,74 para o material ensaiado.

Os laços  $B(H)$  do material, para diferentes frequências de indução, são traçados na Figura 7.4. Semelhante ao efeito descrito para campos alternantes, em campos rotacionais o laço  $B(H)$  tem sua área acrescida com o aumento da frequência. Este comportamento também pode ser avaliado na Figura 7.5, pelo desenho das trajetórias dos campos magnéticos. As medições destes gráficos foram realizadas com induções magnéticas constantes e igual a 1T.



A evolução das perdas magnéticas em campos rotacionais em função da indução e para diferentes valores de frequência, pode ser avaliada nas figuras 7.6 e 7.7. Através destas figuras se observa que as perdas têm o mesmo comportamento, independente da frequência do ensaio.

Nos ensaios com variação de frequência a THD da tensão nos sensores de indução ficou abaixo de 2,12% para induções até 1,4T. De 1,45T a 1,52T a distorção harmônica dos sinais ficou na faixa de 2,20% a 16,16%.

Uma das propriedades do ensaio em campos rotacionais é a possibilidade de definir o ponto de saturação do material pela curva de perdas magnéticas. As

figuras 7.6 e 7.7 mostram este ponto, onde ocorre uma queda acentuada no valor das perdas quando o valor de indução se aproxima de 1,5T.

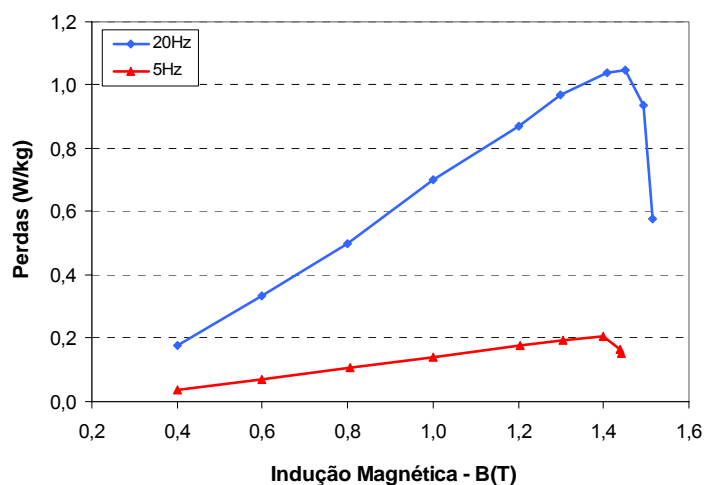


Figura 7.6 – Evolução das perdas magnéticas rotacionais em função da indução nas frequências de 5Hz e 20Hz.

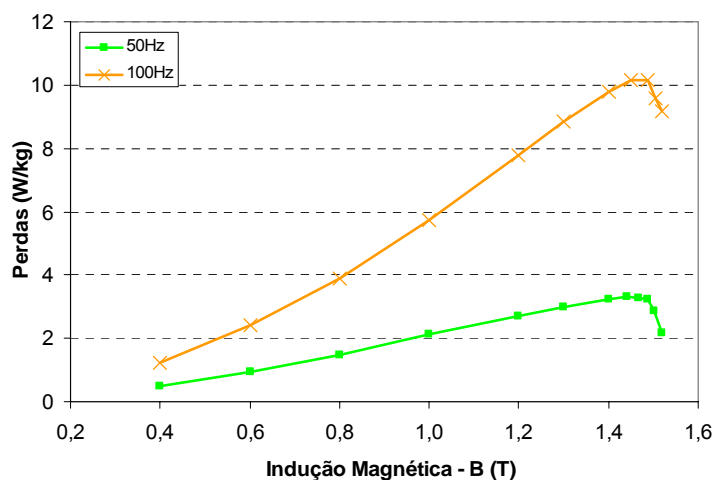


Figura 7.7 – Evolução das perdas magnéticas rotacionais em função da indução nas frequências de 50Hz e 100Hz.

Por possuir dois inversores completamente independentes um do outro, a bancada implementada tem como característica a possibilidade de controlar o ângulo e a amplitude das tensões que alimentam os pólos do quadro magnético. Este atributo permite ampliar a análise do material testado sob outras condições de magnetização. Exemplos de alguns casos na frequência de 50Hz podem ser observados a seguir.

As figuras 7.8 e 7.9 apresentam resultados experimentais dos loci rotacionais de indução e campo magnético, respectivamente, para as seguintes defasagens entre as fontes de alimentação:  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $20^\circ$ .

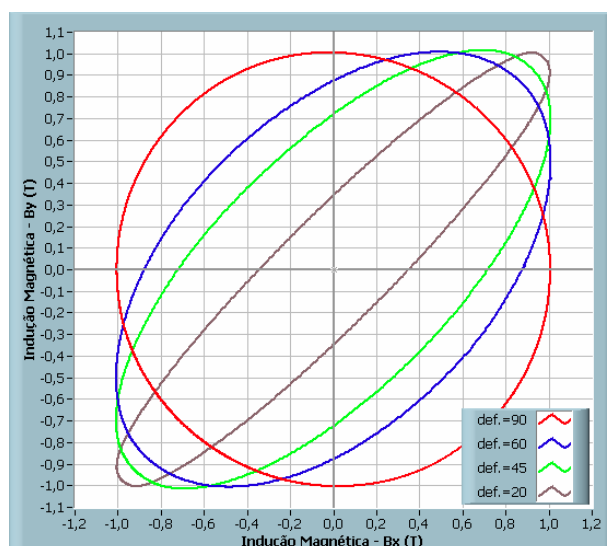


Figura 7.8 – Conjunto de loci de induções em diferentes ângulos de defasagem das fontes de alimentação.

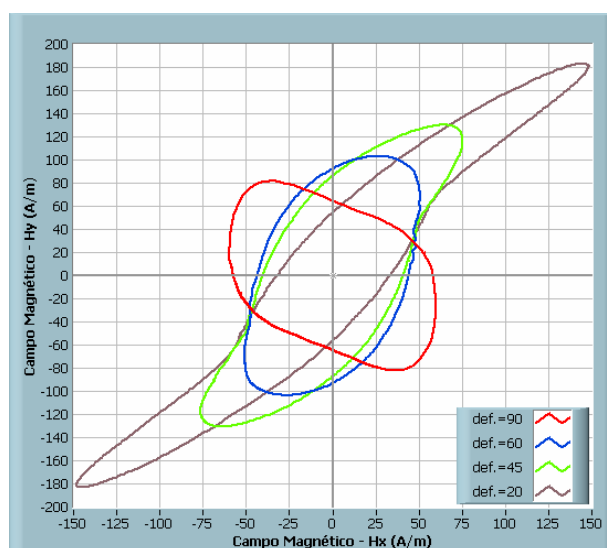


Figura 7.9 – Conjunto de trajetórias de campos em diferentes ângulos de defasagem das fontes de alimentação.

Nas figuras 7.10 e 7.11 são traçados loci rotacionais de indução e campo magnético em experimentos onde as amplitudes das fontes de alimentação não

são simétricas. Mostra-se o caso onde a fonte de tensão do eixo x do quadro magnético tem a mesma amplitude da fonte y, fonte y com metade da amplitude de x e fonte y com um quarto da amplitude de x.

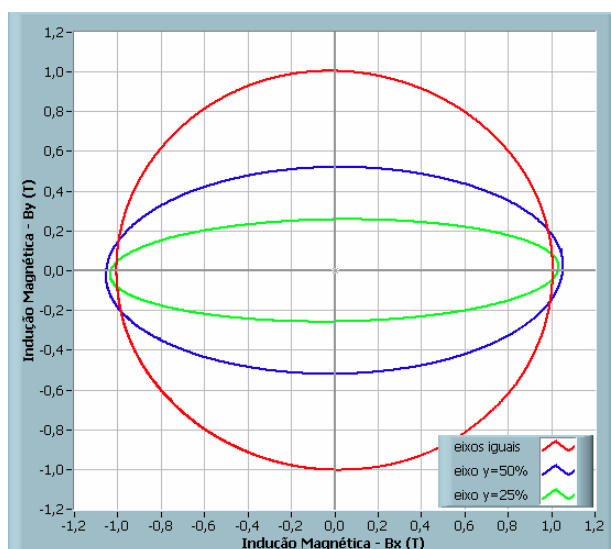


Figura 7.10 – Conjunto de loci de induções para variações de amplitude das fontes de alimentação.

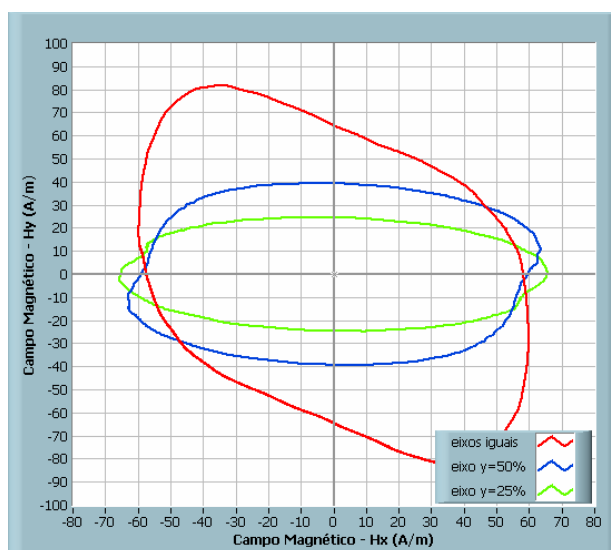


Figura 7.11 –Conjunto de trajetórias de campos para variações de amplitude das fontes de alimentação.

## 7.2 – Resultados Experimentais em Campos Rotacionais para Sinais Arbitrários

Devido às características do controle implementado, pode-se impor com facilidade qualquer forma de onda de indução na amostra em teste. Para isto, basta alterar a forma do sinal de referência das malhas de controle dos inversores. Este aspecto é relevante para comparação de perdas magnéticas entre fluxos senoidais e não senoidais. Além disso, este atributo possibilita comparar resultados experimentais com os obtidos por simulação, e vice-versa, em qualquer regime de magnetização do material [57]. As figuras a seguir dão alguns exemplos experimentais obtidos na bancada. A frequência da componente fundamental para estes casos é de 50Hz.

Para um sinal senoidal, mesmo em altas induções, a tensão nos sensores de indução imposta pelo controle ( $V_o$ ) segue o sinal de referência. Este efeito pode ser observado na Figura 7.12, onde plota-se no mesmo gráfico estas duas formas de onda, para o eixo de magnetização  $x$ , numa indução magnética rotacional de 1,45T. Os loci de induções e campo magnético para este caso podem ser verificados nas figuras 7.13 e 7.14.

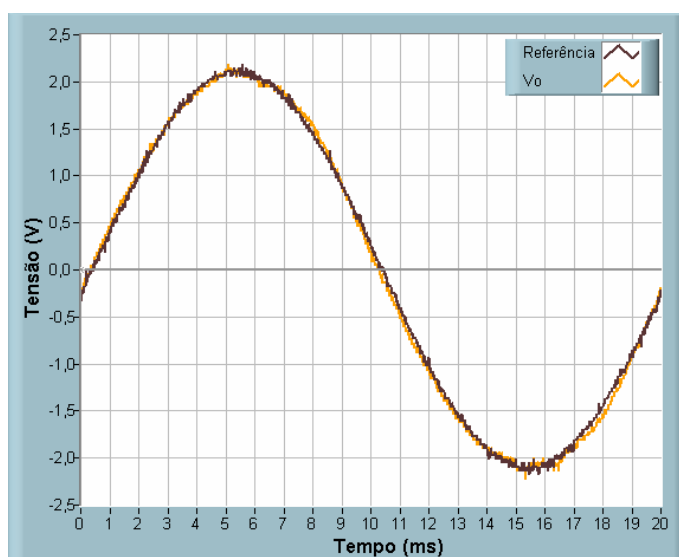


Figura 7.12 – Tensão de referência e tensão no sensor de indução para um sinal senoidal – indução de 1,45T.



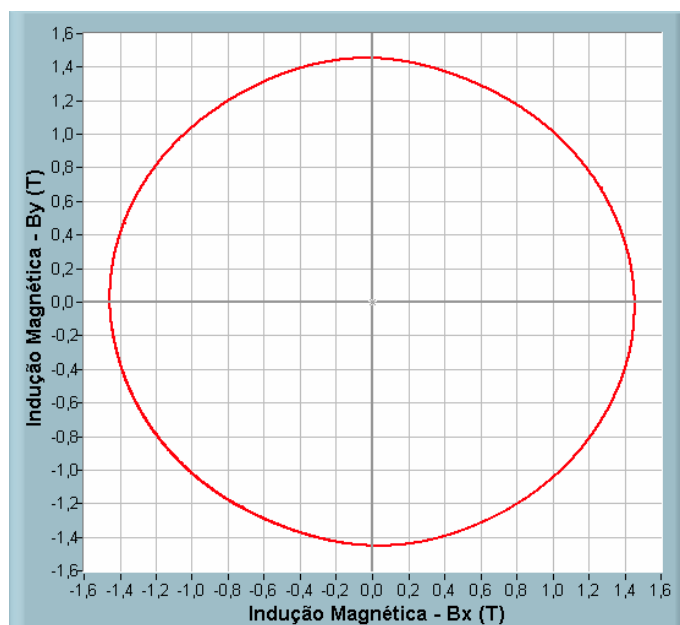


Figura 7.13 – Lócus de induções magnéticas para a tensão de referência constituída de um sinal senoidal.

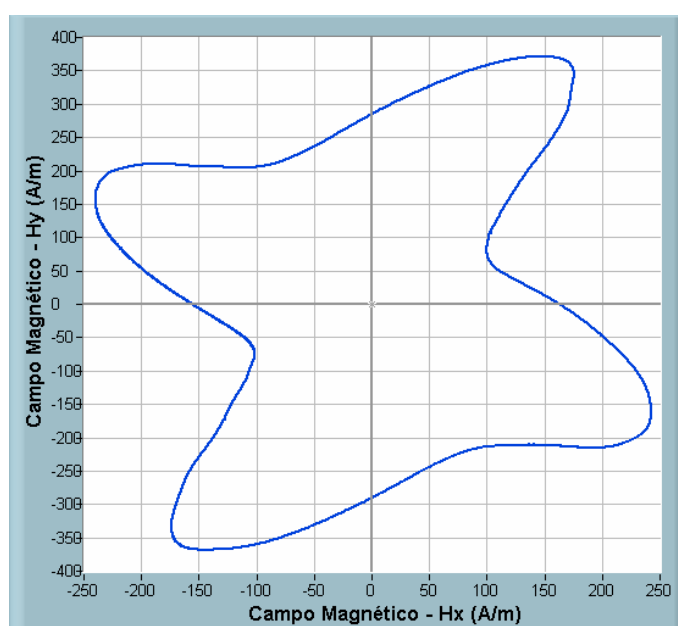


Figura 7.14 – Trajetória de campos magnéticos para a tensão de referência constituída de um sinal senoidal.

As figuras 7.16 e 7.17 mostram o comportamento da indução e do campo magnético, respectivamente, quando o sinal de referência tem a componente fundamental da tensão associada a uma harmônica de 3ª ordem. A evolução das formas de onda da referência e do sinal de tensão nos sensores de indução pode ser observada na Figura 7.15. Também para este e nos demais casos

apresentados na seqüência, o controle atua de maneira eficaz, impondo o sinal de referência na forma de onda da tensão dos sensores de indução.

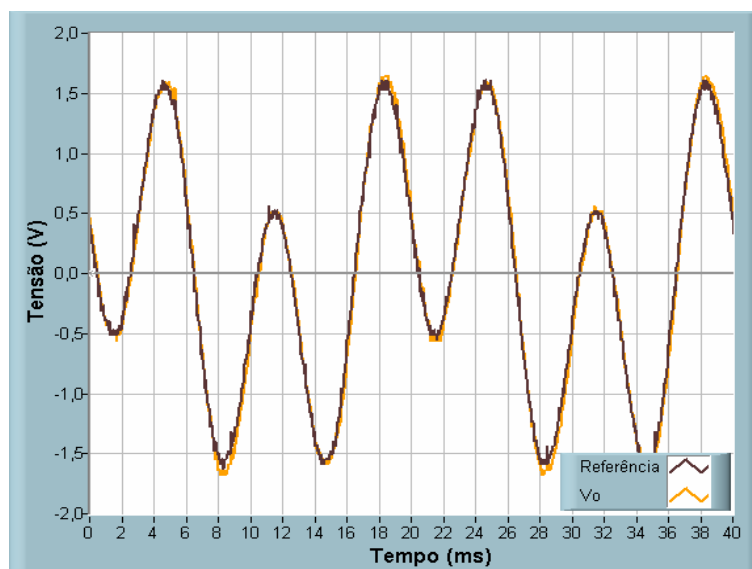


Figura 7.15 – Tensão de referência e tensão no sensor de indução para um sinal constituído da componente fundamental (0,7V) mais a harmônica de 3ª ordem (1,2V).

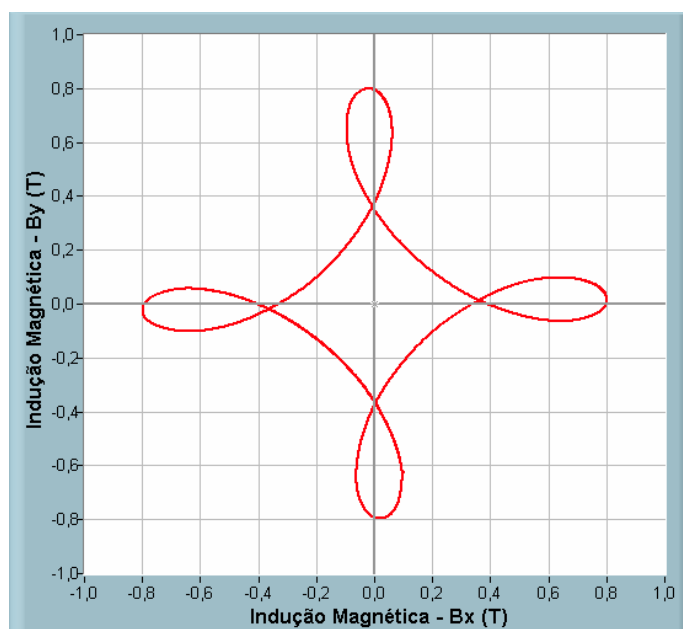


Figura 7.16 – Lócus de induções magnéticas para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 3ª ordem.

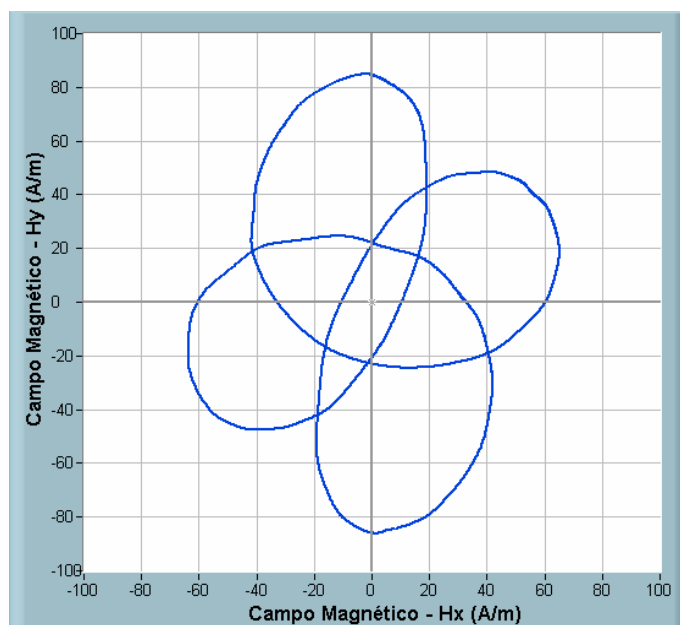


Figura 7.17 – Trajetória de campos magnéticos para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 3ª ordem.

Quando a indução possui um elevado conteúdo harmônico a trajetória de campos magnéticos originada é complexa para a interpretação. Uma noção de como estas trajetórias se formam pode ser tirada dos laços  $B(H)$  nas direções de magnetização  $x$  e  $y$ , como apresentados na Figura 7.18.

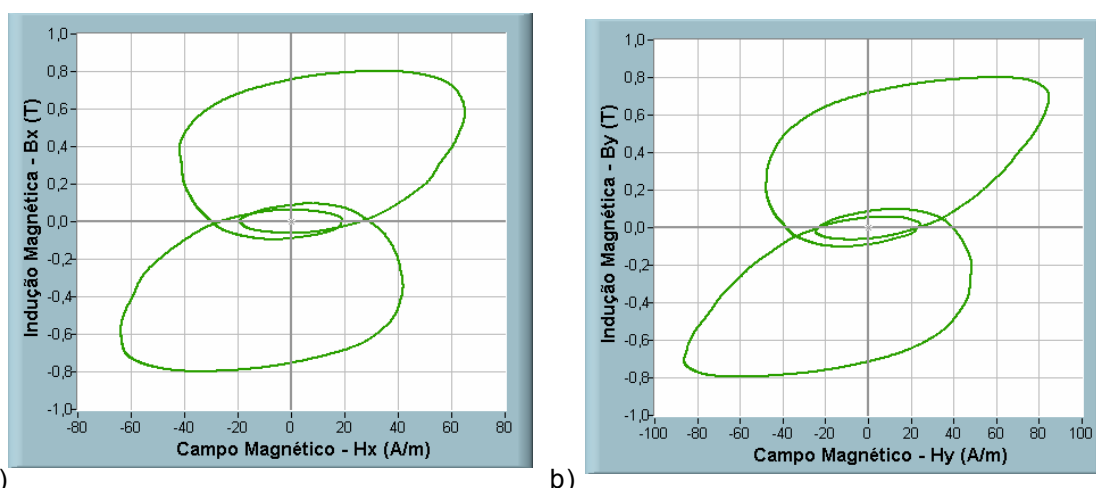


Figura 7.18 – Laços  $B(H)$  para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 3ª ordem.

- a) Sentido longitudinal  
b) Sentido transversal

Para um sinal de referência constituído de sua componente fundamental mais a harmônica de 5ª ordem, os comportamentos das variáveis elétricas e magnéticas são apresentados nas figuras 7.19 a 7.22.

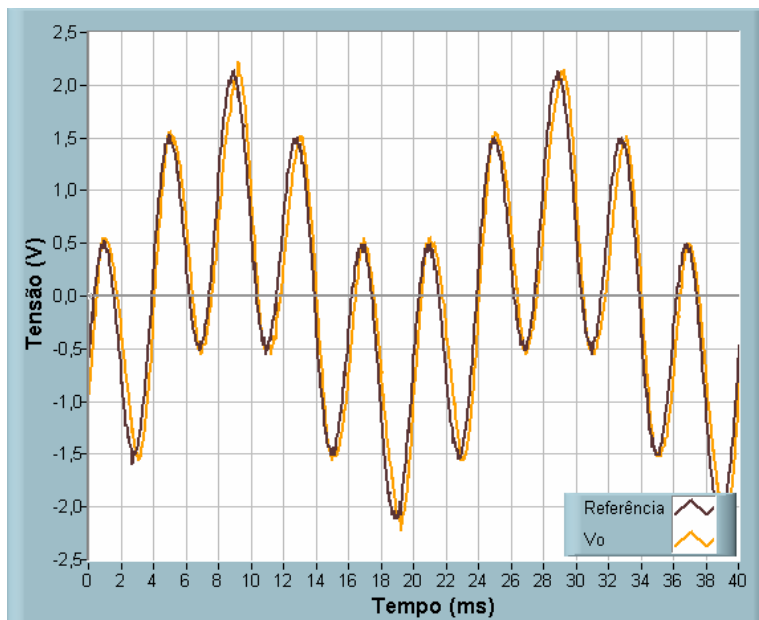


Figura 7.19 – Tensão de referência e tensão no sensor de indução para um sinal constituído da componente fundamental (0,9V) mais a harmônica de 5ª ordem (1,2V).

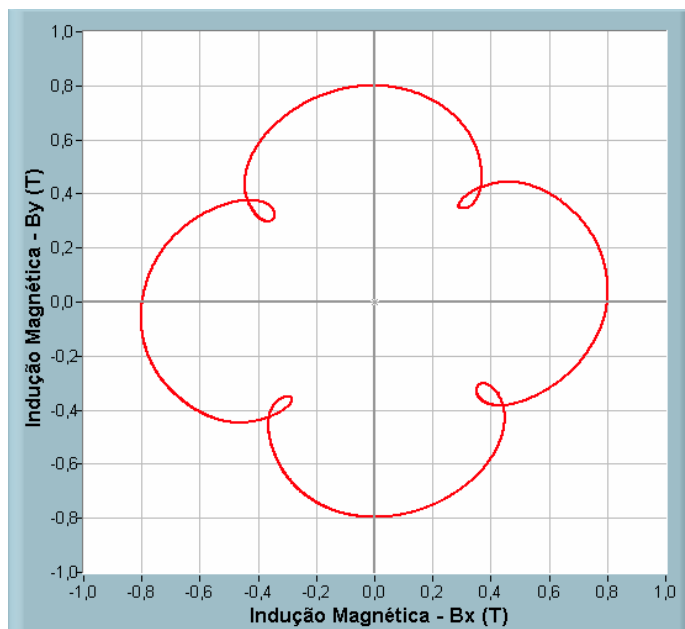


Figura 7.20 – Lócus de induções magnéticas para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 5ª ordem.

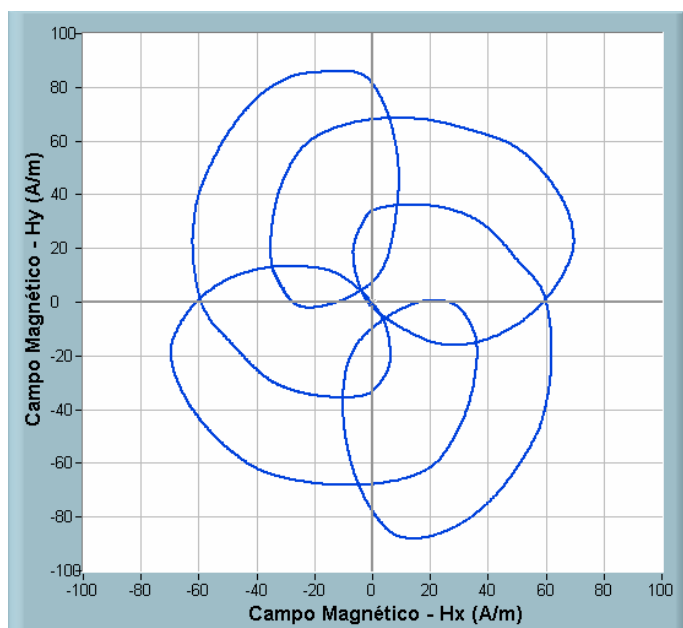


Figura 7.21 – Trajetória de campos magnéticos para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 5ª ordem.

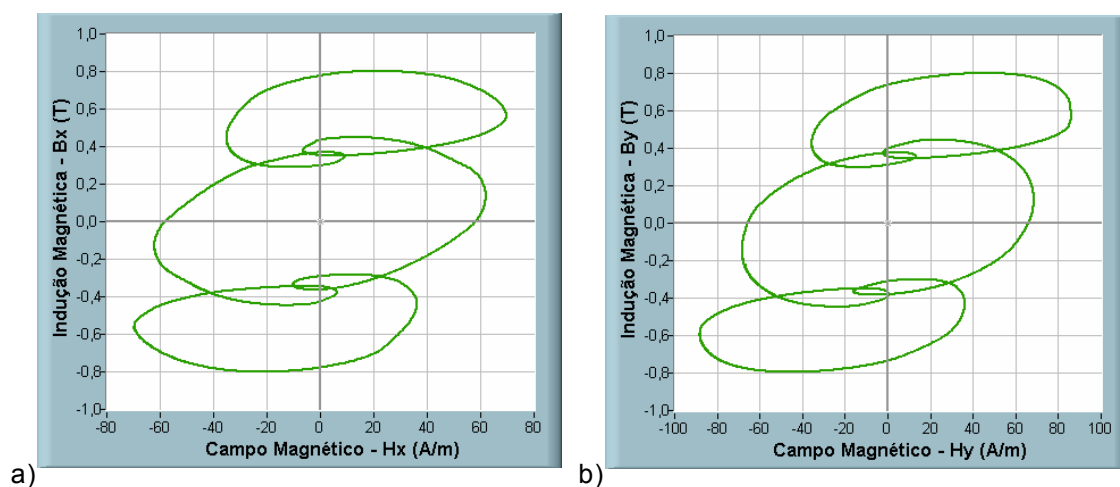


Figura 7.22 – Laços B(H) para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais a harmônica de 5ª ordem.

- a) Sentido longitudinal
- b) Sentido transversal

Nas figuras seguintes mostra-se o comportamento das variáveis elétricas e magnéticas quando a tensão de referência tem sua componente fundamental associada às harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

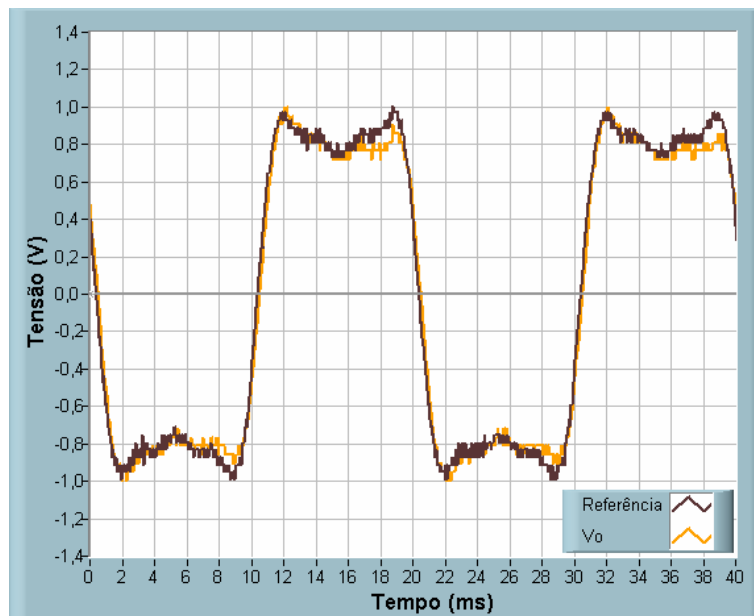


Figura 7.23 – Tensão de referência e tensão no sensor de indução para um sinal constituído da componente fundamental (1,05V) mais as harmônicas de 3ª (0,38V), 5ª (0,15V) e 7ª (0,07V) ordens.

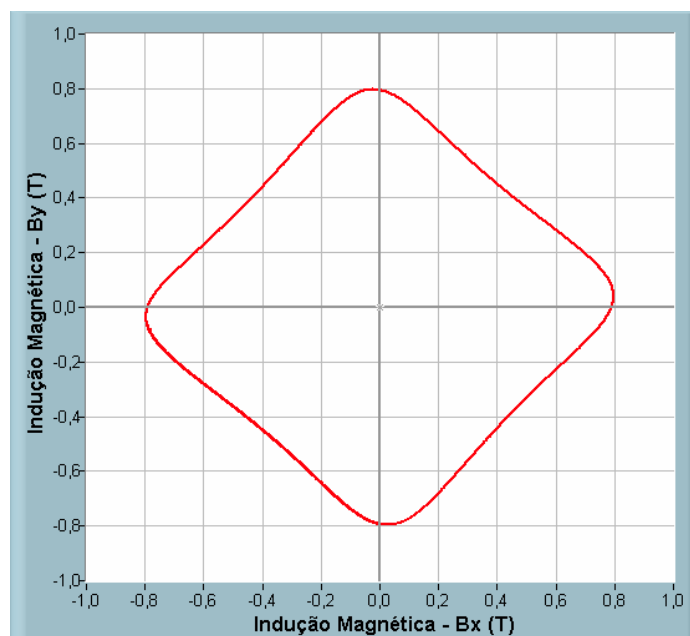


Figura 7.24 – Lócus de induções magnéticas para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais as harmônicas de 3ª, 5ª e 7ª ordens.

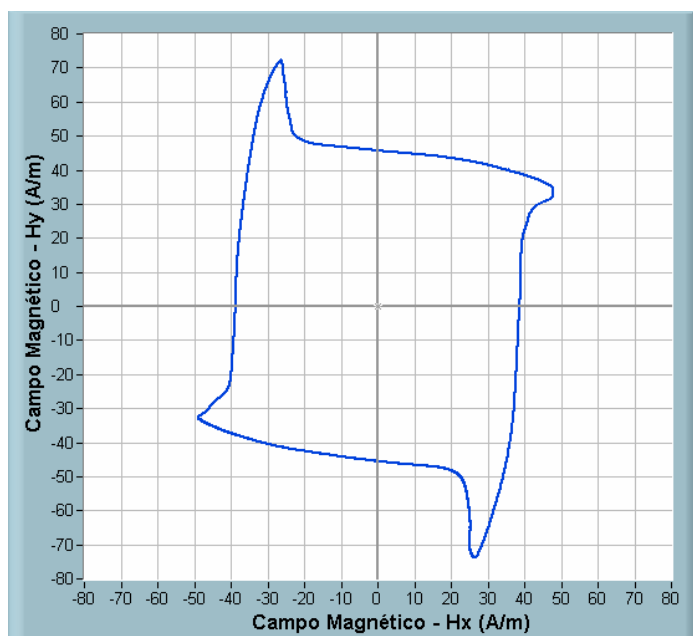
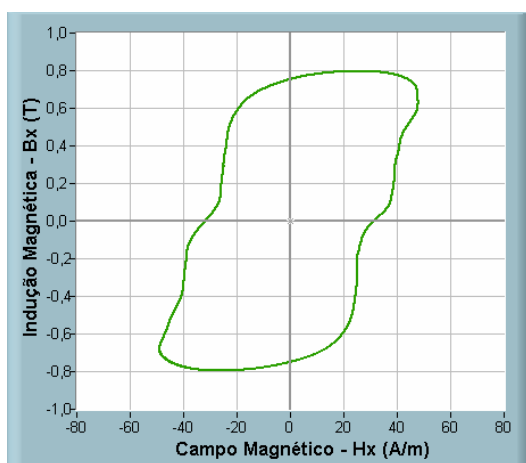
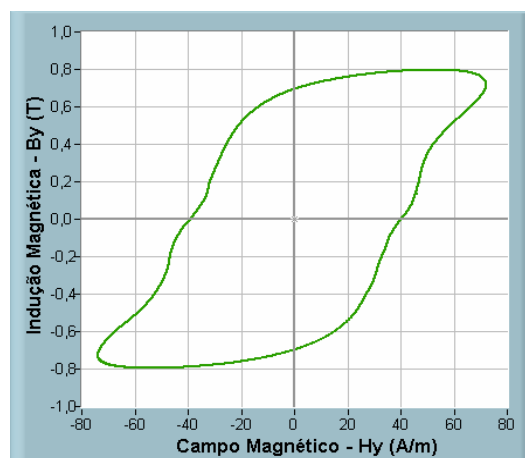


Figura 7.25 – Trajetória de campos magnéticos para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais as harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.



a)



b)

Figura 7.26 – Laços B(H) para a tensão de referência constituída da componente fundamental mais as harmônicas de 3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> ordens.

a) Sentido longitudinal

b) Sentido transversal

## 7.3 – Conclusões do Capítulo

Neste capítulo foram apresentados resultados experimentais que destacaram as características e as potencialidades da bancada construída. A possibilidade de realização de ensaios em campos rotacionais em diversos regimes de magnetização potencializa o uso da bancada RSST para aplicação em diferentes formas de caracterização do material, tanto para aplicação em medições de perdas magnéticas quanto na obtenção de parâmetros para a modelagem numérica de materiais ferromagnéticos.

Especificamente em relação à técnica de controle empregada, os resultados mostraram que a malha é eficaz, tanto impondo altas induções na amostra para sinais senoidais quanto para ondas arbitrárias.



## **8 – Conclusões Finais e Perspectivas**

### **8.1 – Conclusões Finais**

O objetivo principal desta tese foi a construção de uma bancada experimental para o estudo das perdas magnéticas em lâminas de aços elétricos submetidas a campos rotacionais. O trabalho englobou a montagem de dois inversores de tensão; o emprego de uma estratégia de controle original para esta aplicação; o desenvolvimento de amplificadores de precisão; a concepção de uma malha de terra de referência comum para os inversores, para os amplificadores de sinais e para o sistema de aquisição, pouco susceptível a interferência; e ainda, a utilização de sensores de indução e campo magnético conhecidos no meio científico.

A bancada do tipo RSST desenvolvida pode operar com frequências de 5Hz a 150Hz, controlando a forma de onda do fluxo magnético na amostra, de baixas induções até próximo a saturação do material, podendo também aplicar na amostra ensaiada formas de ondas arbitrárias de indução magnética.

Pela falta de uma referência disponível, os resultados obtidos em campo alternante na bancada RSST foram comparados com os oriundos do quadro de Epstein. O exame dos laços  $B(H)$  para os dois métodos evidenciou a necessidade de um estudo mais elaborado sobre a aplicação da blindagem no método de chapa única.

A influência que a blindagem exerce nas medições de campo magnético da bancada RSST foi analisada por meio de resultados experimentais e simulações em 3D. De forma original, conclui-se que a blindagem desempenha uma função de suma importância para a exatidão das medições do campo magnético.

As análises mostraram que existe uma distância adequada entre a blindagem e a amostra de forma que sejam obtidos resultados similares em campos alternantes entre o RSST e o teste de Epstein. Esta técnica de ajuste da distância da blindagem trouxe uma nova ferramenta para aferição e ajuste da bancada RSST, possibilitando que as medições em campos rotacionais possam ser realizadas com mais precisão.

As técnicas de medição de indução magnética envolvendo parte ou toda a amostra, que suscitam discordância de opiniões na comunidade científica a respeito da maior eficácia de uma ou de outra, também foram analisadas por simulações e experimentação.

As simulações em 3D mostraram que na região da amostra em que atuam os sensores de indução o fluxo magnético é homogêneo, indicando que as duas técnicas trazem o mesmo resultado. Porém, analisando-se os resultados experimentais das medições das perdas magnéticas em campo rotacional se observou que o método das bobinas sensoras envolvendo toda a amostra são mais precisos em altas induções. Uma justificativa possível para este fato é que os furos na amostra para a introdução dos sensores provocam estresse mecânico (mesmo que as amostras tenham passado por um tratamento térmico após as furações), alterando as características magnéticas da lâmina e a distribuição do fluxo magnético, ficando o efeito evidenciado somente nas altas induções.

Devido à inerente complexidade do assunto, os detalhes teóricos e práticos da alimentação elétrica do RSST e do controle da forma de onda de indução na amostra receberam a maior parte das atenções durante o desenvolvimento da tese. Para avaliar o desempenho do controle implementado, resultados experimentais foram comparados com o sistema operando em malha fechada e aberta.

Uma nova metodologia a partir da análise da taxa de distorção harmônica das tensões nos sensores de indução foi posta em prática. Mostrou-se que este procedimento é mais coerente com o efeito físico a ser analisado do que o exame da THD dos sinais de indução magnética.

Os resultados experimentais em campos rotacionais indicam que em baixas induções, quando a THD das tensões nos sensores de indução ficam abaixo de 3%, as perdas magnéticas medidas com o controle dos inversores operando em malha fechada e em malha aberta são próximos. Porém, na região em torno da saturação do material, onde o controle em malha aberta não impõe o fluxo adequado, o acréscimo na taxa de distorção harmônica faz com que os valores das perdas no material aumentem.

O estudo do desempenho do controle implementado indica que, além da medição errônea das perdas, a distorção harmônica tem significativa influência nas trajetórias do campo magnético no material, até mesmo quando os valores de THD são menores que 3%. Este fato é de elevada importância no que diz

respeito à utilização dos dados experimentais para caracterização e modelagem numérica de materiais.

Considera-se que os objetivos deste trabalho tenham sido alcançados, pois os resultados apresentados mostraram a capacidade da bancada RSST de estabelecer a indução magnética na amostra com baixa distorção harmônica para sinais senoidais e, ainda, de impor diferentes regimes de magnetização como diferença de amplitude das tensões de alimentação, defasagem entre as fontes e geração de ondas arbitrárias.

Para finalizar, a construção da bancada RSST teve, desde seus primeiros esboços, o objetivo claro que a mesma deveria ser um equipamento útil, versátil, robusto e duradouro. Que pudesse ser utilizada por pesquisadores para análise de materiais, principalmente para o desenvolvimento de modelos matemáticos. Acredita-se que este objetivo tenha sido alcançado. Porém, tem-se a certeza que as técnicas e as metodologias empregadas deverão sofrer aperfeiçoamento num futuro próximo, pois assim funciona o domínio da ciência e da tecnologia.

## 8.2 – Perspectivas

Os resultados obtidos na bancada e as análises efetuadas suscitaram dúvidas e algumas certezas, desta forma, vislumbram-se algumas possibilidades como proposta para futuros trabalhos nesta área de pesquisa:

- i)* Realização de ensaios envolvendo um maior número de amostras para verificar a repetitividade dos resultados;
- ii)* Realização de ensaios envolvendo outros tipos de lâminas de aço-silício, com maiores e menores perdas magnéticas, isotrópicas ou com anisotropias diferentes, para verificar a resposta da bancada RSST;
- iii)* Realização de estudos e ensaios de outras disposições e formas dos sensores de campo magnético e, conseqüentemente, verificação da influência da blindagem nos resultados das medições do campo;
- iv)* Avaliação da aplicação de um único tipo de material para a função de blindagem. Julgar se o uso de um material isotrópico na blindagem,

posicionado numa distância definida por experimentação, poderia ser utilizado para qualquer tipo de material da amostra, sem necessidade de troca da blindagem ou alteração da distância.

- v) Melhoramento dos aspectos mecânicos que envolvem a amostra, os sensores e a blindagem para facilitar a realização e a repetitividade dos ensaios;
- vi) Construção de um novo quadro magnético no qual os pólos possam ser deslocados com precisão. Desta forma ter-se-ia um controle nos valores dos entreferros entre os pólos e a amostra, podendo-se avaliar com maior exatidão a influência do tamanho do entreferro na medição do campo magnético;
- vii) Estudo e separação das perdas magnéticas sob campos rotativos;
- viii) Estudo e modelagem das perdas dinâmicas sob campos rotativos;
- ix) Estudo quantitativo do comportamento das perdas magnéticas sob campos rotativos distorcidos ou não uniformes.

## 9 – Anexo

### 9.1 – Solenóide de Referência para Calibração dos Sensores de Campo Magnético

Com o objetivo de calibrar os sensores de campo foi construído um solenóide de referência, de modo que o campo magnético no eixo deste solenóide fosse de valor conhecido. O solenóide foi confeccionado com 1.832 espiras, em um cilindro de pvc de 916mm de comprimento e 51,74mm de diâmetro. Uma simulação deste dispositivo no programa EFCAD [20] mostrou que o campo magnético é homogêneo (variação menor que 1%) em toda a região central do solenóide, apresentando uma diminuição brusca em sua intensidade somente a 1mm de distância do seu enrolamento.

Uma vez inseridos os sensores no interior do solenóide, aplica-se uma corrente conhecida nos terminais deste último e se determina o campo no seu interior pela Equação 9.1, onde  $I$  é o valor da corrente circulante e  $l$  o comprimento do solenóide. Comparando este resultado com o valor de campo encontrado pelo método da bobina-H se estabelece um fator de ajuste para os sensores. A Figura 9.10 apresenta o solenóide de referência utilizado na calibração dos sensores de campo.

$$H = \frac{NI}{l} \quad [A/m] \quad (9.1)$$



Figura 9.10 – Solenóide de referência.

## Referências Bibliográficas

- [1] BASTOS, João Pedro Assumpção. *Eletromagnetismo para Engenharia: Estática e Quase Estática*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [2] BOZORTH, Richard M. *Ferromagnetism*. Nova Iorque: IEEE Press, 1993.
- [3] IPT, Laboratório de Metalurgia do Pó e Materiais Magnéticos. *Aços Carbonos e Aços Silícios para Fins Elétricos*. São Paulo, 2001.
- [4] BERTOTTI, G. General Properties of Power Losses in Soft Ferromagnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, p. 621-630, janeiro. 1988.
- [5] BOGLIETTI, A.; CAVAGNINO, A.; LAZZARI, M.; PATORELLI, M. Predicting Iron Losses in Soft Magnetic Materials With Arbitrary Voltage Supply: An Engineering Approach, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 39, n. 2, março. 2003.
- [6] CULLITY, B. D. *Introduction to Magnetic Materials*. E.U.A.: Addison-Wesley Publishing Company, 1972.
- [7] FIORILLO, F.; NOVIKOV, A.. Power Losses Under Sinusoidal, Trapezoidal and Distorted Induction Waveform. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 5, p. 2559-2561. 1990.
- [8] AMAR, M.; PROTAT, F. A Simple Method for the Estimation of Power Losses in Silicon Iron Sheets Under Alternating Pulse Voltage Excitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 2, p. 942-944, março. 1994.
- [9] BATISTELA, Nelson Jhoe. *Caracterização e Modelagem Eletromagnética de Lâminas de Aço ao Silício*. Florianópolis, 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [10] SADOWSKI, N.; BATISTELA, N. J.; BASTOS, J. P. A.; MAZENC, M. L. An Inverse Jules-Atherton Model to Take Into Account Hysteresis in Time Stepping Finite Element Calculations. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 38, n. 2, p. 797-800, março. 2002.
- [11] BASTOS, João Pedro Assumpção; SADOWSKI, Nelson. *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*. 1. ed. Nova Iorque: MARCEL DEKKER INC., 2003.
- [12] MEURER, E. J.; GARCIA, J. S. D.; BATISTELA, N. J.; CARLSON, R.; SADOWSKI, N.; KUO-PENG, P.; BASTOS, J. P. A. Análise e Comparação de Aparelhos para Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício. In: 6º CBMag – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. *Anais*. São Paulo, 2004.
- [13] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Produtos Laminados Planos de Aço para Fins Elétricos – verificação das propriedades, NBR 5161. 1996.
- [14] ANTONELLI, E.; CARDELLI, E.; FABA, A. Epstein Frame: How and When It Can Be Really Representative About the Magnetic Behavior of Laminated Magnetic Steels. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 41, n. 5, p. 1516-1519. Maio, 2005.
- [15] SIEVERT, J. Recent Advances in the One and Two-Dimensional Magnetic Measurement Technique for Electrical Sheet Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 5, p. 2553-2558, setembro. 1990.
- [16] SOARES, Ronaldo Alves. *Estudo Comparativo de Ensaios de Chapa Única para Medidas de Perdas em Aços Elétricos*. São Paulo, 2001. Dissertação (Mestre em Engenharia), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [17] MTHOMBENI, L.T.; PILLAY, P. Core Losses in Motor Laminations Exposed to High Frequency or Nonsinusoidal Excitation. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 38th IAS ANNUAL MEETING. *Proceedings*. Salt Lake City, v. 2, p. 1090-1097. Outubro, 2003.

- [18] MENDES, Filomena Barbosa Rodrigues. *Análise de Medidas de Perdas Magnéticas em Lâminas de Aço ao Silício*. Florianópolis, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [19] SADOWSKI, N; MAZENC, M. L. Relatório Interno. UFSC, GRUCAD. Florianópolis. 2003.
- [20] EFCAD. Programa para Simulação e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos. UFSC, GRUCAD. Florianópolis, 2001.
- [21] PFÜTZNER, H. Present Status of Research on Two-Dimensional Magnetization. In: SEVENTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON 1&2 DIMENSIONAL MAGNETIC MEASUREMENT AND TESTING. *Proceedings*. Lüdenscheid, Alemanha, setembro, 2002. p. 81-87.
- [22] BRIX, W. Measurements of the Rotational Power Loss in 3% Silicon-Iron at Various Frequencies Using a Torque-Magnetometer. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, V. 26, p. 193-195, 1982.
- [23] GRAHAM JR., C. D.; TAN, K.S.; DATTA, A.; FLANDERS, P. J. Rotational Loss in Thin Gage Soft Magnetic Materials. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 6, p. 193-195, setembro, 1982.
- [24] MOSES, A. J., THOMAS, B. Measurement of Rotating Flux in Silicon Iron Lamination, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 9, n. 4, p. 651-654. Dezembro, 1973.
- [25] FIORILLO, F.; RIETTO, A. M., Extended Induction Range Analysis of Rotational Losses in Soft Magnetic Materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 24, n. 2 p. 1960-1962, março, 1988.
- [26] MOSES, A. J., Rotational Magnetization – Problems in Experimental and Theoretical Studies of Sletrical Steels and Amorphous Magnetic Material, *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 2. Março, 1994.
- [27] SASAKI, T.; IMAMURA, M.; TAKADA, S.; SUZUKI, Y. Measurement of Rotational Power Losses in Silicon-Iron Sheets Using Wattmeter Method. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 21, n. 5, p. 1918-1920. Setembro, 1985.
- [28] SIEVERT, J.; AHLERS, H.; ENOKIZONO, M.; KAUKE, S.; RAHF, L.; XU, J. The Measurement of Rotational Power Loss in Electrical Sheet Steel Using a Vertical Yoke System. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, p. 91-94. 1992.
- [29] BRIX, W.; HEMPEL, K. A.; SCHULTE, F. J. Improved Method for the Investigation of the Rotational Magnetization Process in Electrical Steel Sheets. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 20, n. 5, p. 1708-1710. Setembro, 1984.
- [30] ENOKIZONO, M.; SUZUKI, T.; SIEVERT, J; XU, J. Rotational Power Loss of Silicon Steel Sheet. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 26, n. 5, p. 2562-2564. Setembro, 1990.
- [31] MAKAVEEV, D; WULF, M. D.; MELKEBEEK, J. Field Homogeneity in a Two-Phase Rotational Single Sheet Tester With Square Samples. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 196-197, p. 937-939, 1999.
- [32] MAKAVEEV, D.; VON RAUCH, M.; WULF, M. D.; MELKEBEEK, J. Accurate Field Strength in Rotational Single Sheet Tester. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 215-216, p. 673-676, 2000.
- [33] SALZ, W. A. Two-Dimensional Measuring Equipment for Electrical Steel. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 30, n. 3, p. 1253-1257. Maio, 1994.
- [34] ZHUO, J. G.; RAMSDEN, V. S. Improved Formulations for Rotational Core Losses in Rotating Electrical Machines. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 34, n. 4, p. 2995-2997. Julho, 1998.

- [35] BRIX, W.; HEMPEL, E. A.; SCHROEDER, W. Method for the Measurement of Rotational Power Loss and Related Properties in Electrical Steel Sheets. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. MAG-18, n. 6, p. 1469-1471. Novembro, 1982.
- [36] ZHUO, J. G.; RAMSDEN, V. S. Two Dimensional Measurement of Magnetic Field and Core Loss Using A square Specimen Tester. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 29, n. 6, p. 2995-2997. Novembro, 1993.
- [37] ENOKIZONO, M.; TANABE, I. Studies on a New Simplified Rotational Loss Tester. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 33, n. 5, p. 4020-4022, 1997.
- [38] TODAKA, T.; ISHIHARA, Y.; TAMURA, Y. Measurement of Magnetic Characteristics of Silicon Steel in Any Direction by RSST and SST: Method and Relationship. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 33, p. 328-385, 1994.
- [39] ESPÍNDOLA, Aleandro Amauri de. *Avaliação das Perdas Magnéticas em Dispositivos Submetidos a Campos Magnéticos Girantes*. Florianópolis, 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [40] TUMANSKI S. A Multi-Coil Sensor for Tangential Magnetic Field Investigations. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 242-245, p. 1153-1156. 2002.
- [41] YAMAMOTO, T.; OHYA, Y. Single Sheet Tester for Measuring Core Losses and Permeabilities in a Silicon Steel Sheet. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. , n. 10, p. 157-159. Junho, 1974.
- [42] NAKATA, T.; KAWASE, Y.; NAKANO, M. Improvement of Measurement Accuracy of Magnetic Field Strength in Single Sheet Tester By Using Two H Coil. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 23, n. 5, p. 2596-2598. Setembro, 1987.
- [43] NAKATA, T.; MATSUBARA, K.; TAKAHASHI, N.; FUJIWARA, K. Effects of Impedances of Primary Winding and Mutual Inductor on Distortion of Flux Waveform in Single Sheet Tester. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 31, n. 6, p. 3382-3384. Novembro, 1995.
- [44] BATISTELA, Nelson Jhoe. *Inversor de Tensão com Saída Senoidal Controlado por Modo Deslizante com Frequência Fixa*. Florianópolis, 1994. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina.
- [45] UTIKIN, V. I. Variable Structure System With Sliding Modes. *IEEE Transaction on Automatic Control*. V. ac-22, n.2, p. 212-22, 1977.
- [46] TODAKA, T.; ISHIHARA, Y.; MORINO, H. Measurement Method of Magnetic Characteristics in Any Direction for Silicon Steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 112, p. 115-119, 1992.
- [47] MAKAVEEV, D; VON RAUCH, M.; WULF, M. D.; MELKEBEEK, J. Controlled Circular Magnetization of Electrical Steel in Rotational Single Sheet Tester. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 37, n. 4, p. 2740-2742. Julho, 2001.
- [48] MAKAVEEV, D; MAES, J.; MELKEBEEK, J. Waveform Control for Rotational Single Sheet Tester Using System Identification Techniques. *Journal of Applied Physics*, v. 87, n. 9, p. 5983-5985. Maio, 2000.
- [49] NAKATA, T.; MATSUBARA, K.; TAKAHASHI, N.; FUJIWARA, K. Acceleration Technique of Waveform Control for Single Sheet Tester. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 31, n. 6, p. 3400-3402. Novembro, 1995.
- [50] MAIA, Edgar Martins Moura. *Sistema de Medição Automatizado para Caracterização de Materiais Magnéticos Moles: Aplicação à Caracterização de Ferritas*. Goiânia, 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e Computação), Universidade Federal de Goiás.



- [51] SIEVERT, J.; AHLERS, H.; BIRKFELD, M.; CORNUT, B.; FIORILLO, F.; HEMPEL, K. A.; KOCHMANN, T.; KEDOUS-LEBOUC, A.; MEYDAN, T.; MOSES, A.; RIETTO, A.M. European Intercomparison of Measurements of Rotational Power Loss in Electrical Sheet Steel. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 160, p. 115-118, 1996.
- [52] ACESITA S.A. Aços Siliciosos. Catálogo de Fabricante. [www.acesita.com.br](http://www.acesita.com.br)
- [53] LABVIEW.EXE. Versão 7.1. Programa para bancos de ensaios com instrumentos virtuais. National Instruments Corporation. 2004
- [54] SILVA JÚNIOR, P. A. DA; GARCIA, A. P.; SADOWSKI, N.; BATISTELA, N. J.; CARLSON, R.; Aplicação de Instrumentos Virtuais para Caracterização de Aços Submetidos a Campos Magnéticos Rotacionais. In: 7º CBMag – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. *Anais*. Belo Horizonte, 2006.
- [55] SILVA JÚNIOR, P. A. DA; SADOWSKI, N.; BATISTELA, N. J.; CARLSON, R.; GARCIA, A. P.; M. RIGONI. Estudo do Efeito da Blindagem nas Medições de Campo e nas Perdas Magnéticas em Ensaios de Chapa Única Utilizando Bobina-H. In: 7º CBMag – CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO. *Anais*. Belo Horizonte, 2006.
- [56] LEITE, J. V.; BENABOU, A.; SILVA JÚNIOR, P. A. DA; SADOWSKI, N.; HENNERON, STÉPHANE, C.; KUO-PENG, P.; PIRIOU, P.; BATISTELA, N. J. Analysis of a Rotational Single Sheet Tester Using 3D Finite Element Model Taking Into Account Hysteresis Effect. In: EPNC'2006 - THE XIX SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC PHENOMENA IN NONLINEAR CIRCUITS. *Proceedings*. Maribor, Slovenia, p.5-6, Junho, 2006.
- [57] LEITE, J. V.; SILVA JÚNIOR, P. A. DA; SADOWSKI, N.; BATISTELA, N. J.; KUO-PENG, P.; BASTOS, J. P. A. Vector Hysteresis Under Non-sinusoidal Induction Waveforms: Modeling and Experimentation. In: COMPUMAG 2007 – 16TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE COMPUTATION OF ELETROMAGNETIC FIELDS. *Proceedings*. Aachen, Alemanha, 2007.
- [58] LEITE, Jean Vianeí. *Análise de Campos Magnéticos por Elementos Finitos Considerando Modelo de Histerese Vetorial*. Florianópolis, 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Catarina.
- [59] DURAND, E. *Magnétostatique*. França. Masson et C<sup>ie</sup>, 1968.
- [60] LEBOUC, A.; CORNUT, B.; SPORNIC, S. Caractérisation et Analyse du Comportement des Tôles Magnétiques en Induction Circulaire. *Revue Internationale de Génie Électrique*, v. 5, n. 2, p. 325-334. 2002.
- [61] LANCAROTTE, Marcelo Shiroma. *Metodologias de Previsão das Perdas Magnéticas nos Diversos Regimes de Magnetização*. São Paulo, 2004. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- [62] ATALLAH, K.; HOWE, D. Calculation of the Rotational Power Loss in Electrical Steel Laminations from Measurement H and B. *IEEE Transactions on Magnetics*, v. 29, n. 6, p. 3547-3549. Novembro, 1993.
- [63] GORICAN, V.; HAMLER, A.; JESENİK, M., STUMBERGER, B., TRLEP, M. Unreliable Determination of Vector B in 2-D SST. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 254-255, p. 130-132, 2003.
- [64] KOCKMANN, T. Relationship Between Rotational and Alternating Losses in Electrical Steel Sheets. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 160, p. 145-146, 1996.
- [65] MAKAVEEV, D.; DE WULF, M.; HOUBAERT, Y.; MELKEBEEK, J. Design and Calibration Aspects of Small Size Single Sheet Tester. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 254-255, p. 70-72, 2003.

- [66] SIEVERT, J. The Measurement of Magnetic Properties of Electrical Sheet Steel – Survey on Methods and Situation of Standards. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* , v. 25-216, p. 647-651, 2000.
- [67] RAGUSA, C.; REPETTO, M. Accurate Analysis of Magnetic Devices With Anisotropic Vector Hysteresis. *Physica B*, v. 275, p. 92-98, 2000.
- [68] STRANGES, N.; FINDLAY, R. D. Measurement of Rotational Iron Losses in Electrical Sheet. *IEEE Transactions on Magnetism*, v. 36, n. 5, p. 3457-3459. Settembre, 2000.