

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**ALTERNATIVA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS
PERMANENTES COM DESTACADA ANISOTROPIA
MAGNETOCRISTALINA SEM DESMAGNETIZAÇÃO
IRREVERSÍVEL**

Porto Alegre

2011

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**ALTERNATIVA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS
PERMANENTES COM DESTACADA ANISOTROPIA
MAGNETOCRISTALINA SEM DESMAGNETIZAÇÃO
IRREVERSÍVEL**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Energia

ORIENTADOR: Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2011

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**ALTERNATIVA PARA CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS PER-
MANENTES COM DESTACADA ANISOTROPIA MAGNETO-
CRISTALINA SEM DESMAGNETIZAÇÃO IRREVERSÍVEL**

Esta tese foi julgada adequada para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Ály Ferreira Flores Filho, UFRGS

Doutor pela University of Wales College of Cardiff,
Cardiff, País de Gales, Reino Unido.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Ramon Valls Martin, IPT-SP

Doutor pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro, DELET-UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, PPGEE-UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Valner João Brusamarello, PPGEE-UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Alexandre Sanfelice Bazanella

Porto Alegre, julho de 2011

À minha esposa Isabel, quem não se cansou de encorajar-me e, dia após dia, se apresentar ante o Senhor para interceder por mim e por nossos filhos.

Aos meus filhos Andrea, Mirna, Noelia e Matias, presentes de Deus, sempre me alentando.

Às minhas irmãs Carmen e Laura por dar-me seu carinho e apoio.

Aos meus pais, responsáveis pela minha formação.

Agradeço

Ao Único e Grande Deus e Senhor, que merece toda a honra e toda a glória.

Ao Departamento de Eletrônica da Facultad de Ingeniería da Universidad Nacional de Misiones por me apoiar nesta etapa de aperfeiçoamento.

Ao Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia LMEAE e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPGEE, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa.

Aos colegas e professores do PPGEE pelo seu auxílio nas tarefas desenvolvidas durante o curso e o apoio na revisão deste trabalho.

RESUMO

A determinação das principais propriedades magnéticas de um ímã permanente geralmente requer sistemas de medição sofisticados e custosos. Este trabalho analisa e propõe um sistema de caracterização de ímãs permanentes de Terras Raras e Cerâmicos à temperatura ambiente de baixo custo e de implementação mais simples. Para isso, o Histerisímetro de Entreferro Variável, HEV, é concebido e estudado. Ele consiste de um circuito magnético formado pelo ímã permanente sob caracterização, uma culatra de aço, um entreferro variável, bobinas de magnetização e desmagnetização de baixa potência, uma sonda de efeito Hall com seu respectivo gaussímetro, um fluxímetro com sua bobina exploradora, o circuito eletrônico de comando das bobinas de excitação e a interface a um sistema de instrumentação virtual. Para demonstrar os desenvolvimentos do trabalho são apresentados o estado da arte da caracterização dos ímãs permanentes, conceitos básicos de magnetismo em relação aos ímãs permanentes, instrumentação necessária para sua caracterização, a concepção e modelagem do HEV, os resultados dos testes realizados e uma abrangente análise de suas incertezas. Com isso é demonstrado que o Histerisímetro de Entreferro Variável é uma alternativa de caracterização de ímãs permanentes com desmagnetização linear com incertezas dentro do que é definido pela norma.

Palavras-chave: Ímã permanente. Caracterização de ímãs permanentes. Curva de desmagnetização de segundo quadrante. Ímãs de Terras Raras. Instrumentação magnética.

ABSTRACT

The determination of the main magnetic properties of permanent magnets usually requires sophisticated and expensive measuring systems. This work analyses and proposes a low-cost system for the characterization of Rare Earth and Ceramics permanent magnets at room temperature with simpler implementation. It comprehends a magnetic circuit with the permanent magnet under test, a steel yoke with appropriate pole pieces, a variable air gap, low power magnetization and demagnetization coils, a Hall Effect probe with its respective gaussmeter, a fluxmeter with its own search coil, a coil driver electronic circuit and a virtual instrumentation system (computer plus graphical interface software). To demonstrate the developments of the work, it is presented the state of the art of permanent magnets characterization, basic concepts of magnetism related to permanent magnets, the instrumentation required for its characterization, the HEV design and modeling, the results of the tests and a comprehensive analysis of related uncertainties. Thus, it is shown that the Variable Gap Hysteresimeter is an alternative characterization system for linear demagnetization permanent magnets with uncertainties within those defined by the standards.

Keywords: Permanent magnet. Permanent magnet characterization. Demagnetization curve. Second quadrant curve of demagnetization. Rare Earth permanent magnets. Magnetic measurements.

SUMÁRIO

| | | |
|---------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO..... | 23 |
| 2 | CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DOS MATERIAIS..... | 27 |
| 2.1 | Evolução da caracterização magnética dos materiais..... | 28 |
| 2.1.1 | Toróide ou anel de Rowland..... | 28 |
| 2.1.2 | Culatras e Permeâmetros..... | 29 |
| 2.1.3 | Histerisímetros..... | 32 |
| 2.1.4 | Magnetometria com Campo Pulsante (PFM)..... | 35 |
| 2.2 | Subsistemas de medição..... | 36 |
| 2.3 | O Histerisímetro de Entreferro Variável – HEV..... | 37 |
| 3 | MATERIAIS, CIRCUITOS E MEDIÇÕES..... | 39 |
| 3.1 | Magnetismo e matéria..... | 39 |
| 3.2 | Materiais Ferromagnéticos..... | 44 |
| 3.3 | Materiais magneticamente duros..... | 48 |
| 3.3.1 | Anisotropia Magnetocristalina..... | 50 |
| 3.3.2 | Principais características dos ímãs permanentes..... | 51 |
| 3.3.2.1 | Máximo produto energético $(BH)_{\max}$ | 51 |
| 3.3.2.2 | Densidade de fluxo magnético remanente ou Remanência B_r | 51 |
| 3.3.2.3 | Coercitividade..... | 52 |
| 3.3.2.4 | Fator de quadratura..... | 52 |
| 3.3.2.5 | Dependência da temperatura..... | 53 |
| 3.3.3 | Tipos de ímãs permanentes..... | 55 |
| 3.3.3.1 | Alnico..... | 55 |
| 3.3.3.2 | Ferrites ou cerâmicos..... | 55 |
| 3.3.3.3 | Samário Cobalto sinterizado..... | 56 |
| 3.3.3.4 | Neodímio Ferro Boro sinterizado..... | 56 |
| 3.4 | Circuito magnético com ímã permanente..... | 57 |
| 3.5 | Subsistemas de Medição na Caracterização Magnética de Ímãs Permanentes | 59 |
| 3.5.1 | Fluxímetro..... | 59 |
| 3.5.2 | Gaussímetro de Efeito Hall..... | 62 |
| 3.5.3 | Métodos e técnicas de medição nos histerisímetros..... | 66 |
| 3.6 | Medições estáticas ou quase-estáticas..... | 75 |
| 3.6.1 | Características estáticas e calibração estática..... | 75 |
| 3.6.2 | Valor medido vs. Valor verdadeiro..... | 76 |
| 3.6.3 | Estatística e incertezas nas medições..... | 76 |
| 3.6.3.1 | Incerteza Combinada..... | 81 |
| 3.6.3.2 | Incerteza expandida e nível de confiança. Incerteza ponderada..... | 83 |
| 4 | O HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL HEV..... | 85 |
| 4.1 | Introdução..... | 85 |
| 4.2 | Estrutura Básica do HEV..... | 85 |
| 4.3 | Elementos constituintes do HEV..... | 88 |
| 4.4 | Circuito equivalente do HEV..... | 89 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 4.5 | Metodologia de caracterização do HEV..... | 91 |
| 4.5.1 | Metodologia usada na determinação do B_{re} | 92 |
| 4.5.2 | Metodologia usada na determinação do μ_{re} | 94 |
| 4.6 | Rotina de medição do HEV..... | 98 |
| 4.6.1 | Entreferro variável..... | 98 |
| 4.6.1.1 | Medição de B_g | 98 |
| 4.6.1.2 | Determinação do ajuste do HEV..... | 99 |
| 4.6.1.3 | Determinação do B_r | 99 |
| 4.6.2 | Determinação do μ_{re} | 99 |
| 4.6.3 | Determinação do H_{ce} e $(BH)_{maxe}$ | 100 |
| 5 | ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS..... | 101 |
| 5.1 | Método de Análise Numérico em Eletromagnetismo..... | 101 |
| 5.2 | Método de Análise Numérico por Elementos Finitos..... | 102 |
| 5.3 | Simulação por Elementos Finitos na Magnetostática..... | 103 |
| 5.4 | Simulação por Elementos Finitos do HEV..... | 105 |
| 5.4.1 | Resultados da simulação..... | 106 |
| 5.4.1.1 | Ímãs tipo bloco quadrado 40 mm x 40 mm x 5 mm..... | 108 |
| 5.4.1.2 | Ímãs tipo bloco quadrado (40x40x10) mm ³ e de (25,4x25,4x8) mm ³ | 112 |
| 5.4.1.3 | Ímãs tipo cilíndrico de 25,4 mm de diâmetro x 5 mm..... | 114 |
| 5.4.1.4 | Ímãs tipo cilíndrico de 25,4 mm de diâmetro x 10 mm..... | 115 |
| 5.5 | Comentários da Simulação por Elementos Finitos do HEV..... | 117 |
| 6 | MODELO ANALÍTICO PARA O HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL..... | 119 |
| 6.1 | Entorno particular do modelo analítico do HEV..... | 119 |
| 6.1.1 | Equacionamento fundamental..... | 120 |
| 6.1.2 | Condições de contorno..... | 122 |
| 6.1.3 | Potencial escalar magnético..... | 123 |
| 6.2 | Geometria adotada para o HEV..... | 124 |
| 6.3 | Expressão do problema do modelo analítico para o HEV..... | 125 |
| 6.4 | Resolução do problema do modelo analítico para o HEV inserindo as condi- ções de fronteira..... | 129 |
| 6.5 | Conclusões do estudo analítico do B no entreferro..... | 134 |
| 7 | ENTORNO OPERATIVO DO HEV..... | 135 |
| 7.1 | Amostras utilizadas..... | 135 |
| 7.1.1 | Ímãs permanentes padrões..... | 135 |
| 7.1.2 | Ímãs permanentes conhecidos usados nos testes..... | 136 |
| 7.2 | Instrumentos utilizados..... | 137 |
| 7.2.1 | Especificações dos instrumentos utilizados..... | 138 |
| 7.3 | Acessórios utilizados nos testes..... | 138 |
| 7.4 | Determinação das incertezas no posicionamento da sonda Hall..... | 138 |
| 7.4.1 | Sensibilidade da sonda Hall a variações em x e z | 139 |
| 7.4.2 | Sensibilidade da sonda Hall à variação em y | 140 |
| 7.4.3 | Sensibilidade da sonda Hall ao ângulo θ | 140 |
| 7.5 | Normas pertinentes à caracterização de ímãs permanentes..... | 141 |
| 7.6 | Calibração ou ajuste do HEV..... | 142 |
| 8 | CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS COM HEV..... | 149 |
| 8.1 | Determinação do parâmetro B_{re} | 149 |
| 8.1.1 | Determinação do B_{re} por extrapolação..... | 151 |
| 8.2 | Determinação do parâmetro μ_{re} | 160 |
| 8.3 | Determinação dos parâmetros H_{ce} e $(BH)_{maxe}$ | 162 |

| | | |
|---------|--|-----|
| 8.4 | Resultados das medições das outras amostras..... | 163 |
| 8.4.1 | Resultados para as amostras de volume entre 2,5 e 6 cm ³ | 163 |
| 8.4.1.1 | Caracterização do ímã NB3..... | 164 |
| 8.4.1.2 | Caracterização do ímã NC1..... | 165 |
| 8.4.1.3 | Caracterização do ímã SC2..... | 167 |
| 8.4.2 | Resultados para as amostras de volume entre 8 e 16 cm ³ | 168 |
| 8.4.2.1 | Caracterização do ímã SB1..... | 169 |
| 8.4.2.2 | Caracterização do ímã FB2..... | 170 |
| 8.5 | Comentários das medições..... | 173 |
| 9 | COMPARAÇÕES, CONCLUSÕES, SUGESTÕES, RECOMENDAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES..... | 175 |
| 9.1 | Resultados em relação ao B_r | 175 |
| 9.2 | Resultados em relação ao μ_r | 179 |
| 9.3 | Resultados em relação ao H_c | 181 |
| 9.4 | Resultados em relação ao $(BH)_{\max}$ | 182 |
| 9.5 | Conclusões finais..... | 184 |
| 9.6 | Recomendações e sugestões de continuidade..... | 185 |
| 9.7 | Contribuições deste trabalho..... | 186 |
| | REFERÊNCIAS..... | 187 |
| | Apêndice 1. Expressões do subsistema de medição de H , B e J pelo método fluximétrico..... | 191 |
| | Apêndice 2. Procedimento de desmagnetização do HEV..... | 197 |
| | Apêndice 3. Arquivos m do modelo analítico do HEV..... | 199 |
| | Apêndice 4. Parâmetros e incertezas dimensionais de uma amostra..... | 203 |
| | Apêndice 5. Correção dos pontos medidos..... | 209 |
| | Apêndice 6. Ajuste de curva com o CFTool do Matlab..... | 213 |
| | Apêndice 7. Planilha de incertezas na determinação da permeabilidade de re- torno de uma amostra..... | 217 |
| | Anexo 1. Características técnicas do histerisímetro AMH-300..... | 219 |
| | Anexo 2. Características técnicas das amostras..... | 223 |
| | Glossário..... | 235 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1-1 | Primeiro protótipo do Histerisímetro de Entreferro Variável..... | 23 |
| Figura 1-2 | Segundo protótipo do Histerisímetro de Entreferro Variável..... | 24 |
| Figura 1-3 | Configuração de medição com o HEV..... | 25 |
| Figura 2-1 | Método de Rowland para caracterização de materiais magnéticos... | 28 |
| Figura 2-2 | Permeâmetro de janela simples Fahy Simplex..... | 31 |
| Figura 2-3 | Permeâmetro de dupla janela Sanford-Bennett High-H..... | 32 |
| Figura 2-4 | Histerisímetro com bobinas de medição no entreferro..... | 32 |
| Figura 2-5 | Magnetômetro de campo pulsante..... | 36 |
| Figura 2-6 | Histerisímetro de entreferro variável na caracterização de ímãs permanentes..... | 37 |
| Figura 2-7 | Entreferro de medição na determinação de B_r | 38 |
| Figura 2-8 | Entreferro de medição na determinação de μ_r | 38 |
| Figura 3-1 | Volume incremental entre dois materiais diferentes..... | 40 |
| Figura 3-2 | Material ferromagnético em forma toroidal com dois bobinados para determinação de desempenho magnético..... | 44 |
| Figura 3-3 | Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J (histerese) de um ímã genérico..... | 45 |
| Figura 3-4 | Ciclos de histerese para materiais ferromagnéticos duros e macios. | 47 |
| Figura 3-5 | Classificação dos ímãs em função de suas propriedades construtivas..... | 49 |
| Figura 3-6 | Espécime com anisotropia uniaxial..... | 50 |
| Figura 3-7 | Detalhe do segundo quadrante das características de um ímã permanente..... | 50 |
| Figura 3-8 | Curvas de desmagnetização do SmCo para diferentes temperaturas..... | 54 |
| Figura 3-9 | Curvas de desmagnetização do NdFeB para diferentes temperaturas..... | 54 |
| Figura 3-10 | Circuito magnético com ímã permanente e entreferro..... | 57 |
| Figura 3-11 | (a) Fluxo magnético através de uma área A (b) Bobina de campo comercial..... | 60 |
| Figura 3-12 | (a) Circuito eletrônico Integrador Miller (b) Fluxímetro comercial. | 61 |
| Figura 3-13 | Corrente contínua circulando por semicondutor tipo p submetido a um campo magnético contínuo B | 63 |
| Figura 3-14 | Sondas de Efeito Hall axial e transversal..... | 65 |
| Figura 3-15 | Gaussímetro de Efeito Hall com sonda Hall transversa comercial... | 66 |
| Figura 3-16 | Material ferromagnético em forma toroidal com dois bobinados para determinação de desempenho magnético..... | 66 |
| Figura 3-17 | Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J (histerese) de um ímã genérico..... | 67 |
| Figura 3-18 | Bobina exploradora do subsistema de medição de B onde l_{my} é a espessura da amostra e l_{by} é a largura da bobina..... | 70 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 3-19 | Bobina compensada que forma parte do subsistema de medição de J | 71 |
| Figura 3-20 | Limites de posicionamento dos diferentes sensores e bobinas no entreferro de medição, visto de cima ou corte transversal do entreferro..... | 71 |
| Figura 3-21 | Influência dos entreferros nas faces da amostra e os polos..... | 72 |
| Figura 3-22 | Distribuição uniforme, o valor esperado x_i encontra-se no centro da distribuição de valores possíveis com uma meia extensão ou semi-faixa a | 80 |
| Figura 4-1 | Estrutura física básica do HEV2..... | 86 |
| Figura 4-2 | Polos adequados a cada geometria ensaiada..... | 87 |
| Figura 4-3 | Disposição dos instrumentos de medição | 88 |
| Figura 4-4 | Características magnéticas do aço SAE 1020..... | 89 |
| Figura 4-5 | Circuito equivalente aproximado..... | 90 |
| Figura 4-6 | a) Configuração de medição de B_g em função de l_g para obter B_{re} , b) Configuração de medição de ΔB e ΔH para obter a permeabilidade de retorno..... | 91 |
| Figura 4-7 | Sonda Hall e sua posição no centro geométrico..... | 92 |
| Figura 4-8 | Lugar geométrico de medição para as duas posições possíveis do ímã..... | 92 |
| Figura 4-9 | Acessórios de posicionamento do ímã no centro do polo Q80..... | 93 |
| Figura 4-10 | Fases na determinação do B_{re} adotando o ímã SB1 como exemplo.. | 94 |
| Figura 4-11 | Bobinas fluximétricas para as diferentes geometrias..... | 95 |
| Figura 4-12 | Excitação das bobinas de magnetização na determinação do μ_r do ímã..... | 95 |
| Figura 4-13 | Medição de B e de Φ na determinação do μ_{re} do ímã..... | 96 |
| Figura 4-14 | Posicionamento dos ímãs, das bobinas e da sonda Hall no pólo Q80 na configuração de circuito magnético fechado. Indicação dos limites de medição dentro do campo magnético uniforme | 97 |
| Figura 4-15 | Definição do μ_r neste trabalho e faixa de possível Joelho (dados V.V.C.)..... | 97 |
| Figura 5-1 | Elemento genérico formado por três nós..... | 103 |
| Figura 5-2 | Discretização adaptativa do HEV..... | 106 |
| Figura 5-3 | Comparação da medição de B_g para l_g de 1 a 5 mm e dois polos diferentes: quadrado (identificado como Q) e tronco piramidal (identificado como TP)..... | 107 |
| Figura 5-4 | Comparação anterior estendida aos entreferros 6 até 10 mm..... | 108 |
| Figura 5-5 | Medição virtual da densidade de fluxo magnético para diferentes entreferros nos ímãs FB1; SB1; e NB1..... | 109 |
| Figura 5-6 | Ensaio de simulação do HEV2 com ímã FB1 com polo quadrado e $l_g = 4$ mm..... | 110 |
| Figura 5-7 | Densidade de fluxo no entreferro do HEV2 com ímã FB1 com polo tronco de pirâmide e $l_g = 4$ mm..... | 110 |
| Figura 5-8 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 3 mm com ímã de SmCo SB1 com polo quadrado..... | 112 |
| Figura 5-9 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 3 mm com ímã de SmCo SB1 com polo tronco de pirâmide..... | 112 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 5-10 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 5 mm com ímã NdFeB NB1; (a) Com polo quadrado; e (b) Com polo tronco de pirâmide..... | 113 |
| Figura 5-11 | Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de NdFeB NB1 com circuito magnético fechado, (a) Sem corrente magnetizante; (b) Com corrente..... | 113 |
| Figura 5-12 | Configuração de determinação da permeabilidade de retorno, circuito magnético fechado ($l_g = 0$) e bobinas magnetizadoras com corrente reduzida..... | 114 |
| Figura 5-13 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 2 mm com ímã cerâmico FB2; (a) Com polo quadrado; e (b) Com polo tronco de pirâmide..... | 114 |
| Figura 5-14 | Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de Ferrite FB2 com circuito magnético fechado, (a) Sem corrente magnetizante; (b) Com corrente..... | 115 |
| Figura 5-15 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 6 mm com ímã de SmCo SB2 com polo tronco de pirâmide..... | 115 |
| Figura 5-16 | Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes posições do polo superior móvel no teste do ímã de NdFeB NB2..... | 116 |
| Figura 5-17 | Densidade de fluxo magnético num entreferro de 6 mm com ímã NdFeB NB2; (a) Com polo quadrado; e (b) Com polo tronco de pirâmide..... | 116 |
| Figura 6-1 | Condições de contorno entre dois materiais diferentes..... | 123 |
| Figura 6-2 | Vista tridimensional do entreferro com as regiões que participam na análise matemática do modelo analítico do HEV..... | 125 |
| Figura 6-3 | Vista bi-dimensional do entreferro do HEV..... | 126 |
| Figura 6-4 | Curvas da densidade de fluxo magnético no entreferro em 2D para dez valores de l_g desde 1 até 10 mm..... | 133 |
| Figura 6-5 | B_{gy} em 3D nas mesmas condições que na figura anterior para um entreferro de 1 mm..... | 134 |
| Figura 7-1 | Ímãs permanentes usados como padrões..... | 135 |
| Figura 7-2 | Ímãs permanentes usados nos testes..... | 136 |
| Figura 7-3 | Sensibilidade da sonda Hall em x e z para o ímã NB1..... | 139 |
| Figura 7-4 | Sensibilidade da sonda Hall em y para o ímã NB1..... | 140 |
| Figura 7-5 | Sensibilidade da sonda Hall com mudanças em θ para o ímã NB1.. | 141 |
| Figura 7-6 | Medição de B_g e cálculos na posição 1 para NC2..... | 143 |
| Figura 7-7 | Distribuição percentual das incertezas na medição de B_g | 146 |
| Figura 8-1 | Dados de medição e cálculo na posição 1 na determinação de B_{re} ... | 149 |
| Figura 8-2 | Medições corrigidas de três amostras, os valores V.V.C. e a necessidade de extrapolação para determinar a densidade de fluxo magnético remanente estimado B_{re} | 152 |
| Figura 8-3 | Tentativa de ajuste polinômico. Instabilidade para valores fora do intervalo, excessivo IC..... | 156 |
| Figura 8-4 | Ajuste não linear para o ímã NB1 na determinação do B_{re} | 159 |
| Figura 8-5 | Qualidade do ajuste para o ímã NB1 na determinação do B_{re} | 159 |
| Figura 8-6 | Distribuição das incertezas na determinação de B_{re} | 162 |
| Figura 8-7 | Ajuste não linear ponderado para o ímã NB3 na determinação do B_{re} | 164 |
| Figura 8-8 | Qualidade do ajuste para o ímã NB3 na determinação do B_{re} | 164 |
| Figura 8-9 | Ajuste não linear para o ímã NC1 na determinação do B_{re} | 166 |

| | | |
|-------------|--|-----|
| Figura 8-10 | Qualidade do ajuste para o ímã NC1 na determinação do B_{re} | 166 |
| Figura 8-11 | Ajuste não linear para o ímã SC2 na determinação do B_{re} | 167 |
| Figura 8-12 | Qualidade do ajuste para o ímã SC2 na determinação do B_{re} | 168 |
| Figura 8-13 | Ajuste não linear para o ímã SB1 na determinação do B_{re} | 169 |
| Figura 8-14 | Qualidade do ajuste para o ímã SB1 na determinação do B_{re} | 169 |
| Figura 8-15 | Ajuste não linear para o ímã FB2 na determinação do B_{re} | 171 |
| Figura 8-16 | Qualidade do ajuste para o ímã FB2 na determinação do B_{re} | 171 |
| Figura 8-17 | Segundo quadrante ou característica desmagnetizante do ímã FB2.. | 172 |
| Figura 9-1 | Comparação de determinação de B_r mediante simulação, analítico e experimental na amostra FB2..... | 175 |
| Figura 9-2 | Comparação de determinação de B_r mediante simulação, analítico e experimental na amostra SB2..... | 176 |
| Figura 9-3 | Comparação de determinação de B_r mediante simulação, analítico e experimental na amostra NB2..... | 176 |
| Figura 9-4 | Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) SB1 e (b) FB2..... | 178 |
| Figura 9-5 | Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) SC2 e (b) NB1..... | 178 |
| Figura 9-6 | Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) NC1 e (b) NB3..... | 179 |
| Figura 9-7 | Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) SB1; (b) SB2 e (c) SC1..... | 180 |
| Figura 9-8 | Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) SC2; (b) NB1 e (c) NB2..... | 180 |
| Figura 9-9 | Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) NB3; (b) NC1 e (c) NC2..... | 181 |
| Figura 9-10 | Comparação das incertezas na determinação de H_c para (a) FB2; (b) NB1 e (c) NB3..... | 182 |
| Figura 9-11 | Comparação das incertezas na determinação de $(BH)_{\max}$ para (a) NB2; (b) NC1 e (c) NC2..... | 183 |
| Figura 9-12 | Comparação das incertezas na determinação de $(BH)_{\max}$ para (a) SB2; (b) SC1 e (c) SC2..... | 183 |
| Figura A1-1 | Circuito eletrônico integrador Miller..... | 191 |
| Figura A1-2 | Configuração de duas bobinas de igual produto área espiras e dois fluxímetros..... | 192 |
| Figura A1-3 | Configuração de duas bobinas em série oposição, igual produto área espiras com único fluxímetro..... | 193 |
| Figura A1-4 | Configuração de duas bobinas ao redor do ímã com dois fluxímetros..... | 194 |
| Figura A2-1 | Sistema de magnetização e desmagnetização do HEV..... | 197 |
| Figura A2-2 | Circuito elétrico de magnetização e desmagnetização do HEV..... | 197 |
| Figura A2-3 | Corrente alternante decrescente de desmagnetização do HEV..... | 198 |
| Figura A3-1 | Comparação dos efeitos no gráfico com a discretização do eixo x. fluxímetros..... | 200 |
| Figura A3-2 | Comparação dos efeitos no gráfico com diferente quantidade de termos na dupla série de Fourier..... | 200 |
| Figura A3-3 | Efeito do número de termos no valor de B no centro geométrico.... | 201 |
| Figura A5-1 | Análise por inspeção de uma curva..... | 209 |
| Figura A5-2 | Incorporação do modelo..... | 210 |
| Figura A5-3 | Utilização do Solver para otimizar a soma dos quadrados..... | 210 |

| | | |
|---------------|--|-----|
| Figura A5-4 | Ajuste da curva com modelo racional e mínimos quadrados..... | 211 |
| Figura A6-1 | Dados das medições e código m..... | 213 |
| Figura A6-2 | Primeira fase na utilização do cftool..... | 213 |
| Figura A6-3 | Segunda fase na utilização do cftool..... | 214 |
| Figura A6-4 | Terceira fase na utilização do cftool..... | 214 |
| Figura A6-5 | Quarta fase na utilização do cftool..... | 215 |
| Figura A6-6 | Quinta fase na utilização do cftool..... | 215 |
| Figura An1-1 | Histerisímetro modelo AMH-300..... | 219 |
| Figura An1-2 | Especificações técnicas principais do AMH-300..... | 219 |
| Figura An1-3 | Especificações técnicas da alimentação de energia elétrica do AMH-300..... | 220 |
| Figura An1-4 | Especificações técnicas dos fluxímetros do AMH-300..... | 220 |
| Figura An1-5 | Especificações técnicas dos polos do AMH-300..... | 220 |
| Figura An1-6 | Especificações técnicas da excitação das bobinas dos polos do AMH-300..... | 220 |
| Figura An1-7 | Bobinas compensadas para diferentes dimensões das amostras..... | 221 |
| Figura An1-8 | Estratégias e métodos de medição do instrumento..... | 221 |
| Figura An2-1 | Dados da amostra FB1, corrida 1..... | 223 |
| Figura An2-2 | Dados da amostra FB1, corrida 2..... | 223 |
| Figura An2-3 | Dados da amostra FB2, corrida 1..... | 224 |
| Figura An2-4 | Dados da amostra FB2, corrida 2..... | 224 |
| Figura An2-5 | Dados da amostra FB2, corrida 3..... | 225 |
| Figura An2-6 | Dados da amostra FC1, corrida 1..... | 225 |
| Figura An2-7 | Dados da amostra FC1, corrida 2..... | 226 |
| Figura An2-8 | Dados da amostra NB1, corrida 1..... | 226 |
| Figura An2-9 | Dados da amostra NB1, corrida 2..... | 227 |
| Figura An2-10 | Dados da amostra NB2, corrida 1..... | 227 |
| Figura An2-11 | Dados da amostra NB2, corrida 2..... | 228 |
| Figura An2-12 | Dados da amostra NB3, corrida 1..... | 228 |
| Figura An2-13 | Dados da amostra NB3, corrida 2..... | 229 |
| Figura An2-14 | Dados da amostra NC1, corrida 1..... | 229 |
| Figura An2-15 | Dados da amostra NC1, corrida 2..... | 230 |
| Figura An2-16 | Dados da amostra NC2, corrida 1..... | 230 |
| Figura An2-17 | Dados da amostra NC2, corrida 2..... | 231 |
| Figura An2-18 | Dados da amostra SB1, corrida 1..... | 231 |
| Figura An2-19 | Dados da amostra SB1, corrida 2..... | 232 |
| Figura An2-20 | Dados da amostra SB2, corrida 1..... | 232 |
| Figura An2-21 | Dados da amostra SB2, corrida 2..... | 233 |
| Figura An2-22 | Dados da amostra SC1, corrida única..... | 233 |
| Figura An2-23 | Dados da amostra SC2, corrida única..... | 234 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|-----|
| Tabela 2-1 | Comparação de permeâmetros segundo a norma ASTM A341..... | 31 |
| Tabela 2-2 | Evolução da coercitividade dos materiais..... | 33 |
| Tabela 2-3 | Campo magnetizante de saturação para materiais magnéticos..... | 34 |
| Tabela 3-1 | Susceptibilidade e permeabilidade relativa de materiais usuais..... | 43 |
| Tabela 3-2 | Algumas propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos macios..... | 48 |
| Tabela 3-3 | Algumas propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos duros..... | 49 |
| Tabela 3-4 | Efeito da temperatura nos ímãs..... | 55 |
| Tabela 3-5 | Comparação de valores de sensibilidade para diferentes materiais geradores Hall..... | 64 |
| Tabela 3-6 | Entreferos para diferentes tipos de amostras e comprimentos..... | 73 |
| Tabela 5-1 | Detalhe dos laços de cálculo para atingir 0,5% de exatidão na energia..... | 106 |
| Tabela 5-2 | Densidade de fluxo magnético no centro geométrico dos ímãs, em Tesla..... | 109 |
| Tabela 5-3 | Coefficientes das curvas de ajuste polinomial de sexta ordem para os ímãs NB1; SB1; e NB1..... | 109 |
| Tabela 5-4 | Parâmetros dos ímãs estimados por simulação..... | 117 |
| Tabela 6-1 | Densidade de fluxo analítico no entreferro para diferentes valores de l_g | 133 |
| Tabela 7-1 | Ímãs permanentes usados como padrão de ajuste, descrição física... | 136 |
| Tabela 7-2 | Ímãs permanentes usados como padrão de ajuste, descrição magnética..... | 136 |
| Tabela 7-3 | Ímãs permanentes usados nos testes, descrição física..... | 137 |
| Tabela 7-4 | Ímãs permanentes usados nos testes, descrição magnética..... | 137 |
| Tabela 7-5 | Instrumentos utilizados nos testes com o HEV..... | 137 |
| Tabela 7-6 | Especificações dos instrumentos utilizados nos testes com o HEV.. | 138 |
| Tabela 7-7 | Aparatos e elementos acessórios usados nos testes com o HEV..... | 138 |
| Tabela 7-8 | Dados das medições afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NC2)..... | 146 |
| Tabela 7-9 | Correção do entreferro para as diferentes amostras..... | 148 |
| Tabela 8-1 | Dados das medições afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NB1)..... | 150 |
| Tabela 8-2 | Dados das medições corrigidos e afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NB1)..... | 151 |
| Tabela 8-3 | Dados das medições em circuito magnético fechado na amostra NB1..... | 161 |
| Tabela 8-4 | Comparação das medições na amostra NB1..... | 163 |

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela 8-5 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NB1..... | 163 |
| Tabela 8-6 | Comparação das medições na amostra NB3..... | 165 |
| Tabela 8-7 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NB3..... | 165 |
| Tabela 8-8 | Comparação das medições na amostra NC1..... | 165 |
| Tabela 8-9 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NC1..... | 167 |
| Tabela 8-10 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra SC2..... | 167 |
| Tabela 8-11 | Comparação das medições na amostra SC2..... | 168 |
| Tabela 8-12 | Comparação das medições na amostra SB1..... | 170 |
| Tabela 8-13 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra SB1..... | 170 |
| Tabela 8-14 | Comparação das medições na amostra FB2..... | 170 |
| Tabela 8-15 | Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra FB2..... | 172 |
| Tabela 9-1 | Comparação numérica das amostras na determinação do B_r | 177 |
| Tabela 9-2 | Comparação numérica das amostras na determinação do μ_r | 179 |
| Tabela 9-3 | Comparação numérica das amostras na determinação do H_c | 181 |
| Tabela 9-4 | Comparação numérica das amostras na determinação do $(BH)_{\max}$ | 182 |
| Tabela A3-1 | Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes números de termos da dupla série de Fourier..... | 201 |
| Tabela A4-1 | Dimensões da amostra NB1..... | 203 |
| Tabela A4-2 | Planilha de incertezas dimensionais de uma amostra..... | 217 |
| Tabela A7-1 | Planilha de incertezas na determinação da permeabilidade de retorno de uma amostra..... | 218 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| Abreviatura ou sigla | Extenso |
|----------------------|---|
| A | Ampere |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| AlNiCo | Ímã permanente de Alumínio Níquel Cobalto |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CA | Corrente alternada. |
| CC | Corrente contínua. |
| CODATA | Committee on Data for Science and Technology |
| Cunife | Liga de 60% de Cu, 20% de Ni e 20% de Fe. |
| EDA | Electronic Design Automation Tool |
| F | Farad |
| FB1 | Ímã permanente de Ferrite tipo Bloco de 5 mm de espessura |
| FB2 | Ímã permanente de Ferrite tipo Bloco de 10 mm de espessura |
| FC1 | Ímã permanente de Ferrite tipo Cilíndrico de 5 mm de espessura |
| FDM | Finite Difference Method |
| Fe-Co | Liga de Ferro Cobalto |
| f.e.m. | Força eletro motriz |
| f.m.m. | Força magneto motriz |
| FQ | Fator de quadratura |
| GUM | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement |
| H | Henry |
| HEV | Histerisímetro de entreferro variável |
| IC | Intervalo de confiança. |
| IEC | International Electrotechnical Commission |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| IPT | Instituto de Pesquisas Tecnológicas |
| LMEAE | Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia |
| Lodex | Liga de Pb-Co-Fe também conhecida como ESD. |
| LVDT | Linear Variable Differential Transformer |
| MEF | Método de Elementos Finitos |
| MOM | Method of Moments |
| NB1 | Ímã permanente de NdFeB bloco de 5 mm de espessura |
| NB2 | Ímã permanente de NdFeB bloco de 10 mm de espessura |
| NB3 | Ímã permanente de NdFeB bloco de 8 mm de espessura |
| NC1 | Ímã permanente de NdFeB cilíndrico de 5 mm de espessura |
| NC2 | Ímã permanente de NdFeB cilíndrico de 10 mm de espessura |
| NdFeB | Neodímio Ferro Boro |
| NI | National Instruments |
| NIST | National Institute of Standards and Technology |
| Permalloy | Liga metálica com 70% a 90% de Níquel e o restante Ferro. |

| | |
|----------|---|
| PFM | Pulsed Field Magnetometer |
| PIB | Produto Interno Bruto |
| PtCo | Platina Cobalto |
| Q80 | Polo quadrado de 80 mm de lado. |
| Remalloy | Liga de Fe-Co-Mo também conhecida como Comol. |
| SAE | Society of Automotive Engineers |
| SB1 | Ímã permanente de SmCo bloco de 5 mm de espessura |
| SB2 | Ímã permanente de SmCo bloco de 10 mm de espessura |
| SC1 | Ímã permanente de SmCo cilíndrico de 5 mm de espessura |
| SC2 | Ímã permanente de SmCo cilíndrico de 10 mm de espessura |
| SI | Sistema Internacional de Unidades |
| SmCo | Samário Cobalto |
| T | Tesla |
| TC254 | Polo tronco de cone de 25,4 mm de diâmetro. |
| TP254 | Polo tronco de pirâmide de 25,4 mm de lado. |
| TP40 | Polo tronco de pirâmide de 40 mm de lado. |
| UFRGS | Universidade Federal do Rio Grande do Sul |
| UKAS | United Kingdom Accreditation Service |
| V | Volt |
| VI | Virtual Instrument |
| V.V.C. | Valor Verdadeiro Convencional |
| Wb | Weber (unidade de fluxo magnético no SI) |

LISTA DE SÍMBOLOS

| Símbolo | Nome |
|-----------------|--|
| A_b | Área média da bobina exploradora. |
| A_m | Área polar do ímã permanente. |
| \vec{B} | Vetor densidade de fluxo magnético |
| B_a | Densidade de fluxo magnético de máximo produto energético (no ímã). |
| B_{gv}^a | Densidade de fluxo magnético no entreferro determinada analiticamente. |
| B_g | Densidade de fluxo magnético no entreferro determinado experimentalmente. |
| B_{gv}^s | Densidade de fluxo magnético no entreferro determinada por simulação. |
| B_m | Densidade de fluxo magnético no ímã permanente |
| B_r | Densidade de fluxo magnético remanente do ímã permanente Valor Verdadeiro Convencional (V.V.C.). |
| B_{re}^a | Densidade de fluxo magnético remanente estimada analiticamente. |
| B_{re} | Densidade de fluxo magnético remanente estimada experimentalmente. |
| B_{reinf} | Densidade de fluxo magnético remanente inferior (aplicando o IC no ajuste). |
| B_{resup} | Densidade de fluxo magnético remanente superior (aplicando o IC no ajuste). |
| B_{re}^s | Densidade de fluxo magnético remanente estimada com simulação. |
| B_{rem} | Densidade de fluxo magnético remanente existente no entreferro sem ímã. |
| B_n | Componente normal da densidade de fluxo magnético. |
| B_x | Componente x da densidade de fluxo magnético. |
| B_y | Componente y da densidade de fluxo magnético. |
| B_z | Componente z da densidade de fluxo magnético. |
| C | Capacitor do integrador Miller do circuito fluximétrico. |
| C_f | Fator de franjamento ou espraçamento. |
| \vec{E} | Vetor intensidade de campo elétrico |
| \vec{H} | Vetor intensidade de campo magnético |
| H_a | Intensidade de campo magnético de máximo produto energético (no ímã). |
| H_c | Campo magnético coercitivo V.V.C. |
| H_{ca} | Ver $H_{caparente}$. |
| $H_{caparente}$ | Campo magnético coercitivo aparente determinado com o HEV (caso o ímã a-presente joelho no segundo quadrante). |
| H_{ci} | Coercitividade intrínseca |
| H_{ce}^s | Coercitividade normal estimada por simulação. |
| H_{ce} | Coercitividade normal estimada experimentalmente. |
| H_{kB} | Intensidade de campo magnético do início do joelho de $B(H)$. |
| H_k | Ver H_{ki} . |
| H_{ki} | Intensidade de campo magnético para $0,9J_s$ em $J(H)$. |
| H_m | Intensidade de campo magnético no ímã permanente |
| H_t | Componente tangencial da intensidade de campo magnético. |

| | |
|--------------------------|---|
| H_x | Componente x da intensidade de campo magnético. |
| H_y | Componente y da intensidade de campo magnético. |
| H_z | Componente z da intensidade de campo magnético. |
| IC | Intervalo de confiança. |
| \vec{J} ou \vec{J}_M | Vetor polarização magnética ou indução intrínseca. |
| J_s | Polarização magnética de saturação. |
| J_x | Componente x da polarização magnética. |
| J_y | Componente y da polarização magnética. |
| J_z | Componente z da polarização magnética. |
| K_2 | Fator de queda magnética no aço da culatra. |
| l_c | Comprimento da culatra nos eixos x e z . |
| l_g | Comprimento do entreferro. |
| l_m | Comprimento do ímã quadrado nos eixos x e z . |
| l_{my} | Comprimento do ímã através do seu eixo de magnetização. |
| L_f | Fator de fluxo disperso. |
| m | Número de coeficientes ajustados (no cálculo de graus de liberdade residual). |
| M_r | Magnetização de remanência. |
| M_s | Magnetização de saturação. |
| n | Número de valores da resposta (no cálculo de graus de liberdade residual). |
| N_b | Número de espiras da bobina exploradora. |
| p_1 | Coefficiente de ajuste racional (termo constante do numerador). |
| R | Resistor do integrador Miller do circuito fluximétrico. |
| q_1 | Coefficiente de ajuste racional (termo constante do denominador). |
| R_{adj}^2 | Quadrado da correlação ajustada com os graus de liberdade residuais. |
| $RMSE$ | Raiz do erro médio quadrático. |
| SSE | Soma do erro quadrático. |
| SSR | Soma dos quadrados da regressão. |
| SST | Soma total dos quadrados. |
| u | Incerteza. |
| u_c | Incerteza combinada. |
| U | Incerteza expandida. |
| χ_m | Susceptibilidade magnética |
| Δl_g | Correção no comprimento do entreferro no ajuste do HEV. |
| Δu_0 | Tensão de saída do circuito fluximétrico. |
| ϕ | Fluxo magnético. |
| μ_0 | Permeabilidade do vácuo |
| μ | Permeabilidade de um material |
| μ_r | Permeabilidade de retorno V.V.C. |
| μ_{rel} | Permeabilidade relativa de um material |
| μ_{re}^s | Permeabilidade de retorno estimada por simulação |
| μ_{re} | Permeabilidade de retorno estimado experimentalmente. |
| ν | Graus de liberdade residual. |
| ν_{eff} | Graus efetivos de liberdade. |
| ρ_m | Densidade volumétrica de carga. |
| σ_{sm} | Densidade de carga magnética superficial. |

- Ψ Potencial escalar magnético.
- $(BH)_{\max}$ Máximo produto energético V.V.C.
- $(BH)_{\max}^s$ Máximo produto energético, estimacão obtida por simulacão.
- $(BH)_{\max}^e$ Máximo produto energético, estimacão obtida por ensaio experimental.

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas tradicionais utilizados na caracterização de ímãs permanentes são complexos, caros e podem requer quantidades relativamente elevadas de energia elétrica. Em 2005, o Laboratório de Máquinas Elétricas, Acionamentos e Energia, LMEAE, da UFRGS, iniciou estudos para o desenvolvimento de um sistema com características construtivas e de operação mais simples em relação aos modelos existentes. O estudo resultou no projeto, construção e análise de um sistema para caracterização de ímãs permanentes, o HEV1. Este primeiro protótipo está apresentado na Figura 1-1. Os resultados desse estudo foram incluídos em (ANOCIBAR, 2007; FLORES FILHO, ANOCIBAR, 2008; ANOCIBAR, FLORES FILHO, HOMRICH, 2009) e resultou num pedido de patente (UFRGS, 2009).

O primeiro protótipo do HEV possuía limitações quanto ao tamanho de amostras a caracterizar; assim, visando uma maior abrangência em relação aos tipos de ímãs permanentes que podem ser caracterizados, desenvolveu-se o estudo para a construção de um segundo protótipo discutido nesta tese.

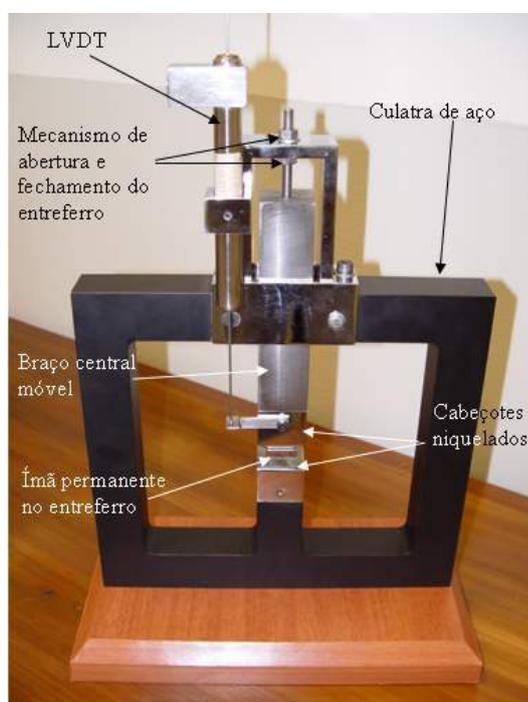


Figura 1-1. Primeiro protótipo do Histerisímetro¹ de Entreferro Variável.

¹ As palavras em itálico e sublinhadas têm sua correspondente definição no Glossário.

O presente trabalho apresenta o estudo, o projeto, a construção e os testes do segundo protótipo do HEV (FLORES FILHO, ANOCIBAR, 2010). O dispositivo é apresentado na Figura 1-2; na Figura 1-3 se observa a configuração de caracterização com os instrumentos e acessórios utilizados.

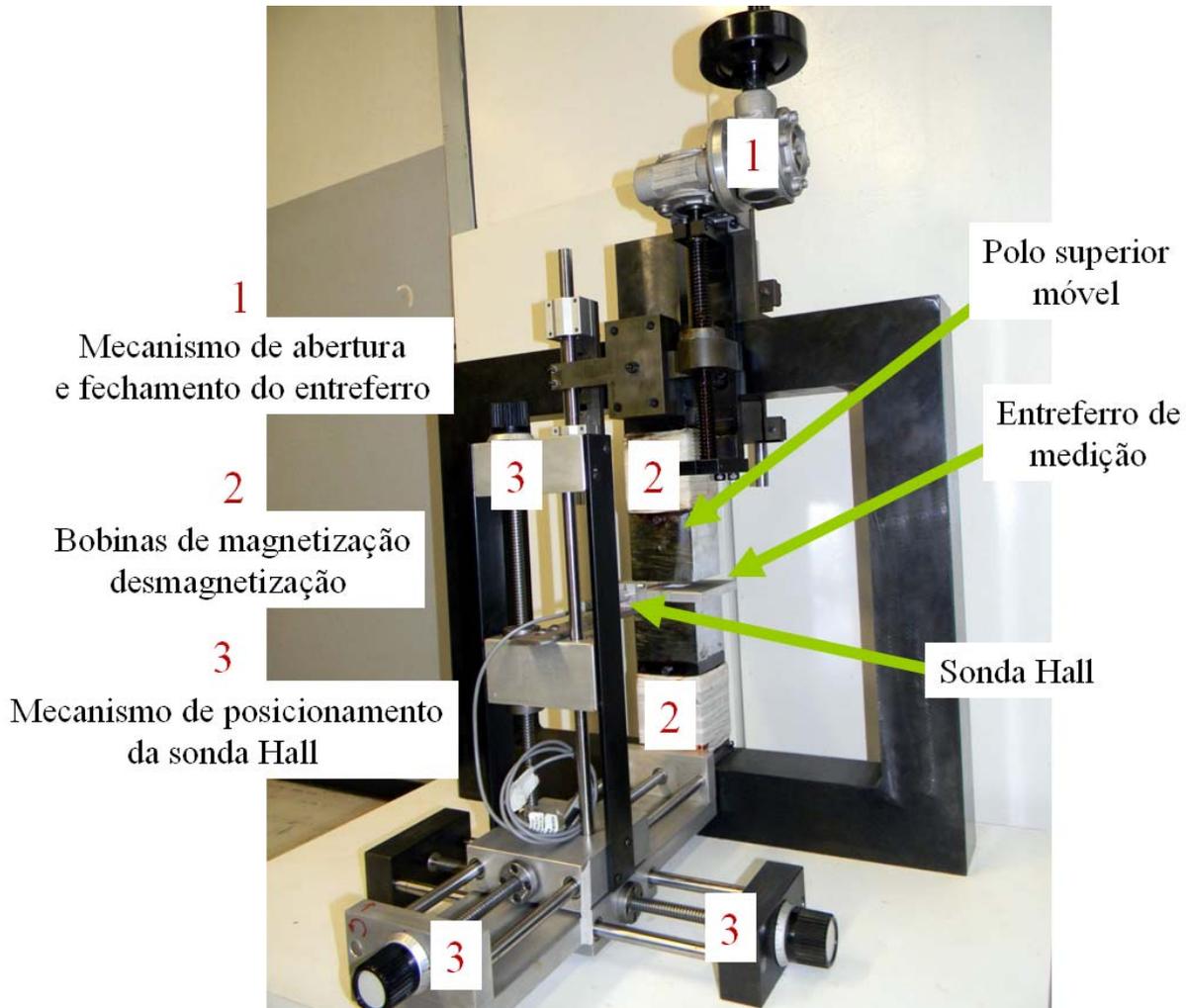


Figura 1-2. Segundo protótipo do Histerisímetro de Entreferro Variável.

O emprego do novo sistema de caracterização desenvolvido está restrito aos ímãs permanentes que já estejam em seu formato definitivo e magnetizados, ou seja, àqueles ímãs permanentes prontos para serem utilizados.

Os ímãs permanentes deverão ter, ainda, formato retangular ou cilíndrico e apresentar característica de desmagnetização linear na condição de teste, como os ímãs permanentes de Terras Raras de Neodímio–Ferro–Boro, Samário–Cobalto e os Cerâmicos.

Como condição final, a caracterização dos ímãs permanentes deve ser realizada à temperatura ambiente.

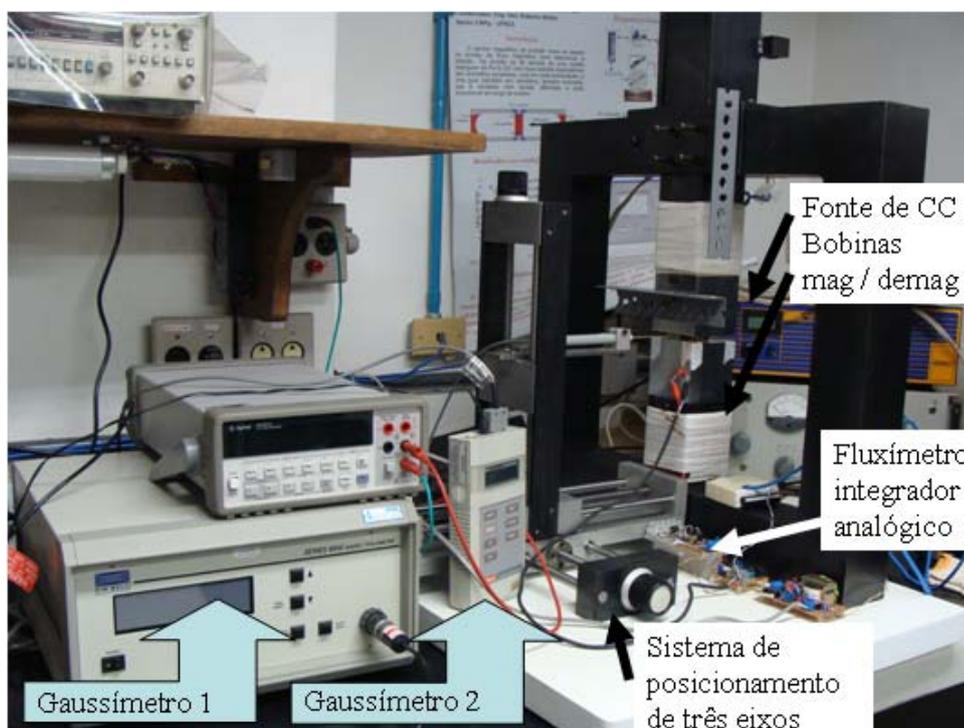


Figura 1-3. Configuração de medição com o Histerisímetro de Entreferro Variável.

Este trabalho foi desenvolvido completamente no Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamentos e Energia (LMEAE), da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e teve os seguintes objetivos:

1. Estudar uma nova proposta de histerisímetro para ímãs permanentes que permitisse caracterizar amostras com desmagnetização linear à temperatura ambiente e sem desmagnetização irreversível.
2. Desenvolver e projetar o sistema de medição, com definição das características construtivas do circuito magnético e da metodologia de medição empregada.
3. Estudar o comportamento do circuito magnético através de simulação pelo Método dos Elementos Finitos (MEF). Desenvolver diferentes modelos para sua correspondente análise numérica.
4. Desenvolver um modelo analítico a partir das equações dos potenciais magnéticos, para a análise estática do histerisímetro e obter uma expressão da distribuição da densidade de fluxo magnético.

5. Implementar o histerisímetro, tanto na construção do circuito magnético como no método de medição.
6. Caracterizar diferentes tipos de ímãs permanentes, tanto em termos de geometria como em termos de tipos.
7. Avaliar os resultados comparando com os valores obtidos em laboratório credenciado.
8. Efetuar análise de incertezas do método de medição mediante *avaliação de Tipo A* (estatística) e *Tipo B* (não estatística) que permita apresentar e reportar os valores conforme as normas.

Este trabalho está estruturado em nove capítulos. O Capítulo 2 apresenta os métodos tradicionais usados na caracterização de ímãs permanentes, dando ênfase ao método padrão: o Histeresímetro ou *Permeâmetro*. No final desse capítulo, é apresentado o Histerisímetro de Entreferro Variável (HEV) no que diz respeito a suas características básicas.

No Capítulo 3 é feita uma revisão dos principais conceitos referentes aos ímãs permanentes, aos circuitos magnéticos contendo esses dispositivos, aos conceitos dos instrumentos de medição utilizados (*gaussímetro* e *fluxímetro*) e ao tratamento dos dados das medições.

No Capítulo 4 é apresentado o HEV no que diz respeito a suas características construtivas e de funcionamento.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados da simulação por elementos finitos.

No Capítulo 6 é desenvolvido o modelo analítico da densidade de fluxo magnético no entreferro.

No Capítulo 7 são apresentadas as condições prévias às medições: ajuste do HEV com ímãs padrões, os dados das amostras, dos instrumentos e determinação dos coeficientes de sensibilidade do gaussímetro.

No Capítulo 8 são apresentados os resultados das medições sobre amostras de teste, a análise dos dados e as comparações feitas com os dados dos ímãs obtidos por histerisímetro de laboratório credenciado. A correspondente análise de incertezas é feita neste capítulo.

No Capítulo 9 são apresentadas as conclusões do estudo e da aplicação do HEV na caracterização de ímãs permanentes.

2 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA DOS MATERIAIS

Os ímãs permanentes e as medições relacionadas a eles estão presentes em uma grande parte da vida moderna. Os materiais magnéticos são peças indispensáveis no complexo mundo industrial e são fundamentais na satisfação da demanda básica de aplicações essenciais como geração/distribuição/conversão de energia, armazenamento e recuperação de informação, complexos sistemas na medicina, para mencionar somente algumas. Com seu uso em tantas aplicações críticas, estes materiais desempenham um papel crucial na vida diária e o presente ritmo de pesquisa apresenta boas razões para se crer que sua importância continuará crescendo. Estima-se que o mercado global de ímãs permanentes para 2020 terá uma valorização de aproximadamente US\$ 20 bilhões (LONDON, 2009).

Assim como os materiais magnéticos são importantes, não menos são as medições envolvendo os mesmos. Medições, testes e ensaios para caracterização são indispensáveis na ciência, indústria e no comércio, e são pré-requisitos para qualquer desenvolvimento na produção e comercialização de bens. Toda nação que procura seu desenvolvimento industrial investe nesta área na criação/desenvolvimento/crescimento de instituições especializadas, tais como INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas) e as *redes metrológicas*, que precisam desenvolver/manter os padrões.

Dentro da grande área das medições, as magnéticas podem ser consideradas uma das mais complexas, por vezes confusas e até pobremente compreendidas se comparadas às especificações dos instrumentos para medidas elétricas no mesmo nível de investimento (CULLITY, 1972). Os aspectos principais que contribuem para a dificuldade nas medições magnéticas vêm da impossibilidade de medição direta do campo magnético e pelo fato de que o ar não é um “isolante” magnético como ocorre nos circuitos elétricos.

A caracterização de um material consiste em determinar parâmetros que o identificam ou descrevem para alguma utilidade. Neste trabalho, que trata da caracterização magnética de ímãs permanentes, o objetivo consiste em determinar características ou parâmetros magnéticos que distinguem uma amostra. Baseados nesse objetivo é que serão apresentados os diferentes métodos e instrumentos utilizados, dando ênfase no que se refere à caracterização de produtos comerciais, ou seja, ímãs prontos e já preparados para seu uso.

2.1 Evolução da caracterização magnética dos materiais

Sócrates (470-399 a.C.) já havia escrito sobre a magnetita e seus efeitos. Mas quem demonstrou ser experimentador, pesquisador e entusiasta pela instrumentação e medições foi Pierre de Maricourt, conhecido como Petrus ou Peter Peregrinus. Em sua “Epistola de magnete” em 1269 escreveu a primeira descrição conhecida de uma bússola magnética, explicou que pólos opostos se atraem, que pólos iguais se repelem, como identificar os pólos, que subdividindo uma porção de magnetita obtém-se um ímã completo, que um pólo forte pode neutralizar outro débil da mesma polaridade e ainda inverter sua polaridade (KEITHLEY, 1999). Seus escritos podem ser considerados o primeiro tratado científico escrito, surpreendentemente moderno em seu estilo.

William Gilbert (1544-1603) continuou estudando a magnetita, sempre muito interessado no magnetismo e na eletricidade, abordando estas áreas sistematicamente. Pode-se dizer que construiu o primeiro instrumento de agulha, que ele chamou “versorium”. O mais importante trabalho científico de Gilbert foi “De Magnete”, publicado em 1600. Nele são registradas as observações e experimentos em magnetismo e eletricidade.

2.1.1 Toróide ou anel de Rowland

Os primeiros laços de *histerese* foram medidos em um anel ou toróide bobinado como se vê na Figura 2-1.

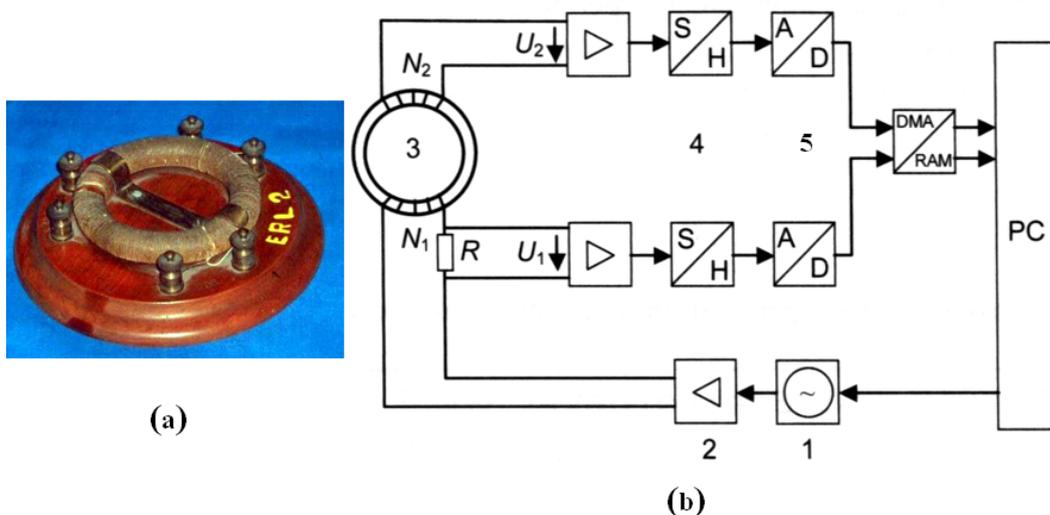


Figura 2-1. Método de Rowland para caracterização de materiais magnéticos, (a) Anel ou toróide de Rowland (PHYSICS.KENYON.EDU, 2011); (b) Configuração moderna de medição: 1 e 2 geração e amplificação da onda de excitação do primário N_1 ; 3 anel de caracterização; 4 subsistemas de medição (Amostragem e Retenção); 5 Conversão Analógica a Digital: o H é obtido da queda de tensão sobre R e o B é obtido de uma bobina exploradora (a modo de secundário) N_2 e logo enviado a um circuito fluximétrico (MAGNET-PHYSIK, 2010).

Rowland usou este método em 1873 (BOZORTH, 1993), sendo o primeiro a expressar os resultados de uma medição em um sistema absoluto. Este anel forma um solenóide fechado em si mesmo (toróide), e na ausência de entreferros, é suposta a inexistência de fluxo disperso; isso permite assumir que o fluxo interno ficará confinado totalmente no material ferromagnético sob teste. Este arranjo tem a vantagem que o material do núcleo do anel é magnetizado sem a formação de pólos, circunstância que simplifica a interpretação das medições (CULLITY, 1972).

Amostras em forma de anel, embora considerando todas as vantagens magnéticas (fluxo quase totalmente confinado na amostra, sem fluxo disperso, sem pólos magnéticos livres, etc.), também apresentam algumas desvantagens. Primeiro, os enrolamentos devem ser feitos em cada amostra a ser testada, e isso leva tempo. Segundo, algumas amostras não podem ser convertidas em anel, ou se podem, não se tem certeza de que as propriedades testadas são aplicáveis ao material como um todo e em outro formato. A menos que seja mantida na amostra uma relação adequada de diâmetros interior/exterior (raio médio do toróide muito maior que o raio do solenóide), a intensidade de campo magnético será excessivamente não-uniforme por todo o material, e os parâmetros medidos não podem ser representativos das propriedades do material. Considera-se que, para aquelas aplicações em que o material magnético é usado como toróide, este tipo de teste é um sistema muito adequado (FIORILLO, 2004).

2.1.2 Culatras e Permeâmetros

Os permeâmetros requerem o uso de culatras para completar o circuito magnético, portanto são considerados inerentemente menos precisos que o método do anel. Porém, quando devem ser testados certos materiais magnetizados de comprimento maior do que 0,254 m e que não é considerado apropriada a utilização desse material em forma de toróide, o permeâmetro se constitui no método mais adequado (ASTM A 341, 2005). Estes aparatos surgiram no fim dos anos 1800 e no início do século passado para caracterizar principalmente aços magnetizados. É composto por um circuito magnético provido com bobinas magnetizantes e de teste no qual o espécime pode ser inserido de maneira a formar parte do circuito.

A maioria dos permeâmetros tem elementos básicos em comum:

1. Um sistema de fechamento de circuito com perdas muito baixas, feito de material ferromagnético macio de alta permeabilidade, a fim de prover um encerramento do espécime com o menor entreferro e a menor queda de potencial magnético possível. Nas

versões de Koepsel e Esterline, os extremos da amostra são grampeados nas peças polares, assemelhando à configuração do instrumento *D'Arsonval*. Visto que não existe material que atue como isolante magnético, o circuito magnético deve ser disposto de tal maneira a produzir a maior uniformidade na distribuição da indução magnética ao longo de comprimento da amostra diretamente envolvida no teste (SANFORD, 1962).

2. Uma fonte primária de campo de CC muito estável, controlável e reversível que, junto com as bobinas apropriadas, cumpre a função de magnetizar o circuito magnético. A bobina magnetizadora primária envolve o espécime; adicionalmente, a maioria dos permeâmetros tem uma ou mais bobinados magnetizantes auxiliares localizados e controlados de tal maneira que seus campos compensem os inevitáveis entreferrros entre a amostra e a culatra, ou por perdas de *f.m.m.* na própria culatra (BOZORTH, 1993).
3. Medição de B com bobina exploradora sobre a região central da amostra usando fluxímetro e medição de H com alguma das seguintes opções: bobina exploradora ou uma sonda de efeito Hall posicionadas perto da amostra (dentro do campo magnético uniforme), e, nas configurações onde for apropriado, diretamente através da medição de corrente, calculando o número de espiras e o caminho magnético. Alguns utilizaram um sistema que muda a posição da bobina H (*flip coils*), permitindo fazer uma estimativa por extrapolação do campo na superfície da amostra.

Um dos primeiros permeâmetros foi o Burrows. Por muitos anos, este aparelho (também chamado permeâmetro compensado de dupla culatra) foi usado como instrumento padrão para o teste de varas retas, tanto em sua forma original como na modificação do Gokhale (SANFORD, WINTER, 1950).

Como ele é um instrumento absoluto (no sentido de que suas constantes são derivadas de suas próprias dimensões) dispensa calibração por referência com qualquer outro permeâmetro. Porém este é considerado complicado e tedioso de utilizar, requer duplicação de amostras (uma das quais é usada como auxiliar) e é bastante sensível aos efeitos da não uniformidade magnética ao longo do comprimento da amostra (SANFORD, WINTER, 1950).

Outros permeâmetros mencionados nas normas ASTM são: Babbitt, Fahy Simplex, High H, Médium H, e Illioviçi entre outros. A estrutura do permeâmetro Fahy Simplex pode ser resumida com a Figura 2-2.

Os testes com estes permeâmetros descritos na norma ASTM A341 permitem determinar as propriedades magnéticas de barras, varas, fios, fitas, tiras ou outros materiais na faixa

de intensidade de campo magnético desde 4 A/m (0,05 Oe) até 400 kA/m (5 kOe) como se observa na Tabela 2-1.

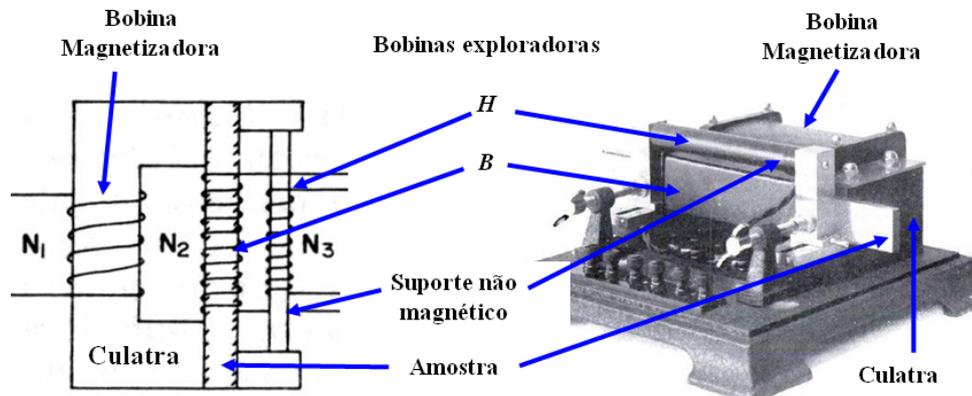


Figura 2-2. Permeâmetro de janela simples Fahy Simplex (ASTM A341, 2005).

Tabela 2-1. Comparação de permeâmetros segundo a norma ASTM A341.

| Permeâmetro | Intensidade de campo magnético útil (kA/m) | Medição de H | Compensação de relutância | Bobina magnetizadora rodeia o espécime |
|---------------------|--|--------------|---------------------------|--|
| Babbitt | 3,2 a 80 | I, BHF | Sim | Sim |
| Burrows | 0,008 a 24 | I | Sim | Sim |
| Fahy Simplex | 0,008 a 24 | BHF | Não | Não |
| High H | 8 a 400 | FC | Sim | Não |
| IEC tipo B | 0,008 a 50 | BRC | Não | Não |
| Iliovici | 0,04 a 400 | I, BHF | Sim | Sim |
| Isthmus | 8 a 1600+ | BHF, SH | Não | Não |
| MH | 0,008 a 24 | FC | Sim | Sim |

I é corrente magnetizante, BHF é bobina H fixa, FC é flip coil, BRC é bobina Rogowski-Chattock, e SH é sonda Hall.

Em geral, os permeâmetros não apresentam campos magnéticos uniformes em torno da amostra. Os gradientes dependerão dos diferentes tipos de permeâmetros. Também as bobinas exploradoras de B e H são, em geral, diferentes em área, número de espiras, comprimento, posicionamento, etc. Ainda que considerando uma boa preparação da amostra para apresentar uniformidade de secção e de encostamento nas superfícies polares, é quase impossível evitar as não uniformidades. Portanto, os resultados dos testes em diferentes permeâmetros podem ser diferentes.

Na maioria dos permeâmetros se observa simetria na construção do circuito magnético da culatra. Uma configuração de dupla janela tem demonstrado uma distribuição de fluxo apropriado a um sistema de caracterização como também a possibilidade mecânica de segurar o espécime. Das alternativas mencionadas na Tabela 2-1, pode-se destacar a opção de Sanford, que inclui determinação de H com um sistema de bobinas que mudam de posição para

depois realizar uma extrapolação e obter o campo magnético na superfície da amostra, Figura 2-3.

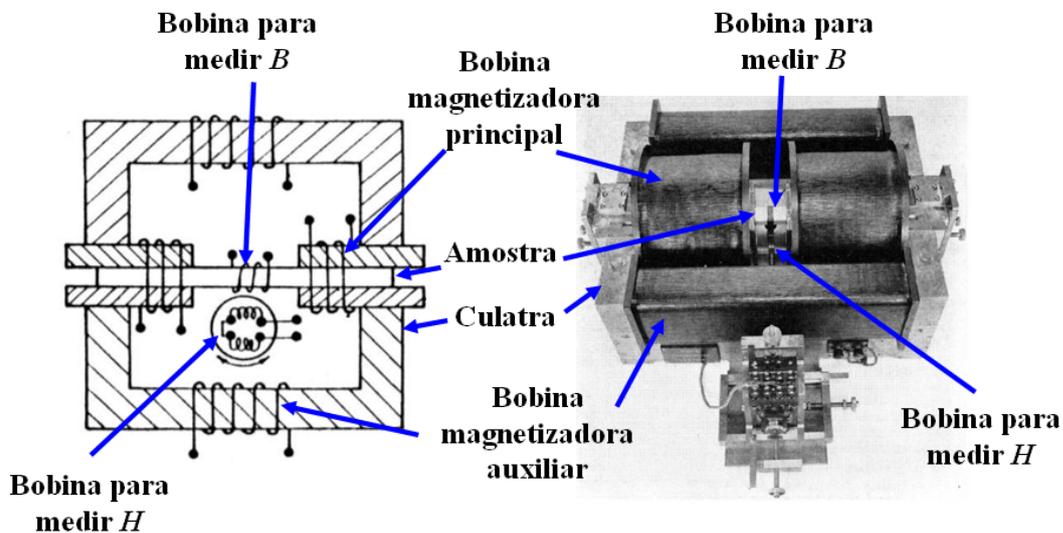


Figura 2-3. Permeâmetro de dupla janela Sanford-Bennett High-H (SANFORD, 1962). Bobinas H conectadas em série oposição e montadas em disco giratório (*flip-coils*).

2.1.3 Histerisímetros

Estes instrumentos não deixam de ser permeâmetros, mas com novas possibilidades que o avanço da tecnologia incorporou. As culatras utilizam materiais com maior permeabilidade e capacidade de concentração de fluxo magnético com nível de saturação mais elevado (FeCo, por exemplo), fluxímetros eletrônicos em lugar de *galvanômetros balísticos*, tratamento digital das medições para registro e visualização, e outros aspectos que melhoraram o desempenho dos permeâmetros antigos, mas não mudaram sua filosofia de funcionamento, Figura 2-4.

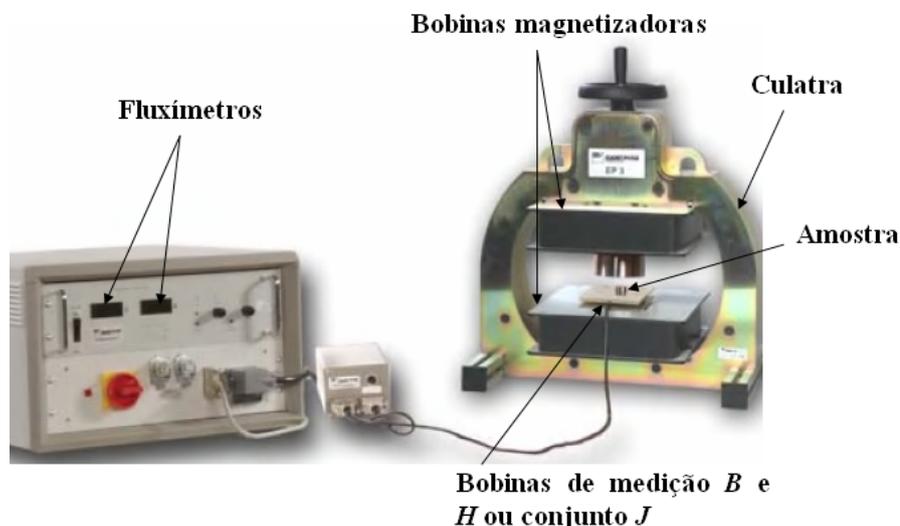


Figura 2-4. Histerisímetro com bobinas de medição no entreferro (STEINGROEVER, ROSS, 2008).

Uma diferença chave entre os permeâmetros mencionados em 2.1.2 que caracterizavam aços magnetizados e descritos na norma ASTM A341 é que os histerisímetros descritos na norma ASTM A977 já foram desenhados para ímãs permanentes com alta coercitividade e grande indução de saturação. Como consequência da grande mudança na coercitividade (ver Tabela 2-2) e, por conseguinte, no máximo produto energético, houve uma evidente redução de tamanho da amostra, o que mudou, em certa maneira, a topologia do circuito magnético do histerisímetro.

Tabela 2-2. Evolução da coercitividade dos materiais.

| Ímã permanente | Ano | H_{ci} (kA/m) |
|------------------------|------------|-----------------------------------|
| Aço magnetizado | 1890 | 1 |
| AlNiCo | 1955 | 100 |
| Cerâmico | 1960 | 200 |
| SmCo 1:5 | 1975 | 3000 |
| SmCo 2:17 | 1982 | 2000 |
| NdFeB | 1990 | 1500 |

Fonte: (Fidler, 2002).

Outra consequência foi que os ímãs de Terras Raras já não podem ser magnetizados no mesmo instrumento. Estes apenas conseguem reproduzir o segundo quadrante e alguns nem conseguem atingir a coercitividade intrínseca H_{ci} . Embora existam estas limitações, as duas normas internacionais para caracterização de ímãs permanentes são baseadas em circuito magnético fechado (permeâmetro), (IEC404-5, 1993; ASTM A997, 2007).

Este método é útil para ímãs com H_{ci} entre 8 kA/m e 2,8 MA/m, e densidade de fluxo magnético remanente do ímã B_r na faixa aproximada de 50 mT a 2 T. Como as amostras geralmente requerem campos magnetizantes muito maiores que os que o eletromagneto pode produzir sem saturação, eles devem ser pré-magnetizados externamente e depois transferidos ao entreferro de medição. Valores típicos de campo magnetizante requeridos para saturar materiais magnéticos são apresentados na Tabela 2-3.

A norma mencionada faz uma alerta, confirmando o caráter especificamente dificultoso das medições magnéticas: “Os testes obtidos ou levados a cabo em conformidade geral com este método (A977) e ainda no mesmo espécime, mas usando um sistema de teste diferente, pode não fornecer resultados idênticos”. As principais fontes de *discrepâncias* são variações entre os diferentes sistemas de teste na geometria da região ao redor da amostra, tais como, tamanho e forma dos pólos, entreferros nas faces do espécime, e, especialmente, o tamanho e posicionamento dos subsistemas de medição de H e B . O erro total de medição de J não deve ser maior que $\pm 2\%$ conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997.

Para obter as curvas de B ou J é preciso conhecer a intensidade de campo magnético H dentro do espécime. Como ele não pode ser medido diretamente, nem pode ser determinado em função de NI e do comprimento da amostra, deve ser determinado por um subsistema de medição. Na superfície do espécime, H é igual ao campo local justamente dentro da amostra naqueles setores onde o vetor H é paralelo à superfície da amostra. Por conseguinte, um sensor magnético de pequenas dimensões em relação à amostra deve ser posicionado ao lado da superfície do espécime e simetricamente com relação às faces polares, cobrindo a menor porção central possível da amostra. Deve estar orientado de tal modo que meça corretamente a componente tangencial do campo magnético (CULLITY, 1972).

Tabela 2-3. Campo magnetizante de saturação para materiais magnéticos (ASTM A977, 2007).

| Material | | Campo mínimo (kA/m) |
|---------------------------|------------|---------------------|
| MMPA | IEC | |
| Alnico 2, 3, isotrópico | R1-0-1 a 4 | 160 |
| Alnico 5, 6, anisotrópico | R1-1-1 a 4 | 240 |
| Alnico 8, 9, anisotrópico | R1-1-5 a 7 | 480 |
| PtCo | | 1500 |
| FeCo Cr 1 e 2 | R6 | 200 |
| FeCo Cr 250 | R6 | 80 |
| FeCo Cr | R6 | 80 |
| FeCo Cr 5 | R6 | 240 |
| Terra Rara Cobalto | R5-1 | 4000 |
| | R5-2 | 4000 |
| NdFeB | | 3200 |
| Cerâmico 1 (Ferrites) | S1-0-1 | 800 |
| Cerâmico 5 - 8 | S1-1-2 a 6 | 800 |

Para determinar a intensidade de campo magnético pode ser usada uma bobina plana superficial, uma bobina anular ajustada, um potenciômetro magnético ou uma sonda Hall. Todos eles devem ser posicionados dentro da área considerada como de campo uniforme (STEINGROEVER, GUNNAR, 2008; ASTM A977, 2007). Para ímãs de alta coercitividade é essencial usar bobina delgada (se possível, um quinto do comprimento magnético da amostra), centrada no espécime e tão ajustada à superfície como possível.

Sempre existem inevitáveis entreferros entre as faces da amostra e os pólos, como resultado da rugosidade superficial, imperfeição no paralelismo de ambos, ou por incluir mecanismos de proteção das peças para evitar deformação ou quebra da amostra. O erro total de medição de H não deve ser maior que $\pm 2\%$ conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997 (IEC404-5, 1993; ASTM A997, 2007).

O método preferido para calibração do histerisímetro utiliza um padrão de forma e tamanho similar à amostra a ser caracterizada. Níquel puro é uma referência excelente muito utilizada, pois o mesmo é magneticamente macio e facilmente saturável. Sua magnetização de saturação e dependência da temperatura são bem conhecidas, e tem um nível de indução de saturação na faixa da maioria dos ímãs permanentes.

As amostras a caracterizar devem ter formas simples como cilindros magnetizados na direção axial ou prisma retangular. As dimensões máximas dependem do eletromagneto; a dimensão mínima na direção da magnetização é de 5 mm. As faces polares devem ser paralelas uma à outra e perpendiculares ao eixo de magnetização. A seção transversal deve ser uniforme ao longo do comprimento de magnetização, qualquer variação deve ser menor que 1%. O erro das medições de dimensões deve ser mantido dentro do intervalo de $\pm 2\%$ conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997 (IEC404-5, 1993; ASTM A997, 2007).

A velocidade de variação do campo magnético deve ser suficientemente lenta para evitar distorção da característica como resultado de uma resposta retardada do B em relação à excitação H , mas deve ser suficientemente rápido para evitar erros devido ao tempo de integração e da deriva. Frequentemente, é útil providenciar uma variação de campo tal que a mudança seja rápida enquanto J permanece estável (com pouca variação), mas diminuir a velocidade quando a indução intrínseca passou pelo joelho da curva de magnetização e começa a mudar rapidamente tendendo ao H_{ci} . A duração da varredura do segundo quadrante recomendado é desde 15 s até vários minutos conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997 (IEC404-5, 1993; ASTM A997, 2007).

2.1.4 Magnetometria com Campo Pulsante (PFM)

Uma alternativa que satisfaz tanto o aspecto econômico como a necessidade de um campo magnético intenso é o Magnetômetro de Campo Magnético Pulsante. Sistemas experimentais reportam ter alcançado campos da ordem de 48 MA/m (600 kOe). A duração da medição é de uns poucos milissegundos com outros poucos segundos para o processamento dos dados (GRÖSSINGER, 1993; FIORILLO, 2007).

Em um magnetizador pulsante de alta corrente tem-se um solenóide dentro do qual a amostra é colocada; um pulso de corrente de curta duração é aplicado ao solenóide que deve gerar um campo magnético uniforme por todo o volume do espécime, Figura 2-5.

A duração do pulso magnetizante precisa satisfazer duas condições contraditórias: ser aplicado pelo máximo tempo possível sem sobre-aquecer o magnetizador e no tempo mais curto possível que não produza significativas correntes parasitas na amostra. Essas tendem a aquecê-la e, assim, produzir danos na microestrutura que irão afetar as características magnéticas da amostra (FLORES FILHO, 1996).

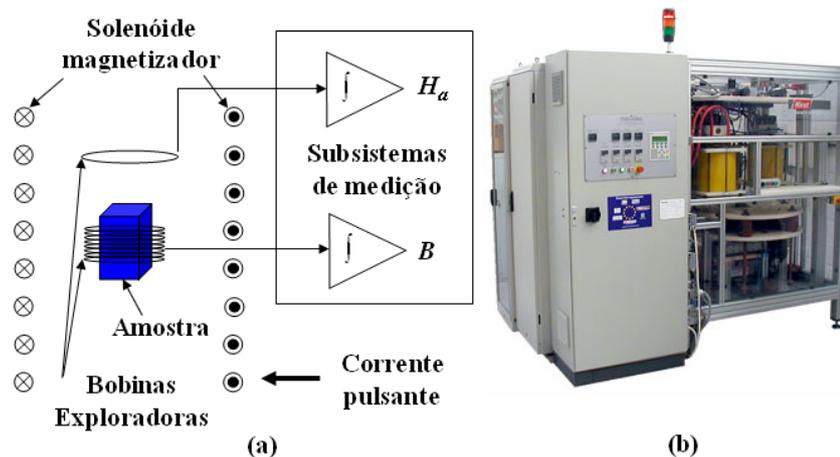


Figura 2-5. Magnetômetro de campo pulsante, (a) Diagrama de blocos genérico, (b) Versão comercial da Hirst.

Pelo fato de ser uma medição dinâmica, devem ser consideradas as correntes parasitas induzidas na amostra e aplicar-se uma correção apropriada: em virtude da condutividade elétrica dos ímãs permanentes de Terras Raras, particularmente os sinterizados, as correntes parasitas circularão na amostra durante o pulso. Essas correntes parasitas afetarão o laço de histerese interferindo nos sinais induzidos nas bobinas exploradoras do magnetômetro. Além disso, requer correção por auto-desmagnetização, desvantagem de todo teste em circuito aberto.

2.2 Subsistemas de medição

A determinação das características magnéticas de um material é possível através de aparatos e métodos que fazem uso de diferentes técnicas de medição e de diferentes tipos de instrumentos. A palavra sistema de medição neste trabalho é adotada para significar um aparato completo (histerisímetro, por exemplo), por conseguinte, os subsistemas são os instrumentos que fazem parte do sistema na determinação das diferentes variáveis (B , H , etc.). Assim, a determinação da densidade de fluxo magnético dentro da amostra pode ser realizada através da medição da *f.e.m.* induzida numa bobina enrolada ao redor do espécime; este é chamado o subsistema B que faz uso de um fluxímetro e de uma bobina exploradora. Por sua vez, o subsistema H , que procura determinar a intensidade de campo magnético dentro da amostra, pode estar formado por um gaussímetro e sua correspondente sonda Hall medindo a densidade de

fluxo no ar próximo à superfície do espécime. Estes subsistemas serão descritos posteriormente.

2.3 O Histerisímetro de Entreferro Variável – HEV

O histerisímetro de entreferro variável (Figura 2-6; Figura 2-7 e Figura 2-8) é uma alternativa aos sistemas de caracterização comerciais existentes. É destinado a espécimes prontos de tipo quadrado e cilíndrico de Samário-Cobalto e Neodímio-Ferro-Boro com volume de 2,5 a 16 cm³ e ferrite de 16 cm³. A caracterização é realizada à temperatura ambiente, em condições similares ao do funcionamento nas aplicações típicas, dispensa re-magnetização das amostras e o consumo energético é inferior aos sistemas convencionais. Os ímãs de NdFeB; cerâmicos e de SmCo podem ser caracterizados na faixa de exatidão requerida pelas normas IEC 404-5 e ASTM A977.

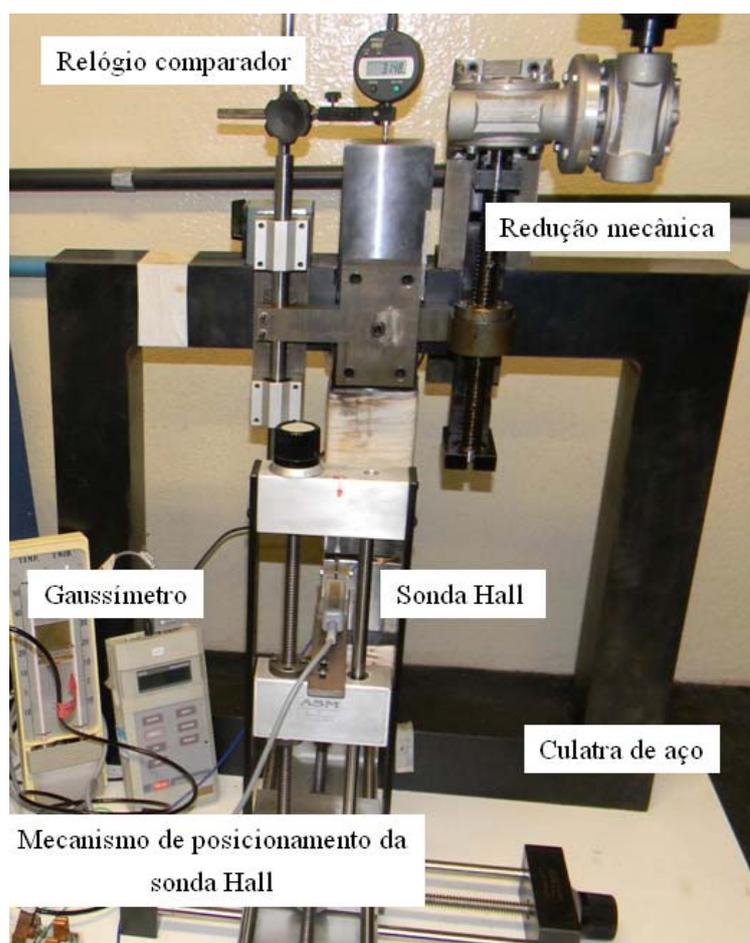


Figura 2-6. Histerisímetro de entreferro variável na caracterização de ímãs permanentes.

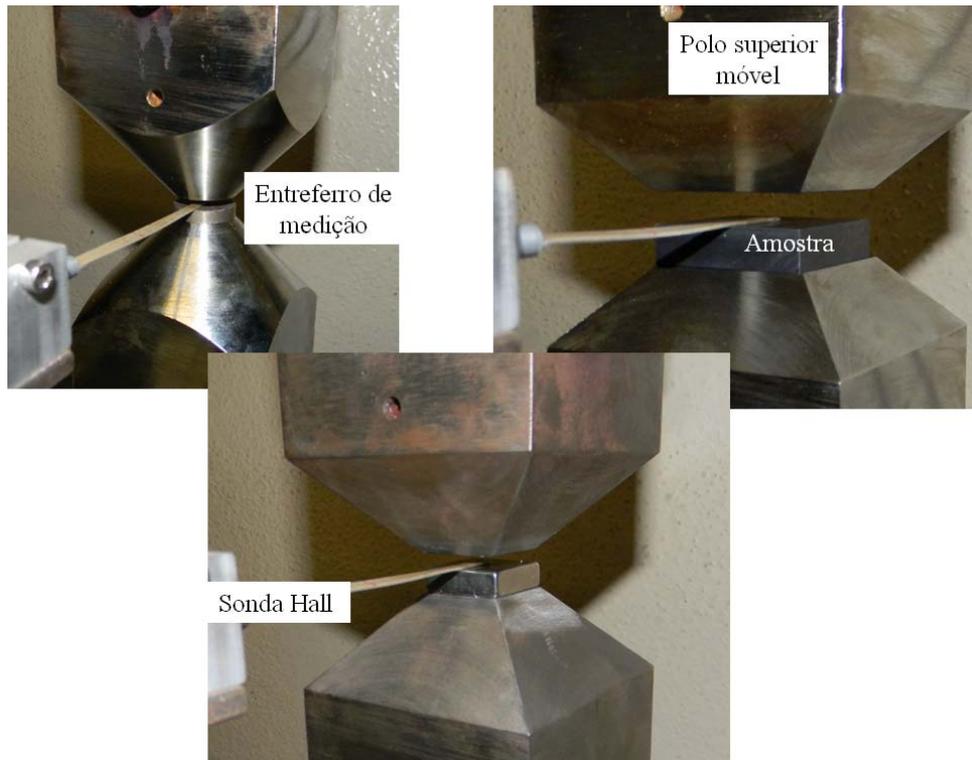


Figura 2-7. Entreferro de medição na determinação de B_r .

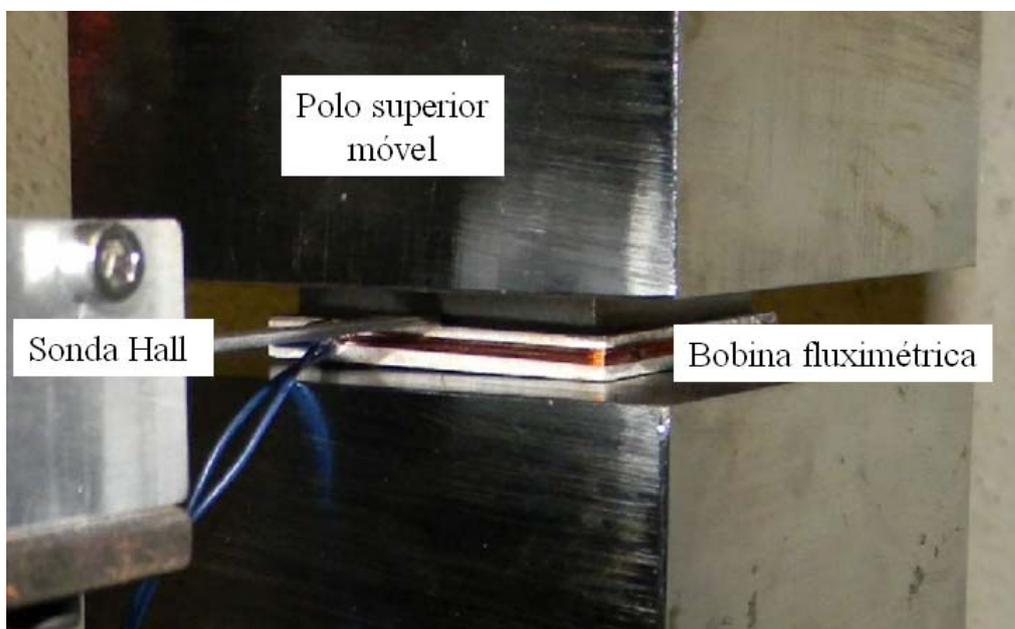


Figura 2-8. Entreferro de medição na determinação de μ_r .

3 MATERIAIS, CIRCUITOS E MEDIÇÕES

Num sistema de caracterização de ímãs permanentes confluem aspectos e conceitos tecnológicos diversos como os materiais usados nos circuitos magnéticos, os materiais das amostras, o próprio conceito de circuito magnético, mas também os instrumentos utilizados, os métodos aplicados e o tratamento dos dados registrados.

3.1 Magnetismo e matéria

Os efeitos da magnetização são devidos à propensão dos constituintes atômicos da matéria que levam a comportar-se como dipolos magnéticos. É natural pensar nos elétrons circulando ao redor do núcleo como representando uma corrente circulante, e, por conseguinte dando lugar a um momento magnético similar ao do laço de corrente. Mais surpreendente é o momento magnético dipolar achado em elétrons individuais. Este momento, associado com a propriedade eletrônica do spin, é definida como *magnéton de Bohr* (HAUSS, MELCHER, 2009):

$$m_e = \pm \frac{e}{m} \frac{1}{2} \hbar \quad (3-1)$$

onde e/m é a relação carga-massa eletrônica ($1,76 \times 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$), e \hbar , a constante reduzida de Planck ($1,05 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$), de maneira que m_e tem unidades $\text{A} \cdot \text{m}^2$. A mecânica quântica dos átomos e moléculas estabelece que, seja devido às órbitas ou pelo spin, a contribuição eletrônica ao seu momento dipolar líquido tende a cancelar-se. Aqueles que fazem alguma contribuição são tipicamente elementos com camadas incompletas.

A magnetização nos materiais pode ser permanente ou induzida pela aplicação de um campo magnético apropriado. No nível macroscópico, uma espira de área A pela qual circula uma corrente i apresenta um momento magnético $\vec{m} = iA\vec{n}$. Por sua vez, num material magnetizado, com pólos de intensidade p localizados aproximadamente nos extremos e separados por uma distância l define-se o vetor momento magnético \vec{m} como $\vec{m} = p\vec{l}$ (o vetor sinaliza desde o pólo sul ao pólo norte). Pólos magnéticos representam um conceito matemático mais que uma realidade física; eles não podem ser separados para ser medidos e não estão claramente localizados em algum ponto, o que significa que a distância l entre eles é indeterminada (CULLITY, 1972).

Pode definir-se o vetor *densidade de magnetização* \vec{M} ou *momento magnético por unidade de volume* de um sólido, em kA/m, como:

$$\vec{M} = N\vec{m} \quad (3-2)$$

onde N é o número de dipolos por unidade de volume.

O efeito da distribuição espacial dos dipolos magnéticos sobre a *intensidade de campo magnético* \vec{H} pode ser considerado através da lei de continuidade

$$\nabla \cdot \mu_0 \vec{H} = -\nabla \cdot \mu_0 \vec{M} \quad (3-3)$$

sendo $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ é a *permeabilidade do vácuo*. A condição de continuidade determinada por integração de (3-3) sobre um volume incremental que encerra uma seção de interface com vetor normal \vec{n} é

$$\vec{n} \cdot \mu_0 (\vec{H}^a - \vec{H}^b) = -\vec{n} \cdot \mu_0 (\vec{M}^a - \vec{M}^b) \quad (3-4)$$

Os super-índices indicam os materiais aos quais se aplica a variável em questão, Figura 3-1.

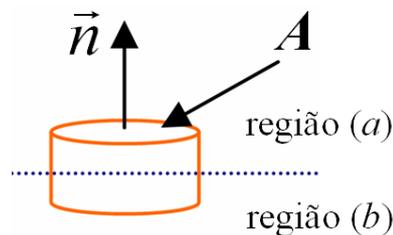


Figura 3-1. Volume incremental entre dois materiais diferentes.

A densidade volumétrica de carga pode ser definida como

$$\rho_m \equiv -\nabla \cdot \mu_0 \vec{M} \quad (3-5)$$

e a densidade de carga magnética superficial,

$$\sigma_{sm} \equiv -\vec{n} \cdot \mu_0 (\vec{M}^a - \vec{M}^b) \quad (3-6)$$

Na presença de material magnetizável, a (3-3) indica que a quantidade $\mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$ é solenoidal. Para que haja consistência com isto, pode-se escrever:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3-7)$$

O agrupamento de \vec{H} e \vec{M} na lei de Faraday e a lei de continuidade de fluxo fazem que seja natural definir uma nova variável, a *densidade de fluxo magnético* \vec{B} :

$$\vec{B} \equiv \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3-8)$$

É mais lógico pensar em \vec{H} como o campo magnético primário, no sentido em que é o campo magnético “que faz que as coisas aconteçam”. O campo magnético \vec{H} pode ser produzido por uma corrente num condutor ou por polos magnéticos de um ímã permanente. Se num ponto exterior a esses geradores de campo magnético existisse algum material magnetizável, então o campo magnético \vec{H} produzirá alguma magnetização \vec{M} em tal ponto, e o campo magnético total será \vec{B} , o qual é proporcional à soma de \vec{H} e \vec{M} (com fator de proporcionalidade μ_0). Portanto, \vec{H} é a causa, e \vec{B} é o efeito completo. Se não existe matéria nesse ponto, então o campo pode ser chamado de \vec{H} ou \vec{B} (CULLITY, 1972).

Considerando a inexistência de quantidades macroscópicas de monopolos de carga magnética, a divergência de \vec{B} é zero. Isto é, a lei de continuidade de fluxo:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3-9)$$

E a correspondente condição de continuidade:

$$\vec{n} \cdot (\vec{B}^a - \vec{B}^b) = 0 \quad (3-10)$$

A lei de Faraday da (3-7) pode ser escrita como:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3-11)$$

Para os materiais magneticamente lineares:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (3-12)$$

onde χ_m é a *susceptibilidade magnética*. A lei constitutiva para um material magneticamente linear é escrita em termos da densidade de fluxo magnético:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (3-13)$$

onde μ é a *permeabilidade do material*, relacionada à susceptibilidade magnética

$$\mu \equiv \mu_0 (1 + \chi_m) \quad (3-14)$$

De acordo com esta lei, a magnetização é tida em conta substituindo a permeabilidade do espaço livre μ_0 pela permeabilidade μ do material. Com propósito de comparação magnética dos materiais, é conveniente utilizar a *permeabilidade relativa*:

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} = (1 + \chi_m) \Rightarrow \chi_m = \mu_{rel} - 1 \quad (3-15)$$

Os materiais magnéticos podem ser classificados dentro das seguintes categorias:

Diamagnético – Não apresenta momento magnético atômico ou molecular. Quando este material é submetido a um campo magnético, são geradas correntes atômicas que dão lugar a uma magnetização que se opõe ao campo.

Paramagnético – Tem um momento magnético líquido no nível atômico, mas o acoplamento entre momentos adjacentes é muito débil. Estes momentos tendem a se alinhar com um campo magnético aplicado, mas o grau de alinhamento diminui com altas temperaturas devido aos efeitos aleatórios da agitação térmica.

Ferromagnético – Também tem momento magnético líquido no nível atômico, mas neste existe um forte acoplamento entre momentos adjacentes. Este acoplamento conduz a um alinhamento espontâneo dos momentos sobre regiões macroscópicas denominadas domínios. Estes domínios experimentam posteriores alinhamentos quando o material é submetido a um campo magnético.

Antiferromagnético e ferrimagnético – Estes materiais têm momentos atômicos orientados antiparalelamente com momentos adjacentes. Nos antiferromagnéticos os momentos são iguais, portanto não existe momento líquido. Nos ferrimagnéticos os momentos são diferentes, portanto existe um momento líquido.

A susceptibilidade típica e a permeabilidade relativa de alguns elementos, compostos, e materiais comumente utilizados são apresentadas na Tabela 3-1.

A maioria dos materiais comuns são apenas magnetizáveis. Algumas substâncias que são facilmente polarizáveis eletricamente, como água, não são facilmente magnetizáveis. Note-se que a susceptibilidade pode ser tanto positiva ou negativa e que existem alguns materiais, notadamente ferro e seus compostos, nos quais é um valor muito grande.

Os físicos estão principalmente interessados na variação de \vec{M} com \vec{H} , devido a que este imediatamente proporciona a susceptibilidade e revela o tipo de substância. Os engenheiros estão usualmente interessados nos materiais ferro e ferrimagnéticos e precisam

conhecer a densidade de fluxo total \vec{B} produzida por um determinado campo magnético \vec{H} . Portanto, é mais usada a curva BH , também chamada curva de magnetização e desmagnetização (CULLITY, 1972), e, por conseguinte, é mais útil a permeabilidade do material.

Tabela 3-1. Susceptibilidade e permeabilidade relativa de materiais usuais.

| Classificação | Material | χ_m | μ_{rel} |
|-----------------------|----------------------------------|------------------------|-------------|
| Diamagnético | Na | $-0,24 \times 10^{-5}$ | 0,9999976 |
| | Cu | $-1,0 \times 10^{-5}$ | 0,9999895 |
| | Diamante | $-2,2 \times 10^{-5}$ | 0,9999780 |
| | Hg | $-3,2 \times 10^{-5}$ | 0,9999680 |
| | H ₂ O | $-0,9 \times 10^{-5}$ | 0,9999910 |
| Paramagnético | Mg | $1,2 \times 10^{-5}$ | 1,0000120 |
| | Al | $2,2 \times 10^{-5}$ | 1,0000220 |
| | Pt | $3,6 \times 10^{-4}$ | 1,0003600 |
| | Ar | $3,6 \times 10^{-7}$ | 1,0000004 |
| | O ₂ | $2,1 \times 10^{-6}$ | 1,0000021 |
| Ferromagnético | Fe (elétrico) | $5,5 \times 10^3$ | 5501 |
| | Fe (espécime de laboratório) | $8,8 \times 10^4$ | 88001 |
| | Fe (Cristais) | $1,4 \times 10^6$ | 1400001 |
| | Fe-Si (lâminas de transformador) | 7×10^4 | 70001 |
| | Fe-Si (Cristais) | $3,8 \times 10^6$ | 3800001 |
| | μ -metal | 10^5 | 100001 |
| Ferrimagnético | Fe ₃ O ₄ | 100 | 101 |
| | Ferrites | 5000 | 5001 |

Fonte: (HAUSS, MELCHER, 2009).

Materiais ferromagnéticos como ferro são sólidos metálicos e, por conseguinte, tendem a ser relativamente bons condutores elétricos. Isto significa que, a menos que seja adotada alguma precaução para interromper os caminhos de condução no material, correntes parasitas serão induzidas por variação no tempo da densidade de fluxo magnético.

Com o objetivo de obter um material isolante altamente magnetizável, os átomos de ferro podem ser combinados no cristal de óxido do próprio material. Embora a interação espontânea entre moléculas que caracterizam ferromagnetismo é de fato observada, o alinhamento é antiparalelo. Como resultado, estes óxidos puros não apresentam propriedades magnéticas fortes.

Por sua vez, material misturado de óxidos como Fe₃O₄ (magnetita) é composto por óxidos de diferentes momentos. O alinhamento espontâneo antiparalelo resulta em um

momento líquido. Esta classe de material relativamente magnetizável, mas eletricamente isolante, é denominado ferrimagnético.

3.2 Materiais Ferromagnéticos

A categoria mais importante dentro dos materiais magnéticos são os ferromagnéticos. Anteriormente foram considerados diferentes materiais ferromagnéticos e suas características técnicas que os diferenciam. Será apresentado, a seguir, o comportamento de um material ferromagnético genérico.

Considere-se um toróide contendo material ferromagnético ao redor do qual é implementado um bobinado magnetizante primário uniforme com N_1 espiras através do qual pode circular uma corrente I (em qualquer dos dois sentidos mediante uma chave reversível), regulada por um resistor variável e medida por um amperímetro, Figura 3-2. Uma bobina de medição com N_2 espiras é conectada a um instrumento que proporciona o fluxo magnético que é encerrado pelas espiras N_2 .

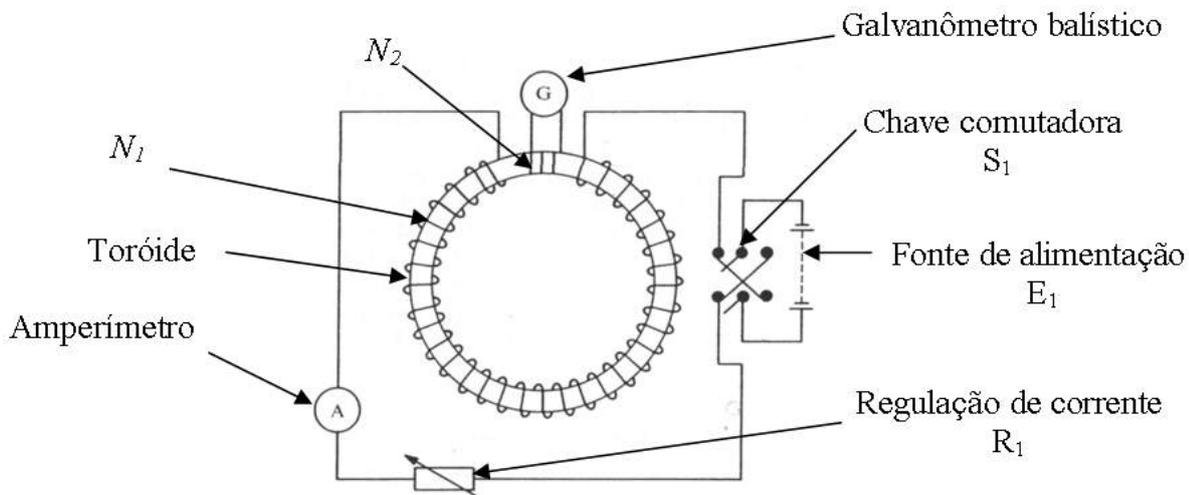


Figura 3-2. Material ferromagnético em forma toroidal com dois bobinados para determinação de desempenho magnético.

O objetivo é analisar o desempenho do material frente a um campo magnetizante H e ilustrar tal comportamento em um gráfico que apresente a densidade de fluxo B com a indução intrínseca B_i ou J em ordenadas e a força magnetizante na abscissa, Figura 3-3.

Seja um toróide com raio interno a e raio externo b , sendo $\frac{a+b}{2} \gg \frac{b-a}{2}$ (raio meio do toróide muito maior que o raio do solenóide) e número de ampere-espiras do primário $N_1 I$, o valor de H aplicado ao anel será

$$H = \frac{N_1 I}{\pi(a+b)} \quad (3-16)$$

H então pode ser chamada força magnetizante, e, dadas as condições ideais do circuito, é possível determinar o B das medições de fluxo feitas na bobina secundária N_2 . Para uma determinada variação de I , e, por conseguinte, de H , há uma variação no fluxo magnético ϕ através do anel:

$$\phi = BA = \mu HA = \mu_0 \mu_{rel} HA \quad (3-17)$$

onde A é a área da seção transversal do anel. Considera-se que tanto B como H são essencialmente uniformes dentro do material e desprezíveis do lado de fora, portanto é possível obter o B como ϕ / A .

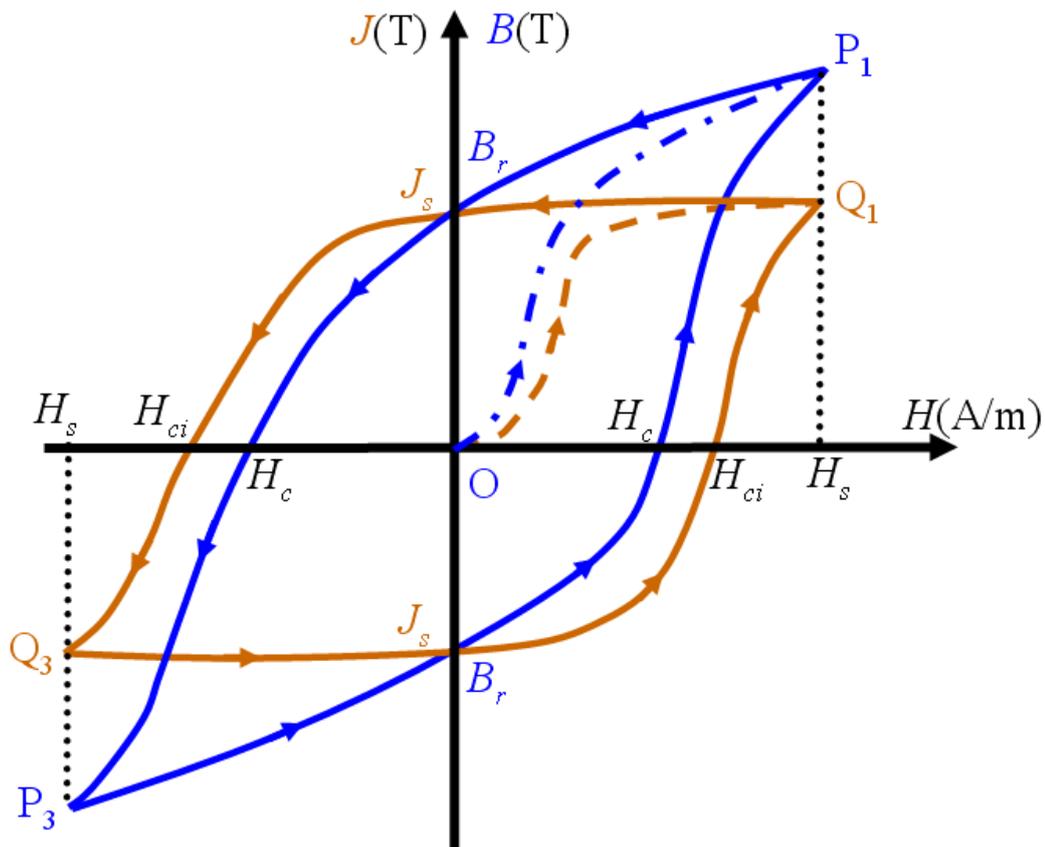


Figura 3-3. Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J (histerese) de um ímã genérico (PARKER, 1990).

Mudando, então, H ciclicamente entre os valores $+H_s$ e $-H_s$, os valores de B (e de J) produzirão um laço fechado simétrico como se vê na Figura 3-3.

Na curva azul, Figura 3-3, de B em função de H , é possível observar um primeiro percurso tracejado desde O até P_1 . O material estava inicialmente desmagnetizado, e foi

registrada uma variação em B frente a um aumento desde zero do H . Esta curva de magnetização é chamada *inicial*, *virgem* ou de *indução normal*, e verifica-se que, quando H é aumentado, o valor de B aumenta rapidamente a princípio e depois mais lentamente. Para valores suficientemente altos de H a curva tende a ficar plana, esta condição é chamada *saturação magnética*:

$$J_s = \pm \mu_0 M_s \quad (3-18)$$

onde \pm leva em conta as duas possíveis orientações de M . Embora J seja constante depois de alcançar a saturação para força magnetizante H_s ou superior, B continua crescendo com H , devido a que H forma parte de B na expressão constitutiva

$$B = \mu_0 (H + M) = \mu_0 H + J \Rightarrow J = B - \mu_0 H \quad (3-19)$$

O incremento de H acima da saturação fará que a permeabilidade do material ferromagnético μ tenda para 1 quando H tende ao infinito.

Se agora é retirada a excitação magnetizante ($I = 0$), a densidade de fluxo B diminui, mas não tão rapidamente quanto aumentou ao longo da curva de magnetização inicial. Assim, quando H chega a zero, permanece uma densidade *residual*, ou *remanência*, B_r (Figura 3-3).

Para reduzir B a zero, deve-se aplicar um campo em sentido contrário ao do primeiro quadrante invertendo a polaridade da corrente mediante a chave S_1 (Figura 3-2). O campo desmagnetizante necessário para levar B a zero é indicado como H_c (ou H_{cB}) e é chamado *força coercitiva*. Aumentando ainda mais a desmagnetização H , o material fica magnetizado com a polaridade oposta, voltando a ter uma magnetização fácil a principio e difícil depois, quando se aproxima da saturação.

A força coercitiva necessária para reverter a magnetização é denominada *coercitividade intrínseca* H_{ci} . A redução de H a zero deixa uma magnetização residual ou densidade de fluxo magnético residual $-B_r$, e para reduzir B a zero deve-se aplicar uma força coercitiva $+H_c$. Aumentando o campo magnetizante H ainda mais, o material fica novamente saturado com a polaridade inicial do primeiro quadrante.

O fenômeno que causa o atraso de B em relação a H , de modo que a curva de magnetização dos campos que aumentam e diminuem não seja a mesma, é chamado de *histerese*, e o ciclo traçado pela curva de magnetização é chamado de *ciclo de histerese*, Figura 3-3:

$$P_1 \rightarrow B_r \rightarrow -H_c \rightarrow P_3 \rightarrow -B_r \rightarrow H_c \rightarrow P_1$$

Se o material for levado até a saturação em ambas as extremidades da curva de magnetização, o ciclo é chamado *ciclo de histerese de saturação ou ciclo principal*. A densidade de fluxo magnético residual B_r no ciclo de saturação é chamada de *retentividade* ou *remanência*, e a força coercitiva H_c neste ciclo é chamada de *coercitividade*. Assim, a remanência de um material é o valor máximo que a densidade de fluxo magnético residual pode atingir, e a coercitividade, o valor máximo que a força coercitiva pode atingir.

Neste trabalho são usados dois tipos de materiais ferromagnéticos com funções diferentes. Esta distinção origina uma sub-classificação dentro dos ferromagnéticos: materiais magneticamente macios e duros. Esta é uma distinção, do ponto de vista magnético, que depende da coercitividade H_c .

Os materiais magneticamente macios são caracterizados por uma baixa coercitividade ($H_c < 1000$ A/m), ou seja, são materiais facilmente magnetizáveis e desmagnetizáveis; e os materiais magneticamente duros têm uma alta coercitividade ($H_c > 10.000$ A/m), o que faz com eles sejam mais difíceis de serem magnetizados ou desmagnetizados (JILES, 1991). Isto pode ser representado graficamente na Figura 3-4.

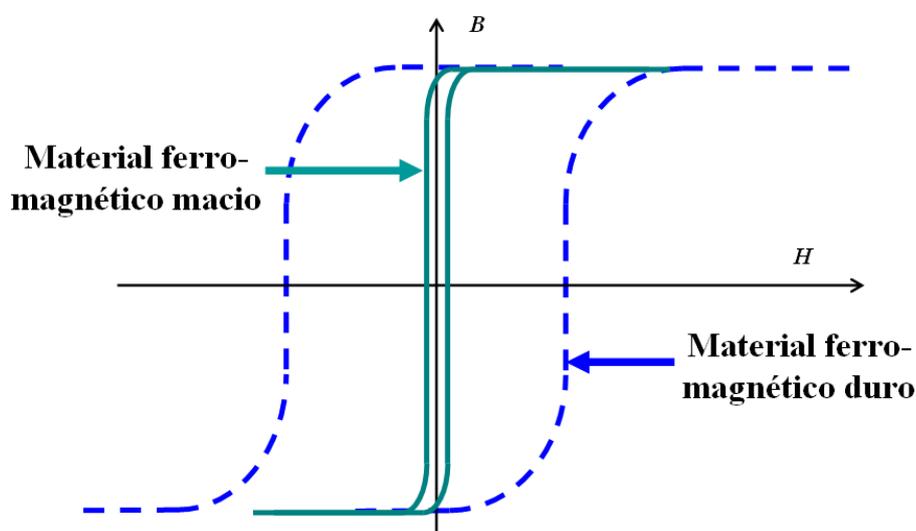


Figura 3-4. Ciclos de histerese para materiais ferromagnéticos duros e macios.

No entanto, o parâmetro mais representativo de um material ferromagnético macio é sua permeabilidade (é muito alta em relação à dos duros), Tabela 3-2. Estes materiais (macios) são usados como conduto de fluxo para confinar, direcionar ou para amplificar a densidade de fluxo, e como blindagem magnética para isolar uma região de um campo exterior.

Os materiais macios mais usados são: ferro macio, ligas de ferro-silício, níquel-ferro e ferrites macios. Estes podem ser encontrados em numerosos dispositivos como transformadores, relés, motores, indutores, e eletromagnetos.

Quando se procura um material macio, as propriedades que se ponderam são: sua permeabilidade, a magnetização de saturação, resistência elétrica e coercitividade. Alta permeabilidade e magnetização de saturação elevada são desejadas para confinamento e concentração de fluxo.

A resistência elétrica e a coercitividade são importantes para aplicações de alta frequência. Uma alta resistência elétrica é mais limitante para as correntes parasitas, enquanto que uma baixa coercitividade está associada a menores perdas por histerese.

Tabela 3-2. Algumas propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos macios.

| Material | μ_{\max} | B_s (T) | H_c (A/m) |
|-------------------------|--------------|-----------|-------------|
| Ferro purificado | 180000 | 2,15 | 4 |
| Ferro | 5000 | 2,15 | 80 |
| Aço recozido | 2000 | 2,1 | 144 |
| Ferro-4%Si | 7000 | 1,97 | 40 |
| Permalloy 45 | 25000 | 1,6 | 24 |
| Hipernik | 70000 | 1,6 | 4 |
| Mumetal | 100000 | 0,65 | 4 |
| Supermalloy | 800000 | 0,8 | 0,16 |
| Permendur | 5000 | 2,45 | 160 |
| Hiperco | 10000 | 2,42 | 80 |
| Ferroxcube | 1500 | 2,5 | 8 |

Fonte: JILES, 1991.

3.3 Materiais magneticamente duros

As grandezas relevantes especificadas como as principais propriedades magnéticas dos materiais ferromagnéticos duros são:

- B_r Remanência ou indução residual; é o valor de B quando $H = 0$; em Tesla (T);
- H_c ou H_{cB} Coercitividade ou força coercitiva; é o valor de H quando $B = 0$; em kA/m;
- H_{ci} Coercitividade intrínseca ou força coercitiva intrínseca; é o valor de H quando $J = 0$; em kA/m;
- μ_r Permeabilidade de retorno; inclinação da curva BH para $H = 0$ e $B = B_r$;
- $(BH)_{\max}$ Produto energético máximo; densidade de energia armazenada ou armazenável no volume do material ferromagnético; em kJ/m³.

Os materiais ferromagnéticos duros são chamados *ímãs permanentes* e, dentro de esta classificação, cabe distingui-los em ímãs permanentes macios (ou tipo 1) e duros (ou tipo 2), (CULLITY, 1972; PARKER, 1990).

Na Tabela 3-3 e na Figura 3-5 podem ser observadas propriedades e características específicas de alguns materiais magneticamente duros.

Tabela 3-3. Algumas propriedades magnéticas de materiais ferromagnéticos duros.

| Material | Composição | B_r (T) | H_c (kA/m) | $(BH)_{\max}$ (kJ/m ³) |
|---------------------------|---|-----------|--------------|------------------------------------|
| Aço | 99%Fe, 1%C | 0,9 | 4 | 1,59 |
| Aço 36Co | 36%Co, 3,75%W, 5,75%Cr, 0,9%C 53,7%Fe | 0,96 | 18,25 | 7,42 |
| Alnico 5 | 8%Al, 15%Ni, 24%Co, 3%Cu, 50%Fe | 1,2 | 57,6 | 40 |
| Ba Ferrite | BaO 6Fe ₂ O ₃ | 0,395 | 192 | 28 |
| PtCo | 77%Pt, 23%Co | 0,645 | 344 | 76 |
| Remalloy | 12%Co, 17%Mo, 71%Fe | 1,0 | 18,4 | 9 |
| Vicalloy | 13%V, 52%Co, 35%Fe | 1,0 | 36 | 24 |
| Samário Cobalto | SmCo ₅ | 0,9 | 696 | 160 |
| Neodímio Ferro Boro | Nd ₂ Fe ₁₄ B | 1,3 | 1120 | 320 |

Fonte: JILES, 1991.

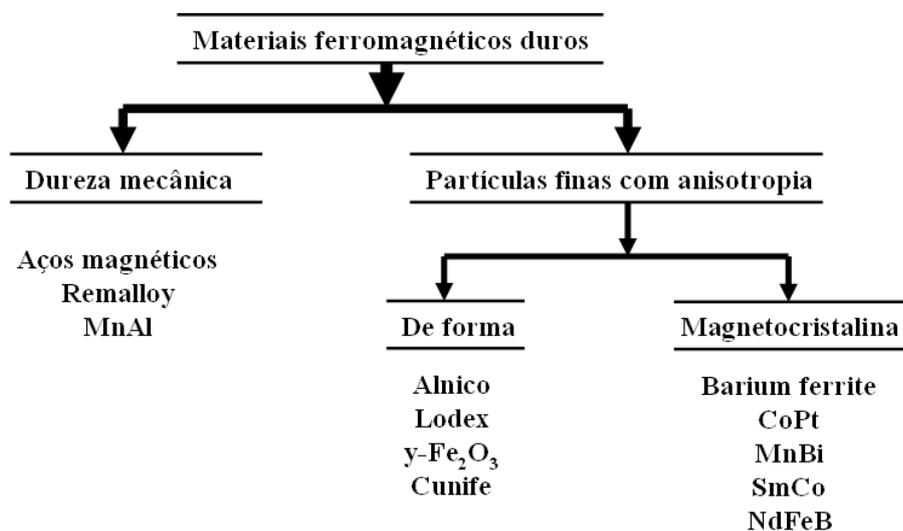


Figura 3-5. Classificação dos ímãs em função de suas propriedades construtivas (CULLITY, 1972).

3.3.1 Anisotropia Magnetocristalina

É uma propriedade intrínseca do material na qual a magnetização é favorecida em direções preferidas ou eixos fáceis (“*easy axes*”). O alinhamento preferido dentro do material constitui um estado de baixa energia e é devido primariamente ao acoplamento do spin orbital. Especificamente, os elétrons atômicos se acoplam ao reticulado cristalino de tal forma que

seus momentos orbitais tendem a alinharem-se ao longo dos eixos cristalográficos, e, devido ao acoplamento do spin orbital, os momentos do spin também tendem a ficar alinhados.

A forma mais elementar de anisotropia magnetocristalina é a anisotropia uniaxial. Se a amostra com anisotropia uniaxial é polarizada com um ângulo θ relativo ao seu eixo fácil, Figura 3-6, a densidade de energia anisotrópica é:

$$w_{ma} \approx K_1 \sin^2 \theta \text{ (J/m}^3\text{)} \tag{3-20}$$

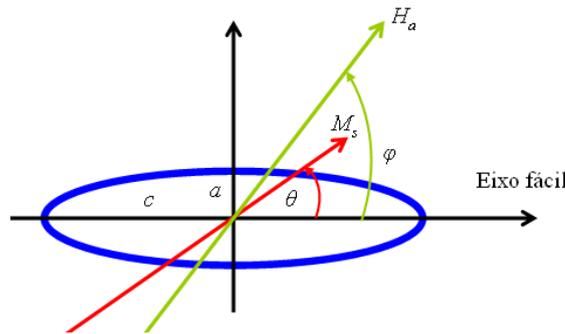


Figura 3-6. Espécime com anisotropia uniaxial (FURLANI, 2001).

A constante anisotrópica do material K_1 é suposta de maior peso nos ímãs permanentes atuais (cerâmicos, de NdFeB e SmCo) e adotada nas expressões como simplesmente K . A mínima energia tem lugar quando $\theta = 0^\circ$ e 180° . Neste tipo de ímãs (com anisotropia magnetocristalina predominante) e com $H_{ci} > M_s$, manifesta-se uma característica muito importante e útil: a característica desmagnetizante no segundo quadrante pode ser linear, Figura 3-7.

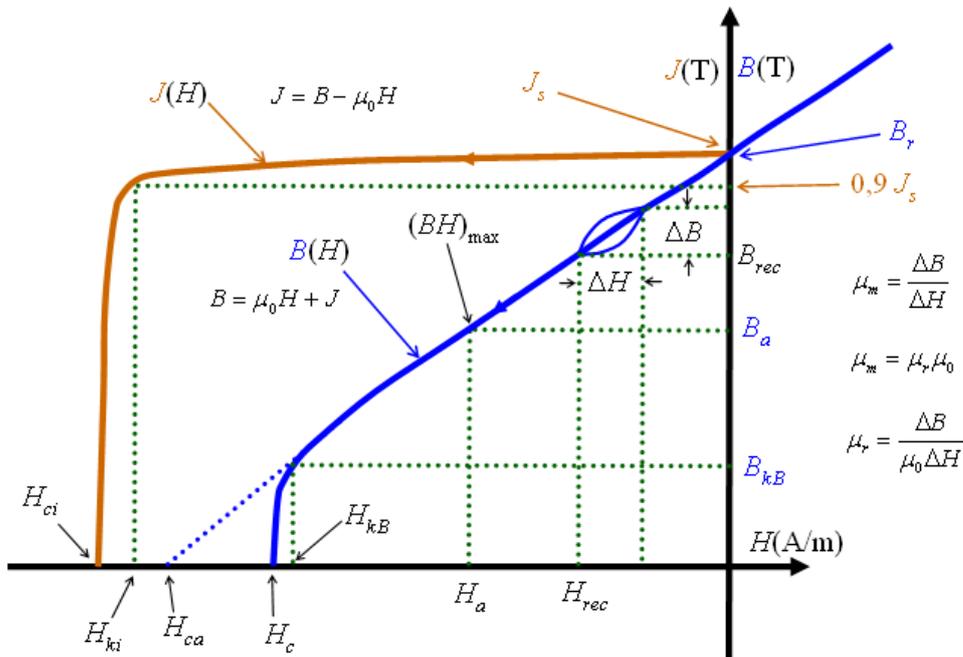


Figura 3-7. Detalhe do segundo quadrante das características de um ímã permanente.

Isto significa que se requer um campo mais débil para reduzir B a zero que para inverter M , isto é, $H_c < H_{ci}$. Por outro lado, se $H_{ci} < M_s$, então $H_c = H_{ci}$, e a curva de desmagnetização é linear somente sobre uma porção do segundo quadrante. O joelho da curva no segundo quadrante geralmente é dependente da temperatura de trabalho. Usualmente, à temperatura ambiente, os ímãs cerâmicos apresentam uma leve inclinação no trecho final do segundo quadrante, como indica a Figura 3-7 (de maneira exagerada).

3.3.2 Principais características dos ímãs permanentes

São apresentadas a seguir as características magnéticas mais importantes dos ímãs permanentes e as figuras de mérito que possibilitam a escolha para uma determinada aplicação. Como todas elas são referentes à característica do ímã como fonte de fluxo magnético, estão relacionadas diretamente ao segundo quadrante apresentado na Figura 3-7.

3.3.2.1 Máximo produto energético $(BH)_{\max}$

É o máximo valor do produto BH obtido no segundo quadrante e é a máxima quantidade de energia no campo magnético por unidade de volume do ímã permanente. Este fator de mérito de um ímã ajuda a definir o volume de material magnético necessário para se produzir um determinado campo magnético em uma dada região. Assim, quanto maior for seu valor, menor será o volume de material necessário para se produzir este campo ou indução magnética. O fabricante usualmente indica os valores B_a e H_a do ponto de trabalho do ímã onde provavelmente se encontre o máximo produto energético. Para o caso dos ímãs com desmagnetização totalmente linear no segundo quadrante, a determinação do $(BH)_{\max}$ pode ser obtida como:

$$(BH)_{\max} = \frac{B_r}{2} \frac{H_c}{2} \quad (3-21)$$

3.3.2.2 Densidade de fluxo magnético remanente ou Remanência B_r

Nos ímãs permanentes modernos (cerâmicos, NdFeB e SmCo), a forte anisotropia magnetocristalina faz com que a magnetização de saturação seja quase igual à de remanência, portanto tem validade a expressão (VACUUMSCHMELZE, 2009):

$$B_r = \pm \mu_0 M_s = \pm J_s \Rightarrow B_r \approx J_s \quad (3-22)$$

É essencial uma combinação de alta remanência com uma alta coercitividade. Os principais fatores que afetam a remanência num ímã permanente são: a densidade real, a fração volumétrica de grãos magnéticos que o material contém e a orientação cristalográfica

média dos grãos magnéticos (quanto maior o número de grãos monocristalinos com orientação na direção de fácil magnetização, maior será a remanência), (FARIA, LIMA, 2005).

A remanência também é dependente da magnetização de saturação e, por conseguinte, esta deve ser muito alta. Embora esta condição seja necessária, não é suficiente, em virtude de a relação de quadratura ('squareness ratio') M_r/M_s precisar ser também tão perto de 1 quanto possível para poder assegurar uma grande remanência (JILES, 1991).

3.3.2.3 Coercitividade

Quanto maior for a coercitividade, mais difícil será desmagnetizar o ímã permanente. Os principais fatores que influenciam a coercitividade intrínseca do ímã permanente são: orientação cristalográfica dos grãos magnéticos, tamanho do grão e separação entre estes grãos.

A coercitividade está intimamente relacionada com a movimentação das paredes de domínio no material magnético. Para os domínios crescerem, as paredes devem se mover de tal forma que os domínios orientados favoravelmente na direção do campo aplicado se expandam. As paredes de domínio se movem facilmente em monocristais perfeitos, contudo, elas não passam de um grão para outro ou por fases no contorno de grão.

Da mesma forma, discordâncias ou defeitos do material interagem com estas paredes, dificultando ou impedindo seu movimento. Assim, os ímãs permanentes devem ser preparados com uma microestrutura que impeça o movimento das paredes de domínio magnético ou que dificulte o aparecimento de domínios reversos (FARIA, LIMA, 2005).

3.3.2.4 Fator de quadratura

O fator de quadratura (FQ) é um indicador da estabilidade de um ímã permanente face à desmagnetização. Esta figura de mérito também é definida pela curva de desmagnetização intrínseca $M - H$ do segundo quadrante. O FQ é dado pelo quociente entre o H_{ki} e o H_{ci} do material, ou seja:

$$FQ = \frac{H_{ki}}{H_{ci}} \quad (3-23)$$

onde H_{ki} é a intensidade de campo magnético para $0,9J_s$. Portanto, o FQ é uma grandeza adimensional que, para uma característica intrínseca idealmente quadrada, terá o valor 1. Assim, quanto mais próximo da unidade estiver o FQ , maior a estabilidade de um ímã quando submetido a um campo desmagnetizante. Fisicamente, este fator representa o número de grãos mag-

néticos que compõe o ímã permanente e que já reverteu sua magnetização devido à aplicação do campo desmagnetizante. Desta forma, um ímã ideal seria aquele no qual os grãos revertiriam concomitantemente sua magnetização para um dado valor do campo magnético reverso (FARIA, LIMA, 2005).

3.3.2.5 Dependência da temperatura

Um ímã permanente exposto a uma elevação de temperatura sofrerá uma redução de sua magnetização efetiva em relação ao nível de saturação. A coercitividade intrínseca para um material com anisotropia magnetocristalina é dada por (3-25).

$$H_{ci} = \frac{2K_1}{\mu_0 M_s} \quad (3-24)$$

K_1 é a constante cristalográfica do material. Esta equação evidencia que diante de incrementos de temperatura e, portanto, diminuição da magnetização efetiva, o H_{ci} aumenta.

Nos ímãs permanentes de Alnico a coercitividade intrínseca é dominada pela anisotropia de forma. Enquanto a magnetização efetiva declina com incremento da temperatura, também cairá o H_{ci} . A determinação da dependência da temperatura dos Alnicos é mais complicada que nos ferrites. Independentemente da temperatura, a característica de desmagnetização é não linear.

Os ímãs permanentes de Terras Raras de Samário Cobalto, embora apresentando também anisotropia magnetocristalina uniaxial, mas com fenômeno mais complexo que nos ferrites já que incorporam mecanismos como nucleação ou ancoramento, apresentam um desempenho em relação à temperatura segundo a Figura 3-8.

As coercitividades intrínsecas nestas e em outras ligas de Terras Raras não são incrementadas com diminuição de M_s ; ao contrário, H_{ci} diminui com o aumento da temperatura.

Até 200°C no SmCo_5 é possível comprovar que $|H_{ci}| > M_s$ e, como consequência, em todo o segundo quadrante a característica $B-H$ será linear. A mudança em μ_m , K_1 e H_{ci} com a temperatura é mais severa nos ímãs de $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ tal que $|H_{ci}| \leq M_s$ e verifica-se a existência de joelhos no segundo quadrante.

Nos ímãs permanentes de Neodímio Ferro Boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$) a temperatura Curie é de 310°C, e a forte dependência na temperatura do momento magnético do Nd implica que para incrementos de temperatura não só existirá uma queda na magnetização, mas também uma rápida queda no H_{ci} . Sem substituições parciais de Nd e/ou Fe, o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ não pode ser

usado acima dos 100 °C sem sofrer uma substancial perda de fluxo, e ainda sob esta faixa seu coeficiente de temperatura α é cinco vezes maior que para o $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$, Figura 3-9.

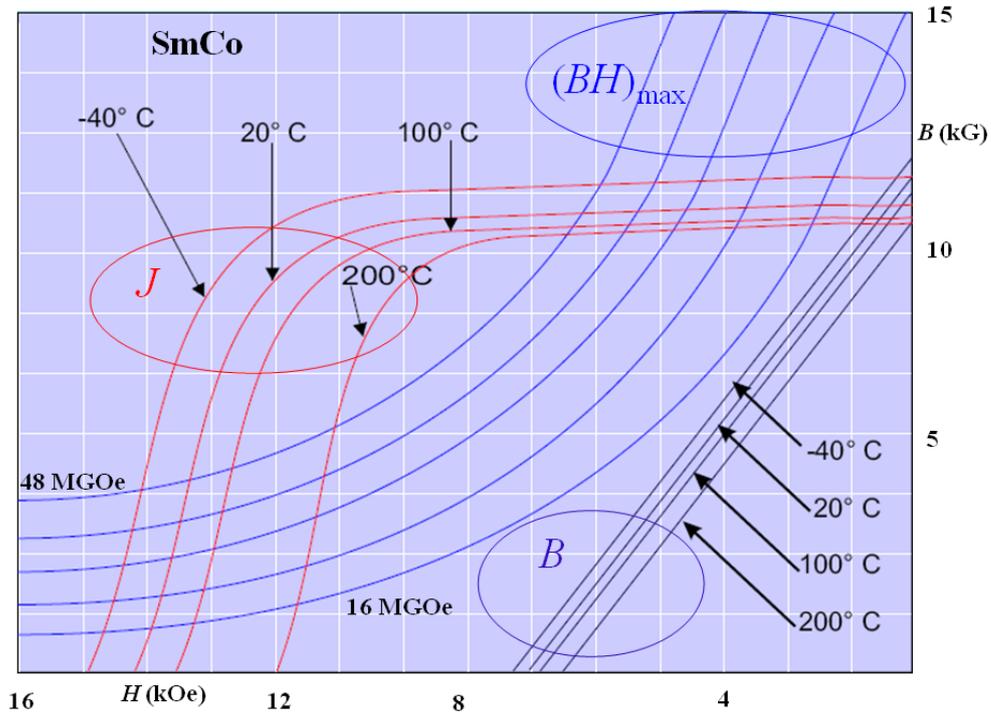


Figura 3-8. Curvas de desmagnetização do SmCo para diferentes temperaturas (EAMAGNETICS, 2010).

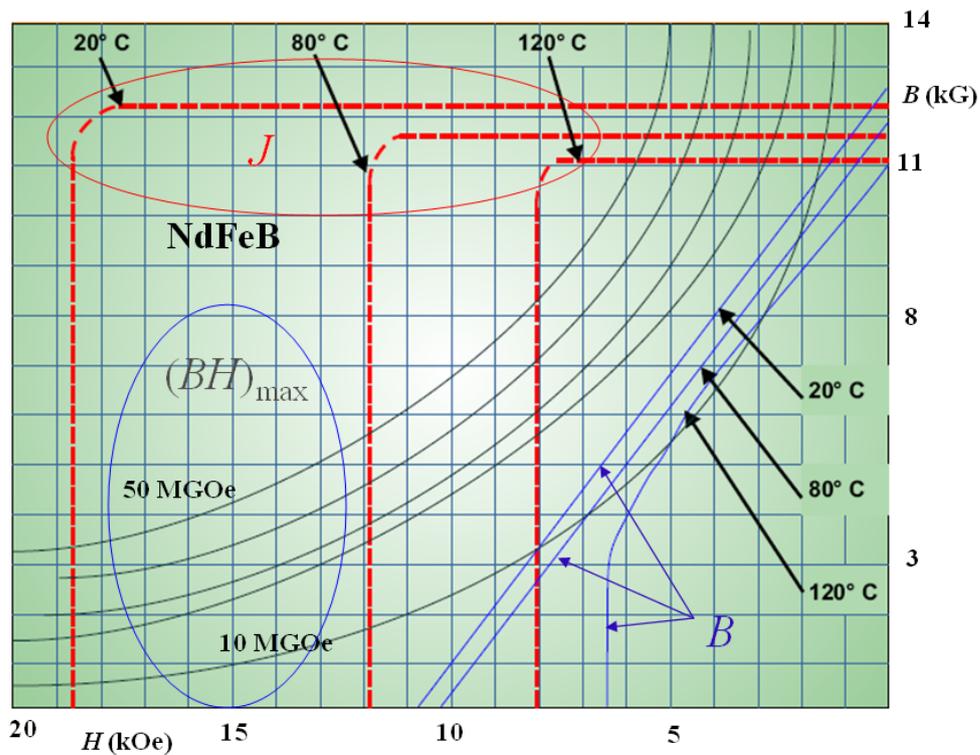


Figura 3-9. Curvas de desmagnetização do NdFeB para diferentes temperaturas (EAMAGNETICS, 2010).

Na Tabela 3-4 são apresentadas as temperaturas críticas e os coeficientes de temperatura dos principais ímãs permanentes.

Tabela 3-4. Efeito da temperatura nos ímãs (MILLER, 1993).

| Material | Mudança metalúrgica (°C) | Temperatura Curie (°C) | Coeficientes de temperatura (%/°C) | | |
|------------|--------------------------|------------------------|------------------------------------|-------|----------|
| | | | B_r | H_c | H_{ci} |
| Alnico 5-7 | 550 | 890 | -0,02 | – | – |
| Cerâmicos | 1080 | 450 | -0,19 | 0,20 | – |
| SmCo5 | 300 | 700 | -0,04 | – | -0,25 |
| Sm2Co17 | 350 | 800 | -0,02 | – | -0,20 |
| NdFeB | 200 | 310 | -0,11 | – | -0,60 |

3.3.3 Tipos de ímãs permanentes

Basicamente são quatro os tipos de ímãs usados comercialmente na atualidade: Alnico, cerâmicos, NdFeB e SmCo. A seguir serão apresentadas as características básicas de uso desses materiais.

3.3.3.1 Alnico

Este ímã permanente apresenta uma alta densidade de fluxo magnético remanente, coeficientes baixos de temperatura (0,02%/°C para B_r) e uma temperatura de serviço de até 520°C. Mas, em geral, pode se considerar que sua força coercitiva é baixa, e sua curva de desmagnetização é não linear. Como consequência, é fácil de magnetizar, mas também de desmagnetizar.

É usado em motores com grandes entreferros (reação de armadura desprezível), mas podem estar protegidos do fluxo da armadura (contra a desmagnetização) com recobrimento de ferro macio nos pólos. Foram usados em motores de poucos watts até 150 kW. Dominaram a indústria dos ímãs desde meados dos anos 40 até os anos 70, quando os ferrites passaram a ser o material mais amplamente usado.

3.3.3.2 Ferrites ou cerâmicos

Também conhecidos como ímãs de ferrite duro pelo processo usado para produzi-los. Os ferrites de bário e de estrôncio foram inventados na década de 50. Em relação ao Alnico, os ferrites têm menor densidade de fluxo magnético remanente. A principal vantagem dos ferrites é seu baixo custo e sua alta resistência elétrica, o que produz menores perdas por correntes parasitas. São amplamente usados em motores, geradores e outros mecanismos rolantes, alto-falantes, etc. O uso de ferrites é a solução mais econômica nos motores abaixo de 1 CV e poderiam ter uma vantagem econômica sobre o Alnico até 7,5kW. Ímãs de bário

são usados em pequenos motores de CC comutados para carros (sopradores, ventiladores, limpador de pára-brisa, bombas, etc.) e brinquedos elétricos.

São fabricados principalmente de ferritas de estrôncio ou de bário e óxido de ferro. Podem ser produzidos como ímãs isotrópicos e anisotrópicos. Os anisotrópicos são expostos a um campo eletromagnético durante o processo de fabricação para alcançar maior energia e melhores propriedades magnéticas. O material em pó é compactado e logo exposto a altas temperaturas (sinterizado) o que lhes permite apresentar maior resistência mecânica. Apresentam uma relativamente boa resistência à desmagnetização (melhor que os aços e ímãs de AlNiCo), excelentes temperaturas de trabalho (devido à sua alta temperatura de Curie) e alta resistência à corrosão. A faixa de máximo produto energético é de 8,35 a 34,4 kJ/m³, a densidade de fluxo remanente está entre 0,23 a 0,43 T e coercitividade entre 150 e 288 kA/m (MAGNAWORKS, 2010).

3.3.3.3 Samário Cobalto sinterizado

O SmCo₅ foi descoberto em 1960 e comercializado a partir de 1970. É obtido por processo metalúrgico partindo de pó e seguido pelo processo de sinterização. Para melhorar as características magnéticas é aplicado um campo magnético durante o processo de compactação numa direção preferencial de magnetização. A composição típica consiste em samário, cobalto, cobre, zircônio e outros elementos; faz parte da primeira geração de ímãs de Terras Raras. Tem excelentes características térmicas (podem trabalhar até 350°C), são mais resistentes à corrosão que os de NdFeB, mas não são tão resistentes mecanicamente. Os ímãs de SmCo podem ser referidos como SmCo₅ ou Sm₂Co₁₇ dependendo da composição química que afeta principalmente os coeficientes de temperatura dos parâmetros magnéticos e a máxima temperatura de trabalho. O máximo produto energético pode variar entre 110 e 240 kJ/m³, a densidade de fluxo remanente está entre 0,8 e 1,15 T, e a coercitividade fica entre 620 e 835 kA/m (MAGNAWORKS, 2010).

3.3.3.4 Neodímio Ferro Boro sinterizado

Estes ímãs são também conhecidos como a segunda geração de ímãs de Terras Raras. São os ímãs com maior produto energético disponíveis na atualidade com excelentes propriedades magnéticas. Apresentam uma resistência à desmagnetização muito alta, uma boa resistência mecânica e suas duas desvantagens mais evidentes são a susceptibilidade à oxidação e as relativamente baixas temperaturas de funcionamento (até 120°C). Conhecendo o

ambiente no qual o dispositivo deverá trabalhar, é possível incorporar revestimentos adequados: níquel, zinco, epóxi e ouro.

No início de sua produção apresentavam um máximo produto energético de 100 kJ/m^3 e na atualidade já excedem os 400 kJ/m^3 . Na densidade de fluxo remanente a faixa é de 1,1 a 1,5 T e de 0,8 a 1,14 MA/m na coercitividade (MAGNAWORKS, 2010).

3.4 Circuito magnético com ímã permanente

Considere-se um circuito magnético como o da Figura 3-10 formado por uma culatra de aço de permeabilidade muito alta (muito maior que a permeabilidade do ar e do ímã permanente), um entreferro e o ímã permanente.

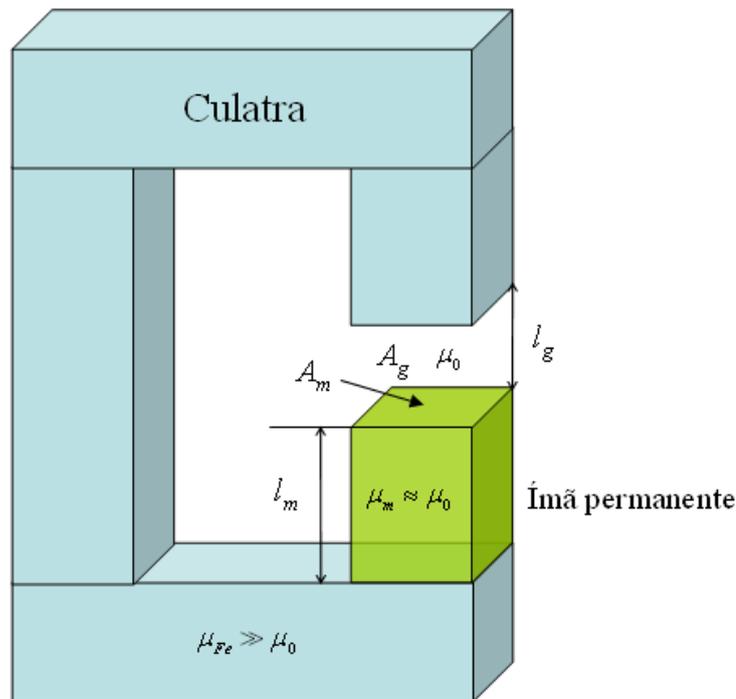


Figura 3-10. Circuito magnético com ímã permanente e entreferro.

Aplicando a lei de Ampère ao longo da linha média (no eixo axial das peças e do entreferro) e sabendo que não há correntes presentes:

$$\oint H dl = Ni = 0 = \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_{Fe}} H_{Fe} dl_{Fe} + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (3-25)$$

Considera-se que a culatra tenha uma permeabilidade magnética muito alta; por conseguinte, tem-se uma relutância associada muito baixa e também uma queda de potencial magnético escalar muito baixa. Isto é:

$$H_{Fe} \cong 0 \Rightarrow \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (3-26)$$

Assumindo H_m e H_g constantes ao longo de l_m e l_g

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \Rightarrow H_m = -H_g \frac{l_g}{l_m} \quad (3-27)$$

No entreferro tem-se:

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \Rightarrow H_m = -\frac{B_g l_g}{\mu_0 l_m} \quad (3-28)$$

No pressuposto de que não há fluxo disperso:

$$\Phi_m = \Phi_g \Rightarrow B_m A_m = B_g A_g \Rightarrow B_g = B_m \frac{A_m}{A_g} \quad (3-29)$$

Inserindo este resultado na (3-28):

$$H_m = -\frac{B_m l_g}{\mu_0 l_m} \frac{A_m}{A_g} \quad (3-30)$$

A equação da reta de carga do ímã permanente sem considerar perdas por fluxo disperso, espraiamento e perdas por quedas magnéticas é:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \quad (3-31)$$

Da (3-31) observa-se que a inclinação da reta de carga do ímã permanente depende das dimensões do ímã e das dimensões do entreferro. O ponto de funcionamento é a interseção da reta de carga com a curva de desmagnetização:

$$B_r + \mu_m H_m = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right) H_m \quad (3-32)$$

Isto resulta em

$$H_m = \frac{-B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right)} \quad (3-33)$$

Assim comprova-se que, quando o entreferro tende a zero, o campo desmagnetizante também tende a esse valor. Teoricamente, se o entreferro tendesse ao infinito, a desmagnetização tenderia ao H_c . A partir da expressão anterior é possível obter:

$$-H_m l_m = \frac{B_r l_m}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g}\right) \left(\frac{A_g}{A_m}\right)} \quad (3-34)$$

Da (3-28), obtém-se:

$$B_g = -\mu_0 H_m \left(\frac{l_m}{l_g}\right) = \frac{\mu_0 B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g}\right) \left(\frac{A_g}{A_m}\right)} \frac{l_m}{l_g} \quad (3-35)$$

Observa-se também que, para o entreferro tendendo a zero, a densidade de fluxo no entreferro tenderá ao valor de densidade de fluxo remanente.

Considerando agora os efeitos do fluxo disperso através do fator de dispersão:

$$L_f = \frac{\text{Fluxo total}}{\text{Fluxo útil}} = \frac{\Phi_g + \Phi_l}{\Phi_g} = \frac{B_m A_m}{B_g A_g} \quad (3-36)$$

O efeito de franjamento ou espraiamento pode ser considerado através do fator:

$$C_f = \frac{A_g}{A_m} \quad (3-37)$$

A queda de força magnetomotriz ou de potencial magnético escalar no aço da culatra e nos entreferros construtivos pode ser expressa usando um fator K_2 (PARKER, 1990):

$$H_m L_m + K_2 H_g L_g = 0 \quad (3-38)$$

É possível re-escrever a expressão da reta de carga (3-31) como:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g}\right) \left(\frac{L_f C_f}{K_2}\right) \quad (3-39)$$

3.5 Subsistemas de Medição na Caracterização Magnética de Ímãs Permanentes

Havendo-se apresentado os sistemas de caracterização como sistema fechado, nesta instância serão descritos os instrumentos, métodos e técnicas usados por eles.

3.5.1 Fluxímetro

A medição de quantidades magnéticas pode ser referida, quase em sua totalidade, a medições de fluxo magnético. Portanto o instrumento de medição de fluxo magnético, o fluxímetro, pode ser considerado o mais versátil instrumento da tecnologia magnética.

O fluxo magnético ϕ pode ser representado pelo número total de linhas de fluxo que penetram perpendicularmente uma secção definida de campo magnético,

$$\phi = \int_0^A B \cdot dA \quad (3-40)$$

onde B é a densidade de fluxo magnético e A é a área transversal da bobina, Figura 3-11. Em um campo magnético homogêneo pode-se escrever:

$$\phi = B \cdot A \quad (3-41)$$



Figura 3-11. (a) Fluxo magnético através de uma área A (b) Bobina de campo comercial Magnet-Physik.

Este fluxo não pode ser medido diretamente, mas pode ser obtido da tensão elétrica ao qual está relacionado pela lei de indução. Se o fluxo muda com o tempo, ou se a espira é retirada do campo magnético, uma tensão elétrica será induzida (*f.e.m.*) na bobina exploradora que concatena o fluxo. Sua função de transferência $e = f[\phi(t)] = f[B(t)] = f[H(t)]$ resulta da lei fundamental de indução de Faraday:

$$e(t) = -N \frac{d\phi}{dt} = -AN \frac{dB}{dt} = -\mu_0 AN \frac{dH}{dt} \quad (3-42)$$

N é o número de espiras da bobina exploradora. A determinação do fluxo (ou B e H) requer a integração da *f.e.m.*

$$\phi = -\frac{1}{N} \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt + \phi_0; B = -\frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt + B_0; H = -\frac{1}{\mu_0 AN} \int_{t_1}^{t_2} e(t) dt + H_0 \quad (3-43)$$

Portanto, a medição das magnitudes magnéticas ϕ , B e H dependerão sempre de uma situação dinâmica. Entre t_1 e t_2 poderão acontecer os seguintes eventos: (a) variação do campo

magnético; (b) mudança de posição da bobina exploradora num campo magnético contínuo. Se o campo magnético é produzido por um ímã permanente, a alternativa é movimentá-lo.

A determinação do fluxo magnético implica integração, e os circuitos utilizados para esta função se denominam *integradores*. A unidade de fluxo no SI é o Weber [Wb]. Existirá um fluxo magnético de 1 Weber se num bobinado que concatena o fluxo é induzida uma tensão elétrica de 1 Volt por 1 segundo quando o fluxo aparece ou desaparece. Portanto, na prática, frequentemente é usado o termo Volt-segundo [Vs] em lugar do Weber. Não é uma unidade própria, mas representa o produto de tensão e tempo. No passado foram usados galvanômetros balísticos, atualmente são usados fluxímetros eletrônicos.

Os instrumentos de medição de fluxo magnético, os fluxímetros, são integradores sensíveis com baixa deriva. Atualmente os instrumentos utilizam diferentes métodos de integração. Os mais importantes são o método analógico, o digital e o híbrido.

A grande maioria dos integradores analógicos usa circuito de integração Miller como mostrado na Figura 3-12.

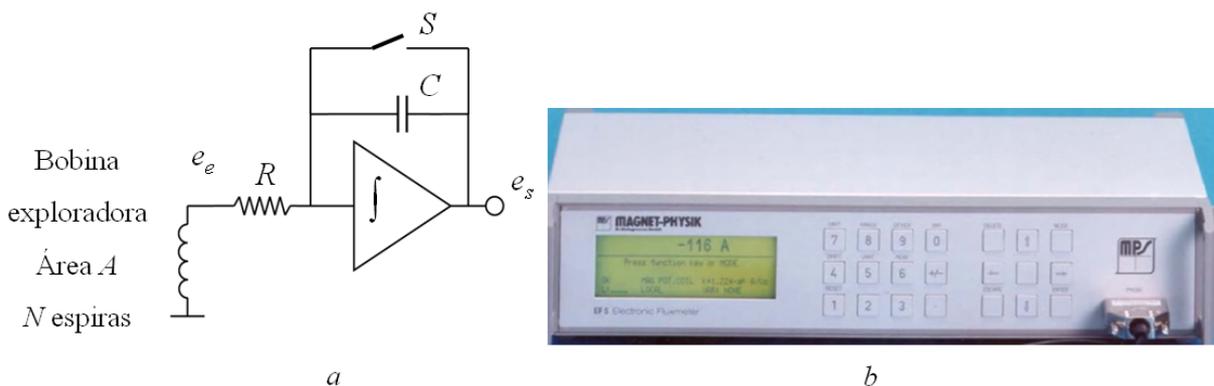


Figura 3-12. (a) Circuito eletrônico Integrador Miller (b) Fluxímetro comercial da Magnet-Physik.

A tensão a ser integrada e_e , proveniente da *f.e.m.* induzida numa bobina exploradora, é enviada à entrada de um amplificador com componentes de integração R e C . A tensão de saída e_s é proporcional à integral da tensão de entrada,

$$e_s = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} e_e dt + E_0 \quad (3-44)$$

Antes da medição, usualmente o capacitor de integração C é descarregado mediante a chave de reset S , de maneira que a tensão de início E_0 é zero.

A bobina exploradora é conectada em série com a resistência R do circuito. Valores usuais para R podem ser considerados dentro da faixa de 1 k Ω até 100 k Ω . A maioria das bobinas exploradoras tem uma resistência muito menor. Mas se a resistência não pode ser desprezada frente a R , na equação de cálculo deve ser ingressado o valor equivalente a soma

das duas. Considerando que R está no denominador, um valor elevado produzirá uma saída pequena e, portanto uma menor sensibilidade de medição.

Uma tensão de entrada constante provoca uma saída de tensão incrementando-se proporcionalmente ao tempo. Este efeito é denominado deriva (*drift*). Ainda que as entradas do integrador fossem colocadas em curto, a deriva continuará existindo devido à tensão de *offset* e corrente de polarização do amplificador integrador. As alternativas são escolher componentes de qualidade, e no ato da medição realizar o ajuste prévio respectivo.

Ao fluxímetro, além da bobina exploradora, é possível conectar outros transdutores similares como, por exemplo, o par de bobinas Helmholtz, a bobina de potencial magnético e o potenciômetro magnético Rogowski-Chattock que foram descritos em (STEINGROEVER, ROSS, 2008), (ANOCIBAR, 2007).

3.5.2 Gaussímetro de Efeito Hall

O efeito Hall pode ser obtido induzindo um campo magnético perpendicular a uma corrente circulando por um material semicondutor. Em tal condição, uma tensão é estabelecida perpendicular à corrente e ao campo magnético. Esta tensão é conhecida como tensão Hall. A origem desta tensão pode ser vista considerando as forças numa carga na presença de um campo magnético:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} + q \cdot \vec{v} \times \vec{B} \quad (3-45)$$

O segundo termo é devido à força de Lorentz na carga. O primeiro termo é devido ao campo elétrico desenvolvido pelas cargas acumuladas nas laterais da amostra. A direção da deflexão dependerá do sinal dos portadores de carga e do campo magnético.

Considere-se uma barra semicondutora tipo p como da Figura 3-13. Uma fonte de corrente constante é aplicada na direção x positiva, o campo magnético aplicado está na direção z positiva. A componente y da força será:

$$F_y = qE_y - qv_x B_z \quad (3-46)$$

Nesta equação observa-se que os portadores movimentando-se na amostra experimentam uma força que os empurra a uma das laterais. Neste caso, as lacunas ou buracos se movimentarão na direção y positiva. As lacunas no lado superior da amostra provocam uma carga positiva relativa ao lado inferior; isto desenvolve um campo elétrico interno em y . A força devido a este campo elétrico interno se opõe à força de Lorentz. Para manter uma corrente constante através da amostra temos que ter um equilíbrio de forças,

$$E_y = v_x B_z \quad (3-47)$$

resultando em uma força líquida zero nos portadores na direção y .

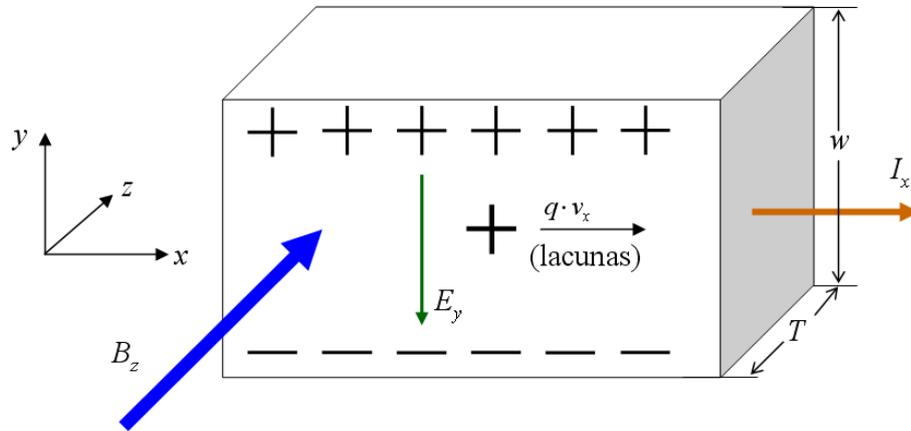


Figura 3-13. Corrente contínua circulando por semicondutor tipo p submetido a um campo magnético contínuo B .

A presença do campo interno pode ser detectada medindo a tensão desenvolvida através da amostra

$$E_y = \frac{V_y}{w} \quad (3-48)$$

onde w é a largura da amostra. Os portadores sujeitos a um campo elétrico movimentam-se com uma velocidade chamada corrente de flutuação, deriva ou *drift*. A corrente de lacunas nesta amostra pode ser escrita como

$$I_p = qp v_d A \quad (3-49)$$

onde q é a carga da lacuna, p é a densidade de lacunas em $\text{n}^\circ/\text{cm}^3$, v_d é a velocidade de deriva, e A é a seção transversal da amostra. Pode-se ainda converter esta equação em outra em função do vetor densidade de corrente, onde a magnitude $J = I/A$ e a direção é paralela à velocidade de *drift*:

$$J_p = qp v_d \quad (3-50)$$

A velocidade de deriva está relacionada ao campo elétrico que a produz através de uma constante de proporcionalidade conhecida como mobilidade:

$$v_d = \mu_p E \text{ para as lacunas,} \quad v_d = -\mu_n E \text{ para os elétrons} \quad (3-51)$$

Substituindo isto na (3-50) da densidade de corrente:

$$J_p = qp\mu_p E \text{ para as lacunas,} \quad J_n = qn\mu_n E \text{ para os elétrons} \quad (3-52)$$

Usando esta relação na equação para o campo E_y obtém-se

$$E_y = v_x B_z = \frac{J_x}{qp} B_z = R_H J_x B_z \quad (3-53)$$

onde $R_H = 1/qp$ é denominado *coeficiente Hall*. Para amostras n dopadas se terá o sinal contrário. Estendendo o modelo para considerar o efeito Hall quando presentes tanto elétrons quanto lacunas:

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (3-54)$$

A (3-53) pode ser escrita como:

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{\frac{V_y}{w}}{\frac{I_x}{wT} B_z} = \frac{TV_y}{I_x B_z} \quad V_y = \frac{R_H I_x B_z}{T} \quad (3-55)$$

Medindo a tensão Hall, conhecendo a corrente I_x e as características do semiconductor (a espessura T da amostra e o coeficiente Hall R_H), pode-se conhecer o campo magnético B_z . Os parâmetros construtivos arranjados convenientemente podem ser expressos através de uma constante de sensibilidade, Tabela 3-5.

Tabela 3-5. Comparação de valores de sensibilidade para diferentes materiais geradores Hall.

| Material | Constante de sensibilidade K (mV/mAkG) |
|--------------------|--|
| InAs em bruto | 0,10 |
| InAs filme delgado | 1,0 |
| GaAs | 2,0 |
| InSb | 160,0 |

Fonte: Sensors Magazine, (DRAFTS, 1997).

As sondas de efeito Hall podem ser fabricados com áreas ativas muito pequenas abaixo de 1 mm^2 ; podem, portanto, ser utilizadas para medir o campo magnético com uma grande resolução espacial. Outro fator importante é que, diferentemente das bobinas exploradoras que devem ter sua área transversal bem determinada para medir indução magnética sobre ela, as sondas Hall medem a intensidade de campo direta e localmente.

Estas sondas são fabricadas comercialmente, usando InAs ou InSb. O eixo de medição pode ser paralelo ao eixo da sonda, chamada sonda axial, ou perpendicular ao eixo de sonda, assim denominada sonda transversal, Figura 3-14.

Tipicamente, a sonda é posicionada de forma que a sua leitura seja a do campo magnético normal ao sensor Hall e no seu centro. No caso dos gaussímetros, ela é colocada diretamente junto à face polar do ímã permanente sob teste ou mantida a uma distância fixa daquela.

No caso de um ímã retangular tipo bloco de comprimento $2a$, de largura $2b$, espessura L e afastamento z no eixo de magnetização (em circuito aberto) (FURLANI, 2001):

$$B_z(z) = \frac{B_r}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{(z+L)}{ab} \sqrt{a^2 + b^2 + (z+L)^2} \right] - \frac{B_r}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{z}{ab} \sqrt{a^2 + b^2 + z^2} \right) \quad (3-56)$$

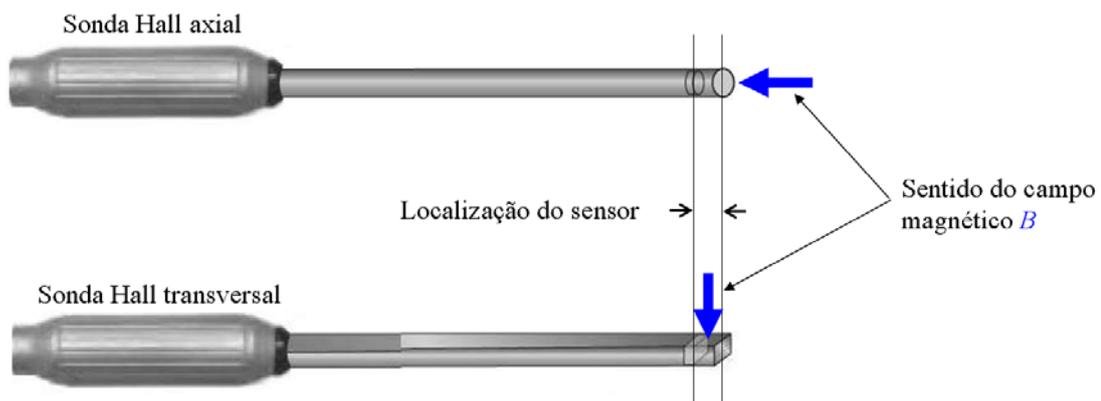


Figura 3-14. Sondas de Efeito Hall axial e transversal.

Observa-se da (3-56) que o campo medido está relacionado ao B_r . O principal problema na medição em circuito aberto no ímã é que o campo ao seu redor varia abruptamente na medida em que se muda de posição a sonda; também as dimensões e a posição de medição são críticos.

Na determinação da distância z , tem que se levar em consideração os aspectos construtivos da sonda. Na Figura 3-15 se observa um gaussímetro comercial com sua respectiva sonda Hall transversal.

O frágil elemento Hall é tipicamente montado e encapsulado em material não magnético para protegê-lo, e isso afeta a determinação exata de sua posição. O posicionamento da sonda é realmente um aspecto sério nas medições que requerem *precisão* e *exatidão* devido ao gradiente de B .

Outro aspecto a considerar é que o elemento Hall permite medir um B normal ao seu plano de trabalho. Algum desvio dessa condição poderá resultar na medida de uma componente de B em uma direção diferente da que se pretende.



Figura 3-15. Gaussímetro de Efeito Hall com sonda Hall transversa comercial Magnet-Physik.

3.5.3 Métodos e técnicas de medição nos histerisímetros

Um dos primeiros sistemas elaborados para conhecer as características magnéticas dos materiais foi o anel de Rowland da Figura 3-16, para uma mudança apropriada na excitação do primário se produzirá uma mudança de fluxo $\Delta\phi$ na bobina exploradora, de 0 até ϕ_1 , o que induzirá uma *f.e.m.* nela de acordo com a lei de Faraday e, portanto produzirá uma deflexão no galvanômetro.

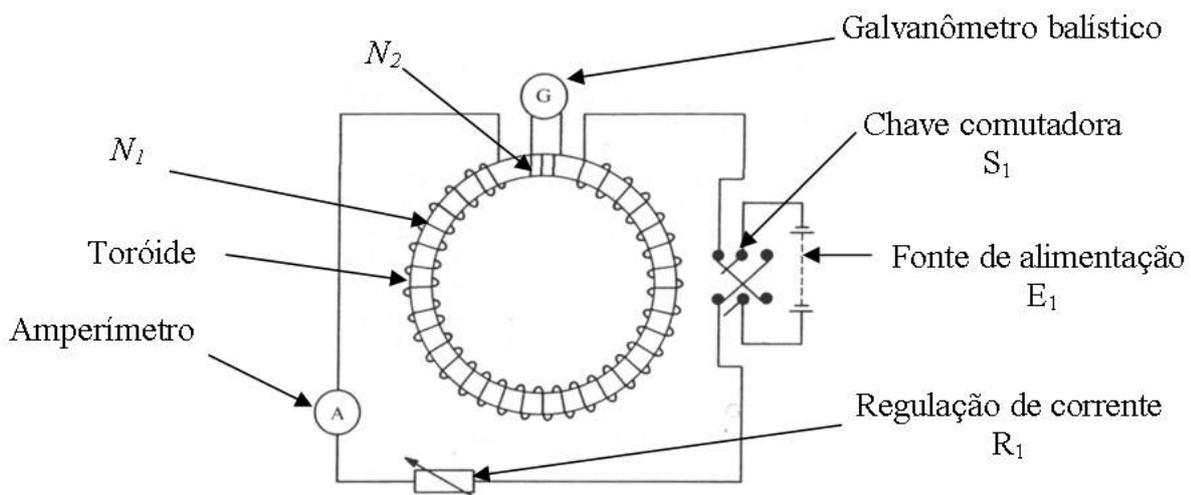


Figura 3-16. Material ferromagnético em forma toroidal com dois bobinados para determinação de desempenho magnético.

Com o galvanômetro convenientemente calibrado, sua deflexão é uma medida de $\Delta\phi$, o qual neste caso é simplesmente ϕ_1 . Se o anel somente contém ar, é achado experimentalmente que o fluxo medido da deflexão do galvanômetro é exatamente igual ao fluxo calculado na

$$\phi_1 = B_1 A = \mu H_1 A = \mu_0 H_1 A \quad (3-57)$$

obtido dos dados construtivos e dos NI .

Considere-se agora que um material ferromagnético não magnetizado constitui o núcleo do anel da Figura 3-16. O campo magnético H é estabelecido por E_1 nas espiras N_1 controlado e revertido por R_1 e S_1 . O fluxo medido agora deve ter aumentado em relação àquele calculado na expressão anterior da (3-57). Isto significa que a substância no anel adicionou linhas de força devido ao campo magnético H . A permeabilidade magnética do material do anel poderá ser calculada como:

$$\mu_r = \frac{\phi_2}{\phi_1} \quad \text{onde} \quad \phi_2 = B_2 A = \mu H_2 A = \mu_0 \mu_r H_2 A \quad (3-58)$$

Atuando sobre a chave S_1 e o resistor R_1 é possível obter diversos pontos da Figura 3-17 e traçar o correspondente laço de histerese do material como se descreve nos seguintes passos:

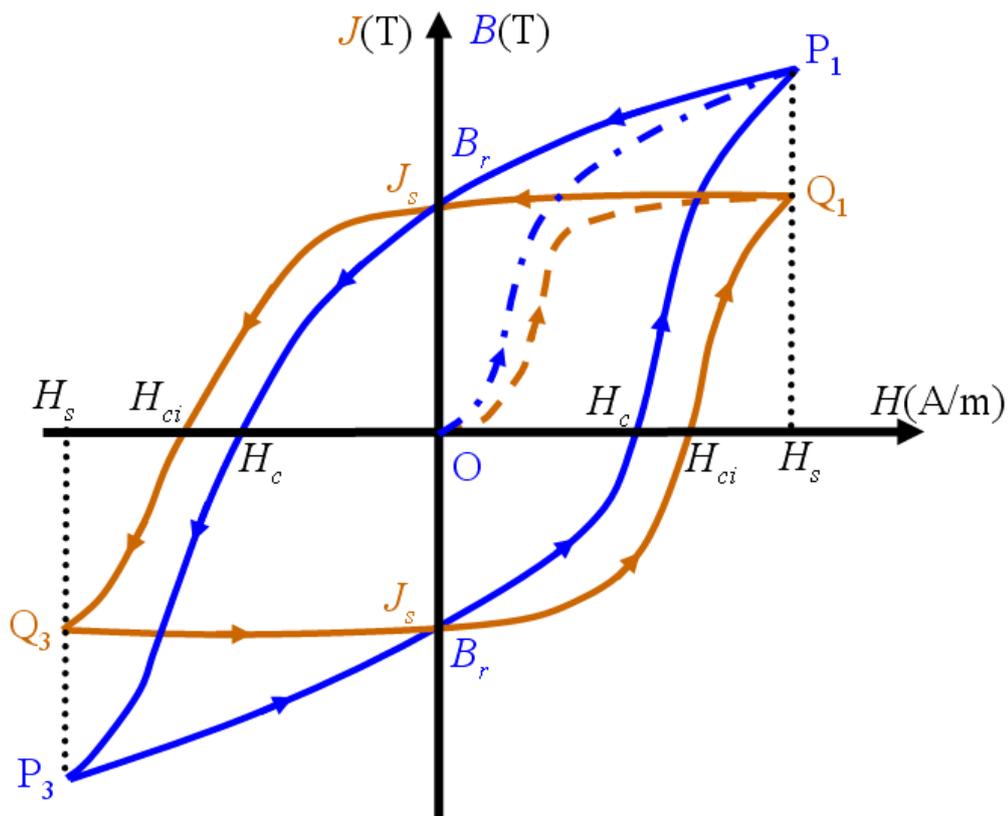


Figura 3-17. Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J (histerese) de um ímã genérico.

1. Parte-se sempre da amostra desmagnetizada; para isto, levando o resistor R_1 a seu valor mínimo, muda-se ciclicamente a chave S_1 de maneira de aplicar a máxima corrente (a máxima força magnetizante) em ambos os sentidos. Mantendo a reversão cíclica da

chave, deve aumentar-se lentamente o resistor diminuindo a força magnetizante até atingir o ponto O.

2. Tendo agora a certeza de que o espécime está desmagnetizado, o passo seguinte é realizado mediante a comutação de S_1 e o valor mínimo de R_1 , o que permite levar a amostra do máximo positivo ao máximo negativo várias vezes e finalmente registrar a deflexão do fluxímetro. Esta deflexão proporciona o valor de $\Delta B_{\max} = B_{P_1} + |B_{P_3}| = 2B_{P_1} \Rightarrow B_{P_3} = -B_{P_1}$ e estabelece a posição dos máximos.
3. Aplicando a máxima força magnetizante do primeiro quadrante procede-se à abertura de S_1 . O campo muda de H_s para zero, e o fluxímetro proporcionará o valor ΔB_1 o qual permite obter a densidade de fluxo remanente $B_r = \frac{\Delta B_{\max}}{2} - \Delta B_1$.
4. Sempre que o ciclo começou no primeiro quadrante, tem que continuar até o terceiro e voltar ao primeiro. Embora o passo anterior deteve-se em $H = 0$ para determinar B_r , é preciso mudar agora o sentido da chave S_1 para continuar o ciclo, atingir o máximo negativo e voltar logo ao primeiro quadrante.
5. Pontos intermediários entre B_r e o máximo negativo B_{P_3} são obtidos sempre partindo de P_1 com diferentes posições do resistor R_1 e usando nos cálculos o valor ΔB_{\max} .
6. Pontos intermediários entre o máximo negativo ($-B_{P_1}$) e o B_r negativo são achados partindo do máximo negativo P_3 .

Desta maneira toda a porção esquerda do laço é obtida. A porção da direita pode obter-se por simetria, e a força coercitiva H_c é achada graficamente.

Nota-se que as diversas comutações devem sempre resultar em um percurso do laço de histerese em sentido anti-horário. Se for cometido um erro na sequência de comutação (alguns sistemas tem mais de uma chave, uma para mudar o sentido da corrente e as outras para comutar resistores e conseguir mudar o valor da corrente), deve-se sempre voltar ao passo 2 e começar de novo.

O procedimento de medição num permeâmetro é basicamente como o descrito para o anel, com algumas diferenças na determinação de H . Para o caso dos instrumentos Babbitt e Burrows em que se parte da suposição de que toda a corrente de excitação é usada para magnetizar a amostra, a intensidade de campo magnético médio H aplicado ao espécime pela corrente através da bobina magnetizante é proporcional a I e pode-se determinar como no

método de Rowland: $H = \frac{NI}{l_m}$, onde l_m é o comprimento magnético médio da amostra. Nos permeâmetros em que a determinação de H é feita com uma bobina exploradora basculante (*flip coil*) posicionada ao lado da amostra (onde o campo magnético é considerado homogêneo), a expressão será

$$\Delta H = \frac{\Delta\phi}{\mu_0 A_H} \quad (3-59)$$

onde A_H é a área da bobina de medição de H . O fluxo magnético, por sua vez, pode ser determinado por integração da *f.e.m.* induzida nessa bobina exploradora, quando acontece uma mudança do fluxo magnético. Quando usado um sensor Hall, os valores de H são determinados da tensão de saída proporcional a H .

A medição de B em todos os casos é realizada com bobina exploradora envolvente à amostra. A mudança da indução magnética $\Delta B = B_2 - B_1$ no intervalo de tempo entre t_1 e t_2 é dada por:

$$\Delta B_1 = \frac{\Delta\phi}{A_B} = -\frac{\int_{t_1}^{t_2} e dt}{N_B A_B} = -\frac{\int_{t_1}^{t_2} e dt}{(NA)_B} \quad (3-60)$$

Como, em geral, as bobinas não conseguem evitar certa quantidade de fluxo disperso no ar, é preciso realizar uma correção:

$$\Delta B_2 = \Delta B_1 - \frac{(A_B - A_m) \mu_0 \Delta H}{A_m} \quad (3-61)$$

onde B_2 é a densidade de fluxo corrigido, B_1 é a densidade de fluxo medido e A_m é a área do espécime. Onde seja possível, a área transversal da amostra deve ser medida usando calibre ou micrômetro. No caso em que o espécime apresente alguma rugosidade ou por causa da forma não seja possível a determinação por medição, a área deverá ser obtida pela seguinte expressão:

$$A_m = \frac{m}{l\delta} \quad (3-62)$$

onde m é a massa do espécime [kg], l seu comprimento (no sentido da magnetização) [m] e δ a densidade do material [kg/m³].

Nos histerisímetros convencionais no subsistema de medição de B , o método continua sendo o descrito para o permeâmetro, o fluxo é medido com uma bobina exploradora ao redor do espécime que deve ser bobinado o mais perto possível da superfície da amostra. A extensão do bobinado não deve ser maior que um terço do comprimento da amostra, preferivelmente menor que um quinto e deve ser centrado no espécime.

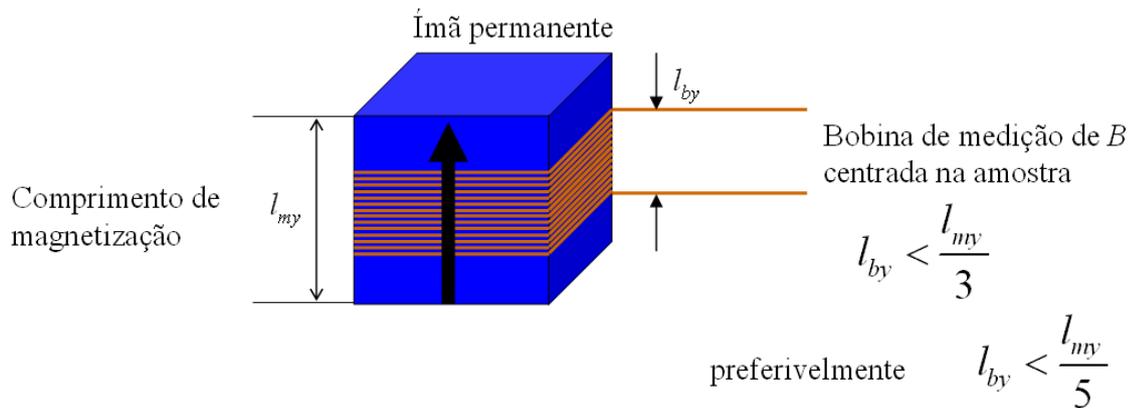


Figura 3-18. Bobina exploradora do subsistema de medição de B onde l_{my} é a espessura da amostra e l_{by} é a largura da bobina (ASTM A977, 2007).

O erro total do subsistema de medição de B não deve ultrapassar $\pm 2\%$ conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997. As expressões que se aplicam são (3-60) e (3-61).

A outra opção utilizada frequentemente é o subsistema de determinação de J que permite obter a magnetização ou indução intrínseca B_i mais conhecida como J . Para ímãs de grande coercitividade é mais conveniente obter um sinal elétrico diretamente proporcional à indução intrínseca, determinar a média dividindo este fluxo pelo produto área \times espiras e obter o gráfico de J em função de H . O B é obtido simplesmente da expressão constitutiva (3-19).

A mudança da indução intrínseca na amostra pode ser determinada integrando a tensão induzida numa combinação de duas bobinas (Figura 3-19), uma envolve a amostra e a outra fica perto dela. Se cada uma delas tem o mesmo produto área \times espiras e se elas estão conectadas em série mas opostas, o sinal resultante será J dentro da amostra (No Apêndice 1 são apresentadas as expressões deste conjunto de bobinas).

As bobinas de medição de qualquer dos subsistemas devem estar totalmente dentro do campo homogêneo definidas pelas seguintes expressões:

$$d_1 > d_2 + 1,2l_g \Rightarrow d_2 < d_1 - 1,2l_g \quad (3-63)$$

$$d_1 > 2,0l_g \quad (3-64)$$

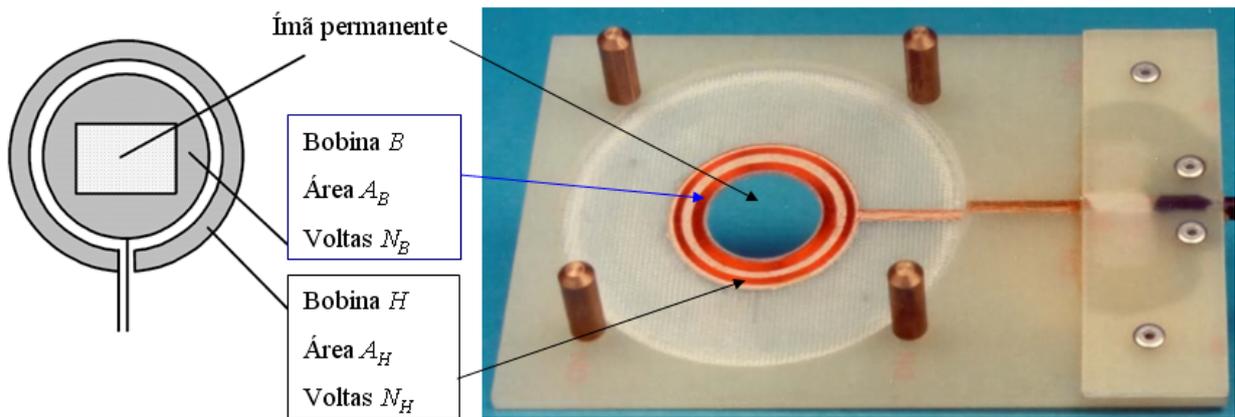


Figura 3-19. Bobina compensada que forma parte do subsistema de medição de J (STEINGROEVER, ROSS, 2008).

e pela Figura 3-20.

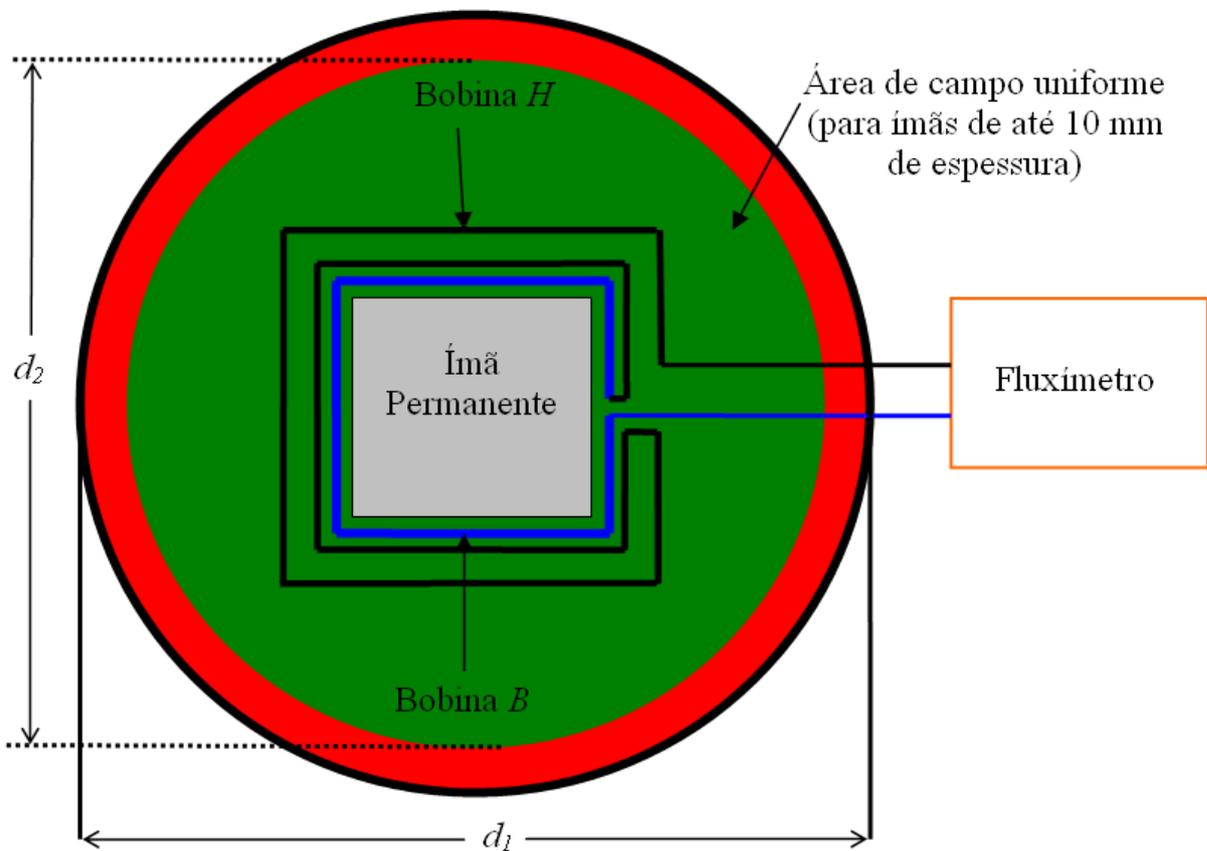


Figura 3-20. Limites de posicionamento dos diferentes sensores e bobinas no entreferro de medição, visto de cima ou corte transversal do entreferro (ASTM A977, 2007).

O erro total de medição de J não deve ser maior que $\pm 2\%$ conforme as normas IEC404-5 e ASTM A997.

Para obter as curvas de B ou J é preciso conhecer a intensidade de campo magnético H dentro do espécime. Como ele não pode ser medido diretamente, nem pode ser determinado em função dos NI e do comprimento da amostra, deve ser determinado de um subsistema de

medição. Na superfície do espécime, H é igual ao campo local justamente dentro da amostra naqueles setores onde o vetor H é paralelo à superfície da amostra.

Por conseguinte, um sensor magnético de pequenas dimensões em relação à amostra deve ser posicionado ao lado da superfície do espécime e simetricamente com relação às faces polares, cobrindo a menor porção central possível da amostra. Deve estar orientado de tal modo que meça corretamente a componente tangencial do campo magnético (CULLITY, 1972).

Para determinar a intensidade de campo magnético pode ser usada uma bobina plana superficial, uma bobina anular ajustada, um potenciômetro magnético ou uma sonda Hall. Todos eles devem ser posicionados dentro da área considerada como de campo homogêneo (STEINGROEVER, ROSS, 2008; ASTM A977, 2007). Para ímãs de alta coercitividade é essencial usar bobina delgada (se possível, um quinto do comprimento magnético da amostra), centrada no espécime e tão ajustada à superfície como possível.

Os entreferros construtivos e funcionais (entre as peças da culatra, dos pólos e entre as faces da amostra e as peças polares) devem ser os menores possíveis, tipicamente na faixa de 0,025 a 0,050 mm, Figura 3-21.

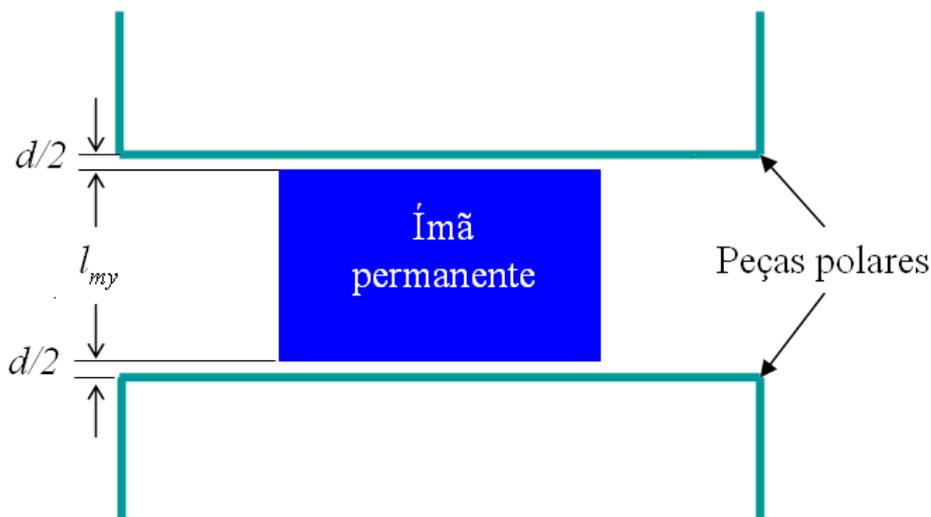


Figura 3-21. Influência dos entreferros nas faces da amostra e os pólos (ASTM A977, 2007).

O máximo erro na medição de intensidade de campo magnético, como resultado de dois entreferros simétricos de comprimento d é aproximadamente:

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{2Bd}{l_{my}\mu_0 H} \quad (3-65)$$

Para manter o erro relativo porcentual $\left(\frac{\Delta H}{H}100\right) < 1\%$ na região do ponto de máximo produto energético $(BH)_{\max}$, a espessura do entreferro deve ser mantida abaixo dos seguintes valores na Tabela 3-6.

Tabela 3-6. Entreferrros para diferentes tipos de amostras e comprimentos.

| Amostra | d / l_{my} |
|---------------------|--------------------------------|
| Alnico | 0,00025 |
| Cerâmico | 0,005 |
| Terras Raras | 0,003 |

Fonte: (ASTM A977, 2007)

O procedimento de caracterização, partindo da suposição que será usada uma configuração de medição de bobina J compensada, é o seguinte:

1. Teste de zero quando o subsistema é inserido sem amostra no entreferro e feita uma varredura completa de H . Também é suposto que os subsistemas de determinação de H , B ou J foram calibrados por algum método apropriado.
2. O entreferro é ajustado ao comprimento da amostra. A intensidade de campo do entreferro, tipicamente medido com sonda Hall, deve ser levada tão perto de zero como possível pela corrente de excitação do eletromagneto.
3. Para as amostras da Tabela 2-3 que podem ser magnetizadas até saturação com o histerisímetro é descrita a obtenção da curva de magnetização inicial. Ambos integradores são zerados. A amostra desmagnetizada é inserida dentro da bobina ou sistema de bobinas e inserida no entreferro. Os pólos são fechados sobre a amostra e fixados nessa posição. Com amostras pequenas ou frágeis, a distância do entreferro deve ser fixada adicionalmente usando espaçadores não magnéticos para evitar quebrar a amostra ou danificar as bobinas exploradoras.
4. O campo magnetizante é agora aplicado e gradualmente incrementado ao máximo nível requerido (entretanto os dados de cada ponto são armazenados digitalmente e a curva é visualizada numa tela de computador). O ciclo do primeiro quadrante (campo zero – máximo campo magnetizante – campo zero) deve ser feito em não menos de 10 s, e deve tomar até um minuto ou mais, se a estabilidade dos fluxímetros permite. Um laço de histerese (ou uma porção sua) muito rápido pode resultar em erros significativos como resultado de correntes parasitas e atrasos em B .

5. Curva de desmagnetização – Amostra magnetizada na culatra. Os passos 3 e 4 são realizados primeiro. Se o espécime foi magnetizado previamente, pode ser importante aplicar um campo inicial no mesmo sentido da magnetização devidamente sinalizada na amostra. Quando o espécime magnetizado é inserido na bobina, o campo desmagnetizante estabelece o ponto (B,H) no segundo quadrante. Inserindo a bobina com a amostra no eletromagneto, reposiciona-se o ponto mais perto do eixo $H = 0$ e possivelmente dentro do primeiro quadrante, dependendo da remanência ou indução remanente presente nos pólos e na culatra.
6. A seguir é aplicada uma excitação direta (no sentido da magnetização indicada na amostra) positiva de campo magnetizante, levando o ponto BH ainda mais dentro do primeiro quadrante. O campo é incrementado ao máximo proposto (ou o máximo disponível) em alguns segundos, logo deve ser reduzido a zero rapidamente. Com zero corrente, o estado de magnetização residual ficará ainda no primeiro quadrante devido à remanência dos pólos e da culatra.
7. A corrente então é invertida e incrementada, produzindo um campo negativo crescente, até que o valor de H exceda a intensidade do campo coercitivo H_c . No caso em que o eletromagneto for capaz de fornecer um campo desmagnetizante suficiente, é obtido então o H_{ci} para $J = 0$.
8. Curva de desmagnetização – Amostra magnetizada externamente. Os materiais de alta coercitividade são magnetizados externamente e logo transferidos ao histerisímetro. A direção de magnetização deve ser indicada na amostra. São preferidos espécimes com relação comprimento/diâmetro maior que dois, pois a auto-desmagnetização irreversível de uma amostra curta pode influenciar a exatidão dos resultados.
9. O procedimento geral do passo 5 é seguido exceto que a magnetização direta inicial sempre deve ser a máxima disponível.
10. Laços de retorno. Para alcançar o ponto de início (B_{rec}, H_{rec}) da linha de retorno na curva ou laço de desmagnetização principal, Figura 3-7, o procedimento 5 é usado, mas quando H_{rec} é alcançado, a corrente de magnetização é invertida e sua magnitude, diminuída. O valor absoluto de H é então reduzido pelo ΔH , B se incrementa em ΔB , e μ_r será igual a $\Delta B / \Delta H$. Como μ_r usualmente não é constante ao longo da curva de desmagnetização e também depende da extensão do retorno, os valores H_{rec} , B_{rec} e ΔH devem ser indicados.

11. Para obter outro laço de retorno, o módulo de H é novamente incrementado a um novo valor maior que H_{rec} e o procedimento 10 é repetido. Em um laço típico de retorno, ou todos eles têm o mesmo ΔH , ou todos retornam totalmente até $H = 0$. Qualquer número de curvas de retorno pode ser obtido, mas a exatidão é perdida como resultado da acumulação da deriva do integrador.

3.6 Medições estáticas ou quase-estáticas

Algumas aplicações envolvem a medição de quantidades que são constantes ou variam muito lentamente. Sob essas condições, é possível definir um conjunto de critérios de desempenho que dão uma descrição significativa da qualidade da medição sem necessidade de se fazer uso de descrições dinâmicas envolvendo equações diferenciais. Estes critérios são denominados características estáticas.

3.6.1 Características estáticas e calibração estática

Em geral, *calibração estática* refere-se à situação na qual todas as entradas (desejadas, interferentes, modificantes) exceto uma, são mantidas a valores constantes. Nessa situação, a única entrada sob foco é variada através de valores fixos, o qual fará com que a saída varie também através de valores fixos. A relação entrada/saída obtida desta maneira consiste numa calibração estática *válida sob as condições constantes declaradas nas outras entradas*. Este procedimento pode ser repetido, variando uma entrada de interesse por vez e então desenvolvendo uma família de relações estáticas de entrada/saída. Com isso espera-se descrever o comportamento estático geral do instrumento com algum tipo adequado de superposição dos efeitos individuais. Examinando criticamente um instrumento é possível encontrar muitas entradas modificantes e/ou interferentes, cada uma poderia ter pequenos efeitos impraticáveis de controlar. Assim a frase “*todas as outras entradas devem ser mantidas constantes*” refere-se a uma situação ideal à qual somente se pode aproximar, mas seria inalcançável na prática.

O fato de que uma entrada ser modificada enquanto as outras são mantidas constantes implica que todas elas sejam determinadas (medidas) independentemente do instrumento em questão. A regra frequentemente utilizada estabelece que o sistema de calibração (o padrão e qualquer aparato auxiliar usado com ele) possua uma incerteza total quatro vezes melhor que a unidade sob teste (DOEBELIN, 2004).

Um padrão para certas variáveis físicas é frequentemente outro dispositivo de medição para tal variável. No entanto, para ser chamado de padrão, sua exatidão deve ser de um nível superior que o instrumento a ser calibrado (continua o requerimento mínimo de quatro vezes melhor).

3.6.2 Valor medido vs. Valor verdadeiro

Quando é medida alguma quantidade física com um instrumento e obtido um valor numérico. Usualmente é de interesse saber quão perto este valor está do valor “verdadeiro”. É necessário primeiro reconhecer que o valor chamado de verdadeiro na verdade não é conhecido nem é possível conhecer, visto que definições exatas de quantidades físicas a ser medidas são impossíveis. Por isso o termo “valor verdadeiro” na verdade se refere ao valor chamado de *referência* ou *valor verdadeiro convencional* (V.V.C.) que se obteria se a quantidade sob consideração fosse medida com *método exemplar*, isto é, um método acordado e reconhecido como sendo suficientemente exato para os propósitos para o qual os dados serão usados.

Se o processo de medição é repetido um grande número de vezes sob *assumidas* condições idênticas, obtém-se um grande número de leituras do instrumento. Usualmente essas leituras não serão as mesmas, o que leva a reconhecer que tentar as condições idênticas em cada medição é improvável. Os dados gerados desta maneira poderiam ser usados para descrever o processo de medição, de maneira que, se são usadas no futuro, a estatística será capaz de incorporar alguma estimação numérica de erro em suas saídas através da incerteza associada com a *repetitividade* (ou mais apropriadamente não repetitividade).

Se os dados de saída devem proporcionar uma descrição significativa do processo de medição, eles devem formar o que se denomina uma *sequência aleatória*. Outra maneira de dizer isto é que o processo deve estar sob *controle estatístico*. Comprovar experimentalmente que um processo está sob controle estatístico não é uma tarefa trivial; de fato, alcançar controle estatístico estrito é improvável (DOEBELIN, 2004).

3.6.3 Estatística e incertezas nas medições

Suponha-se que se dispõe de um padrão quatro vezes mais exato que a requerida exatidão numa dada medição, que foram arranjasdas as condições para manter as outras entradas razoavelmente perto das condições reais de funcionamento. A seguir é realizado certo número de medições cujos dados são convenientemente registrados. Definindo uma quantidade Z como:

$$Z = \frac{\text{número de leituras num intervalo}}{\frac{\text{número total de medições}}{\text{largura do intervalo}}} \quad (3-66)$$

É possível arranjar as medições como gráfico de barras com altura Z para cada intervalo num *histograma*. A área de uma barra particular é numericamente igual à *probabilidade* que uma leitura específica vai pertencer ao intervalo associado. A área do histograma todo deve ser 1 visto que existe 100% de probabilidade que a leitura vai ficar em algum ponto entre o menor e o maior valor, baseado nos dados disponíveis.

Se fosse possível obter um número infinito de leituras, cada uma com um número infinito de dígitos significativos, os intervalos podem ser feitos tão pequenos como se desejar e ainda assim conter um número finito de leituras. O gráfico de barras, no limite, irá se aproximando a uma curva. Se este caso abstrato é considerado como modelo matemático para uma situação física real, a função $Z = f(x)$ é denominada *função densidade de probabilidade* para o modelo matemático do processo físico real. Da definição básica de Z

$$\text{Probabilidade da leitura ficar entre } a \text{ e } b = P(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx \quad (3-67)$$

A informação de probabilidade pode ser proporcionada em termos da *função distribuição cumulativa* $F(x)$, definida como:

$$\text{Probabilidade da leitura ser menor que qualquer valor escolhido de } x = F(x) = \int_{-\infty}^x f(x) dx \quad (3-68)$$

Do número infinito de formas possíveis para as funções de densidade de probabilidade, um número reduzido são modelos matemáticos úteis para as aplicações práticas; de fato, *uma* em particular é muito dominante. A mais útil e usada função densidade ou distribuição é a normal ou função *Gaussiana*, a qual está dada como (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement* GUM , 2008; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS ABNT, 1998):

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad -\infty < x < +\infty \quad (3-69)$$

$f(x)$ é uma função simétrica, com máximo no valor médio $x = \mu$, e satisfaz a condição de normalização $\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$. O μ é o valor mais provável de x , identificado com o *valor verdadeiro* do mensurando, com o significado que este termo tem no sentido estatístico. No

sentido estrito deveria ser resultado de uma medição perfeita, mas como se sabe que isto não acontece, o verdadeiro valor do mensurando jamais pode ser conhecido. Se o resultado de uma determinada medição é x , a diferença $\varepsilon = x - \mu$ é definida como erro de medição, mas, como μ não pode ser conhecido, ε será uma quantidade desconhecida. O fator σ^2 é o momento de segunda ordem em relação à média denominado *variância*:

$$\sigma^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (x - \mu)^2 f(x) dx \quad (3-70)$$

Sua raiz quadrada σ produz uma idéia quantitativa da dispersão dos valores medidos ao redor do valor verdadeiro e é denominado *desvio padrão*.

Historicamente, a função normal foi proposta por Gauss a fim de representar a distribuição de erro nas observações astronômicas. Trata-se da função distribuição idealizada associada com uma variável verdadeiramente estocástica. Qualquer leitura ou medição desta variável pode ser pensada como afetada por pequenas contribuições com amplitude e sinal aleatórios, as quais são geradas por um grande numero de fontes de influência. O *teorema do limite central* assegura que, em um caso assim, os valores tomados pela variável seguem de perto uma lei normal, seja qual for a função distribuição das variáveis contribuintes. Entende-se portanto que $f(x)$ pode ser assumida como sendo de tipo normal.

Qualquer medição, ainda que seja cuidadosamente feita e corrigida por qualquer tendência, pode somente ser uma aproximação de um processo Gaussiano e o que se obtém, em geral, é uma estimação do verdadeiro valor do mensurando. Se forem feitas n observações independentes da quantidade mensurável x_i obtendo-se os valores $x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}$, a melhor estimativa é obtida pela média aritmética (GUM, 2008),

$$\bar{x}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{i,k} \quad (3-71)$$

onde o sub-índice i corresponde a uma das N entradas ou mensurandos, e k é o índice de observações. As medições individuais $x_{i,k}$ diferem devido a efeitos aleatórios. No limite $n \rightarrow \infty$, espera-se que $\bar{x} = \mu$. Na realidade, é dificultoso na maioria das instâncias preencher as condições de sistema estacionário para um tempo suficientemente longo, e um número convenientemente grande de repetições é escolhido de acordo com condições específicas estabelecidas pelo problema sob teste. De um conjunto de medições, pode-se obter uma estimativa da vari-

ância σ^2 de toda a população dos valores possíveis do mensurando pela definição de uma *variância experimental* $s^2(x_{i,k})$,

$$s^2(x_{i,k}) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \quad (3-72)$$

Isto caracteriza a dispersão dos valores medidos ao redor do $\bar{x}_{i,k}$ junto com sua raiz quadrada, denominada *desvio padrão experimental* $s(x_{i,k})$. Deve-se notar que o número de graus de liberdade $\nu = n - 1$ é usado na definição da variância experimental na (3-72). De fato, dos n termos, somente $n - 1$ são independentes. Como o experimento produz o valor \bar{x}_i como melhor estimativa do verdadeiro valor do mensurando, precisa-se conhecer quão bom é tal estimativa. Por si mesma, \bar{x}_i é uma quantidade aleatória, sua variância e desvio padrão são $\sigma^2(\bar{x}_i) = \frac{\sigma^2}{n}$ e $\sigma(\bar{x}_i) = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ respectivamente (lei de grandes números). A melhor estimativa de $\sigma^2(\bar{x}_i)$ e $\sigma(\bar{x}_i)$ são (GUM, 2008)

$$s^2(\bar{x}_i) = \frac{s^2(x_{i,k})}{n} = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2 \quad (3-73)$$

$$s(\bar{x}_i) = \frac{s(x_{i,k})}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{i,k} - \bar{x}_i)^2} \quad (3-74)$$

Ou seja, a variância experimental e o desvio padrão da média, respectivamente. $s(\bar{y})$ é também chamada *incerteza padrão* $u(\bar{y})$ da melhor estimativa da quantidade medível (mensurando) y

$$u(\bar{x}_i) \equiv s(\bar{x}_i) \quad (3-75)$$

E sua correspondente variância é $u^2(\bar{x}_i) \equiv s^2(\bar{x}_i)$. De acordo com esta definição, a incerteza padrão $u(\bar{x}_i)$ é um parâmetro que produz uma avaliação quantitativa da dispersão de valores que podem ser atribuídas razoavelmente ao mensurando.

Fazendo repetidas medições da mesma quantidade, os efeitos estocásticos são então revelados e podem ser quantificados por meio da incerteza padrão. Existem, no entanto, fontes de incerteza extra, cuja contribuição permanece constante ainda que as medições sejam repetidas. Estas podem derivar das condições ambientais (temperatura, umidade, e

interferências eletromagnéticas), calibração e resolução do equipamento, peculiaridades do circuito elétrico (por exemplo, força eletromotriz térmica), derivas e distorções, suposições inexatas a respeito das constantes e parâmetros a ser usados no procedimento de tratamento de dados, e erros humanos. A incerteza relatada é tradicionalmente classificada como sistemática, em contraste com a incerteza aleatória, associada com repetidas medições. O método pelo qual é obtida uma contribuição de incerteza que deriva de efeitos sistemáticos é definido como método de avaliação de Tipo B. Para medições repetitivas refere-se ao método de avaliação de incertezas Tipo A.

Para as incertezas de Tipo A, as densidades de probabilidade são obtidas de distribuições de frequência observadas estatisticamente; no entanto, para as incertezas do Tipo B, o responsável pelas medições faz escolha das probabilidades “a priori” (FIORILLO, 2004).

Quando é aplicado o Tipo B, é feita uma suposição em relação à função distribuição dos valores do mensurando. Se forem derivados de um certificado de calibração, esta distribuição é convenientemente suposta como sendo de tipo normal. Em outros casos, somente é possível estimar limites superior e inferior x_{i0-} e x_{i0+} para os valores de x que pode adotar numa medição específica. Sem um conhecimento específico adicional de como esses valores estão distribuídos, pode-se assumir razoavelmente que eles podem pertencer igualmente a qualquer ponto no intervalo (x_{i0-}, x_{i0+}) . A variância e a incerteza associadas com o valor esperado

$\bar{x}_i = \frac{x_{i0-} + x_{i0+}}{2}$ desta distribuição retangular simétrica (Figura 3-22) ficam expressadas,

denominando $x_{i0+} - x_{i0-} = 2a$, pelas equações (GUM, 2008):

$$u^2(\bar{x}_i) = \frac{(x_{i0+} - x_{i0-})^2}{12} = \frac{(2a)^2}{12} = \frac{4a^2}{12} = \frac{a^2}{3} \Rightarrow u(\bar{x}_i) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (3-76)$$

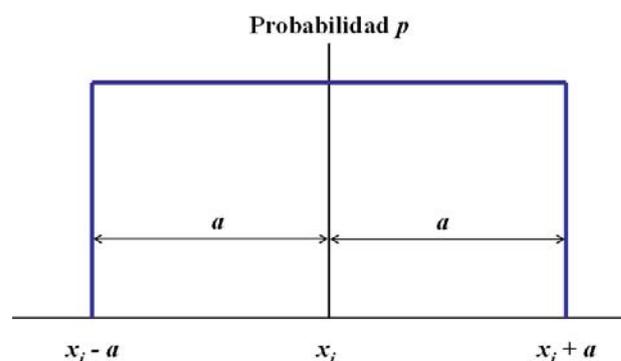


Figura 3-22. Distribuição uniforme, o valor esperado x_i encontra-se no centro da distribuição de valores possíveis com uma meia extensão ou semi-faixa a (GUM, 1998).

3.6.3.1 Incerteza Combinada

Usualmente, não é realizada uma determinação direta do mesurando, mas certo número de quantidades de entrada deve ser considerado como parte de uma medição. Se Y é o mensurando procurado e X_1, X_2, \dots, X_N são as grandezas de entrada das quais a grandeza de saída Y depende, então $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$; como não é possível determinar o valor exato destas grandezas, trabalha-se com estimativas; assim a estimativa da saída y pode ser escrita como

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (3-77)$$

E a melhor estimativa da quantidade de saída, $\bar{y} = f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N)$.

A identificação das quantidades de entrada é um passo crucial de todo o processo de determinação de incertezas. Estas podem incluir, além das quantidades sujeitas a medições diretamente, a correção de tendência de \bar{y} sugerido pelo procedimento especificamente considerado na medição.

Então o problema passa a ser de determinação da variância e incerteza de \bar{y} do conhecimento das quantidades $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_N$ levando em conta possíveis efeitos de correlação. Neste ponto, assume-se que a função f e suas derivadas são contínuas no entorno do valor de \bar{y} . O desenvolvimento da série de Taylor, truncada na primeira ordem, produz, para pequenos intervalos $(x_i - \bar{x})$ (GUM, 2008):

$$y - \bar{y} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right) (x_i - \bar{x}) \quad (3-78)$$

O quadrado da (3-78):

$$(y - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 (x_i - \bar{x}_i)^2 + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} (x_i - \bar{x}_i)(x_j - \bar{x}_j) \quad (3-79)$$

Interpretando as diferenças da (3-79) como amostras experimentais e pegando as médias, pode ser expressada a variância da estimação da saída como uma combinação das variâncias $u^2(\bar{x}_i)$ e covariâncias $u(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$ das estimações das entradas, de acordo com a *lei de propagação de incertezas*:

$$u_c^2(\bar{y}) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(\bar{x}_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(\bar{x}_i, \bar{x}_j) \quad (3-80)$$

onde $u_c^2(\bar{y})$ é denominada *variância combinada* e sua raiz quadrada $u_c(\bar{y})$ é a *incerteza padrão combinada*. As derivadas parciais da (3-80) são chamadas *coeficientes de sensibilidade*, e indicando como $c_i \equiv \frac{\partial f}{\partial x_i}$, pode-se re-escrever a (3-80) como

$$u_c^2(\bar{y}) = \sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(\bar{x}_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N c_i c_j u(\bar{x}_i, \bar{x}_j) \quad (3-81)$$

A (3-81) é de caráter geral e combina variâncias e covariâncias de quantidades de entrada independente do tipo do método de avaliação (A ou B) empregado em sua obtenção. Uma entrada estimada \bar{x}_i pode estar associada com incertezas tanto de Tipo A como de Tipo B, e a variância relacionada da (3-81) é escrita como (GUM, 2008)

$$u^2(\bar{x}_i) = u_A^2(\bar{x}_i) + u_B^2(\bar{x}_i) \quad (3-82)$$

Note-se que a quantidade de saída y é associada em muitos casos com uma função distribuição normal aproximada, embora a função distribuição das quantidades de entrada esteja longe da distribuição normal. De fato, pode-se linearizar a relação funcional (3-77) ao redor das melhores estimativas das quantidades de entrada por meio do desenvolvimento da série de Taylor truncada na primeira ordem (3-78).

A distribuição de saída é então produzida pela convolução das distribuições de entrada e, de acordo com o teorema de limite central, pode ser aproximado por uma distribuição normal; quanto maior o número de repetições e de quantidades de entrada, melhor é a aproximação. O caso em que existe uma componente de incerteza dominante de Tipo B, com distribuição diferente da normal, é uma exceção a esta regra (GUM, 2008).

Frequentemente os coeficientes de sensibilidade são avaliados por experimentos determinando a variação da quantidade de saída y sob uma pequena variação da quantidade de entrada x_i . As outras quantidades de entrada devem ficar fixadas, se as variáveis de entrada são não-correlacionadas, a covariância $u(\bar{x}_i, \bar{x}_j)$ é zero e a incerteza combinada se reduz a:

$$u_c(\bar{y}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N c_i^2 u^2(\bar{x}_i)} \quad (3-83)$$

Uma indicação do grau de correlação é providenciada pelo valor do coeficiente

$$r(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \frac{u(\bar{x}_i, \bar{x}_j)}{u(\bar{x}_i)u(\bar{x}_j)} \quad (3-84)$$

o qual varia de 0 a 1, correspondendo a variáveis de entrada não-correlacionadas a completamente correlacionadas. Neste último caso, a incerteza padrão combinada é:

$$u_c(\bar{y}) = \sum_{i=1}^N c_i u(\bar{x}_i) \quad (3-85)$$

Para a avaliação de incerteza Tipo A, a covariância de duas entradas estimadas correlacionadas (\bar{x}_i, \bar{x}_j) podem ser avaliadas experimentalmente formando produtos cruzados $(x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j)$ em cada repetição e achando a média deles de acordo com a equação (GUM, 2008)

$$u(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = s(\bar{x}_i, \bar{x}_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j) \quad (3-86)$$

Para uma avaliação Tipo B, deve ser feita uma análise crítica da informação disponível da influência recíproca dos estimativos de entrada. Se, por exemplo, é conhecido que a variação Δ_i de \bar{x}_i produz uma variação Δ_j de \bar{x}_j , o coeficiente de correlação pode ser aproximadamente estimado como:

$$r(\bar{x}_i, \bar{x}_j) \approx \frac{u(\bar{x}_i) \Delta_j}{u(\bar{x}_j) \Delta_i} \quad (3-87)$$

3.6.3.2 Incerteza expandida e nível de confiança. Incerteza ponderada

A informação obtida das medições pode ser confidentemente coletada em dois parâmetros: a melhor estimativa (média experimental) e a incerteza combinada. Exceto para casos especiais, a distribuição de probabilidade da quantidade de saída, sendo a convolução das distribuições das entradas, é aproximadamente de tipo normal (teorema do limite central).

Se z é a quantidade descrita pela função distribuição normal, caracterizada por um valor de expectativa μ e um desvio padrão σ , e definido um *intervalo de confiança* $\pm k \sigma$ ao redor de μ , integrando a função distribuição nesse entorno pode-se obter o correspondente *nível de confiança* p (a porção incluída na área da distribuição). Com fatores de cobertura $k = 1, 2, \text{ e } 3$, os níveis de confiança são $p = 68, 95,5 \text{ e } 99,7\%$ respectivamente.

Embora u_c (incerteza combinada) possa ser usada para expressar a incerteza de um resultado de medição, é muitas vezes necessário dar uma medida de incerteza que defina um intervalo em torno do resultado da medição. Com ele se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (GUM,

2008). Esta medida adicional de incerteza é denominada *incerteza expandida* e é representada por U . A incerteza expandida U é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada u_c por um fator de abrangência k :

$$U = ku_c(y) \quad (3-88)$$

O resultado de uma medição é, então, convenientemente expresso como:

$$Y = y \pm U \quad (3-89)$$

que é interpretado de forma a significar que a melhor estimativa do valor atribuível ao mensurando Y é y , e que $y - U$ a $y + U$ é um intervalo com o qual se espera abranger uma extensa fração da distribuição de valores que podem ser razoavelmente atribuídos a Y . Tal intervalo é também expresso como

$$y - U \leq Y \leq y + U \quad (3-90)$$

O valor do fator de abrangência k é escolhido com base no nível da confiança requerido para o intervalo $y - U$ a $y + U$. Em geral, k é adotado entre 2 e 3 (GUM, 2008).

4 O HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL HEV

4.1 Introdução

A determinação das principais propriedades magnéticas de um ímã permanente geralmente requer configurações de medição sofisticadas e custosas. Neste trabalho propõe-se um sistema de caracterização de ímãs permanentes de desmagnetização linear, à temperatura ambiente, de baixo custo e de implementação simples. Este consiste em um circuito magnético formado pelo ímã em estudo, uma culatra de aço, um entreferro variável, um gaussímetro com sua respectiva sonda de efeito Hall e um fluxímetro com suas respectivas bobinas exploradoras. Esse dispositivo daqui em diante será denominado **HEV**, ou seja, **histerisímetro de entreferro variável**.

4.2 Estrutura Básica do HEV

No objetivo de caracterizar ímãs permanentes confluem aspectos econômicos e tecnológicos que influenciam o projeto do sistema, principalmente do circuito magnético. Entre eles pode-se mencionar:

1. tipo e tamanho das amostras;
2. máxima densidade de fluxo magnético;
3. condições mecânicas (que podem otimizar não somente o procedimento de medição, mas também o desempenho magnético, minimizando o fluxo disperso e de espraio).

Tendo por base as amostras comerciais prontas e disponíveis para testes de caracterização pelo HEV, cinco são de tipo cilíndrica e sete de tipo bloco. Considerando o maior espécime como tendo 16 cm^3 , que a maior densidade de fluxo magnético dos ímãs permanentes no caso é do NdFeB e da ordem de 1,3 T e atendendo as normas quanto ao campo magnético uniforme, é possível estimar o tamanho e o material dos polos.

A metodologia de caracterização está baseada fortemente na redução de energia consumida e na não alteração das características dos ímãs permanentes. Na ideia de entreferro variável, pensou-se num sistema de abertura e fechamento simples onde o espécime seja posicionado no entreferro, na sua face superior uma sonda Hall e um pólo móvel. A configuração simétrica de dupla janela foi implementada a fim de obter mobilidade sem complicação mecânica.

nica na formação de um entreferro e manter a configuração geométrica o mais homogênea possível.

Considerando então a metodologia do HEV (que não requer magnetização até saturação nem a desmagnetização atingindo o H_{ci} das amostras), os valores máximos de densidade de fluxo magnético das amostras disponíveis, os requerimentos mecânicos de movimentação do braço central superior e os requerimentos magnéticos de homogeneidade e simetria dos parâmetros no entreferro, é que o HEV2 foi desenhado e construído em aço SAE 1020 com quadro externo de 640 mm × 580 mm × 80 mm, e braços de 80 mm × 80 mm.

Nas considerações das dimensões foram atendidas as premissas de não saturação do material da culatra e uma queda magnética não superior a 1% do H_{clm} máximo em condições de circuito fechado e excitação reduzida. Na Figura 4-1 pode ser vista a estrutura física do HEV2.

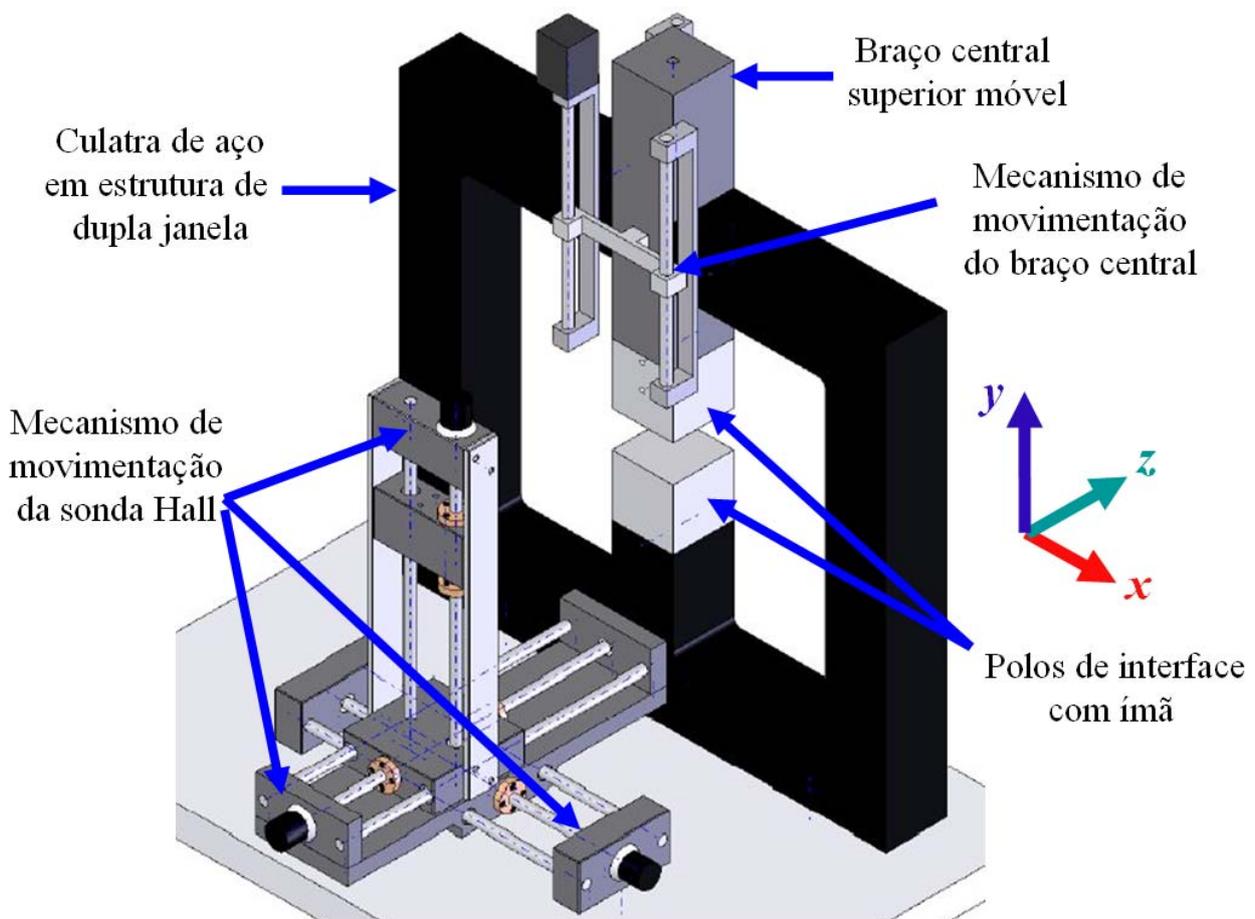


Figura 4-1. Estrutura física básica do HEV2.

Nas considerações do desenho dos polos foram também atendidas as diferentes geometrias das amostras e as condições estabelecidas pelas normas enquanto o campo uniforme na medição com bobina fluximétrica e sonda Hall.

No centro da estrutura da Figura 4-1 observa-se o espaço reservado para o espécime (ímã permanente) a ser caracterizado (nesta figura observam-se os polos quadrados de 80 mm).

Foram ensaiados, além desses polos quadrados, um par de polos tipo tronco de cone e dois pares de polos tipo tronco de pirâmide, um com face polar de 40 mm de lado e outro de face polar com 25,4 mm de lado, Figura 4-2. Os acessórios utilizados para não danificar os ímãs são de alumínio desenhados para deter o polo superior a 1 mm da amostra.

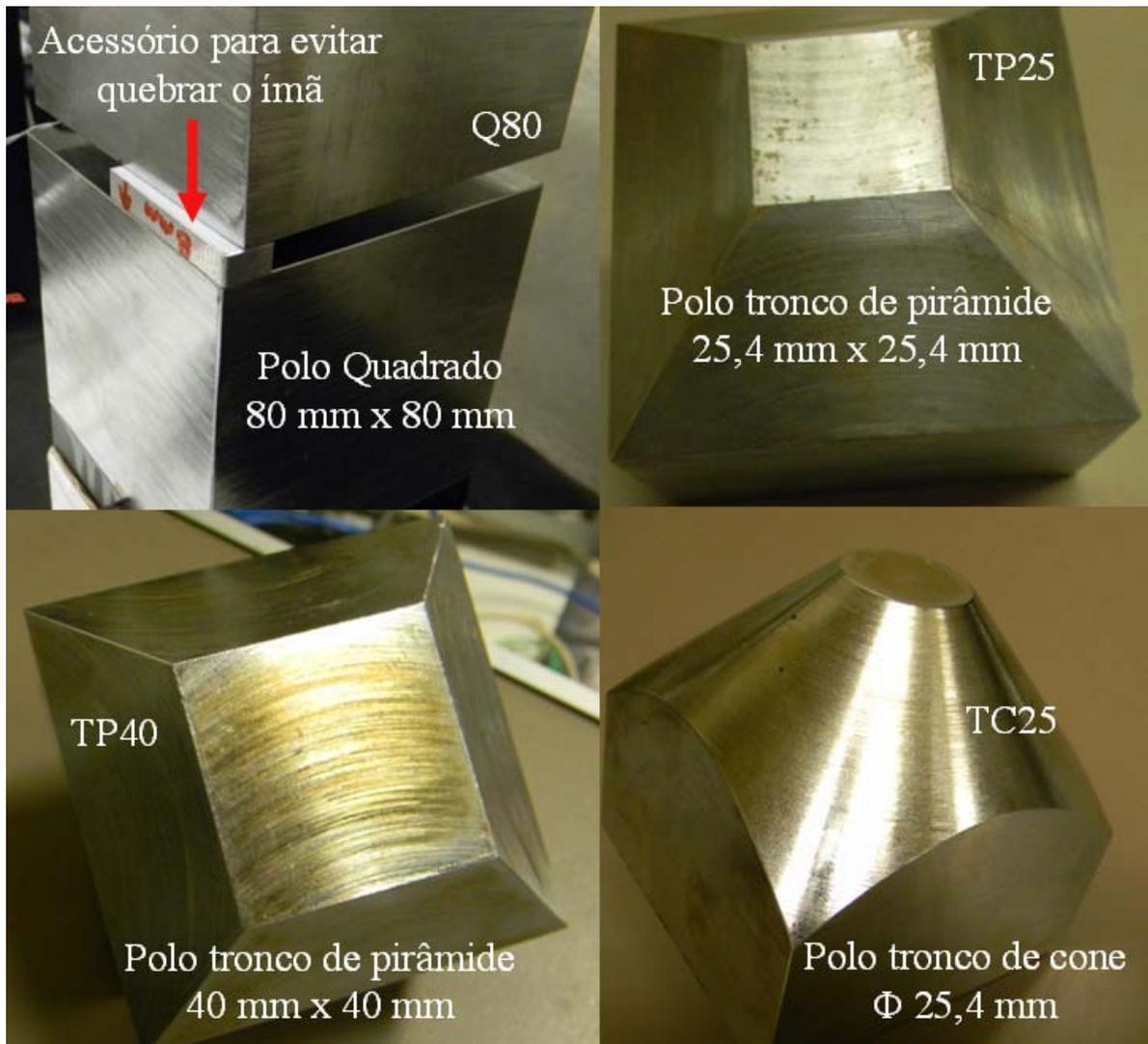


Figura 4-2. Polos adequados a cada geometria ensaiada.

Na Figura 4-3 observa-se a configuração de medição com os respectivos instrumentos. Junto ao suporte central superior do braço central móvel posiciona-se o LVDT (oculto pela estrutura, embaixo do relógio comparador) que traduz os deslocamentos do entreferro em uma tensão de CA senoidal e através de um condicionador em uma tensão de CC. Em paralelo com esta medição tem-se a leitura do relógio comparador como sistema auxiliar de calibração.

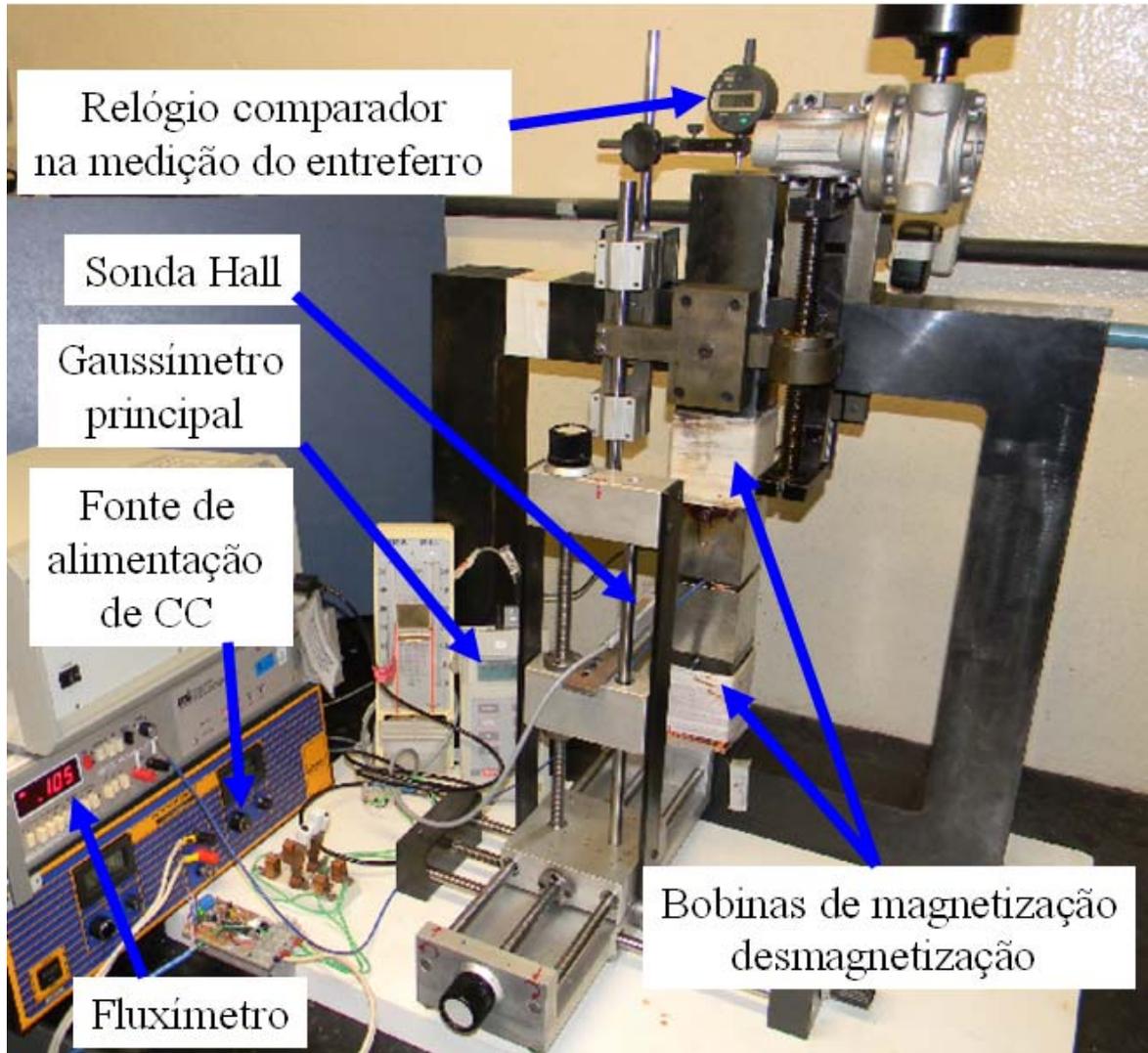


Figura 4-3. Disposição dos instrumentos de medição em uma caracterização típica.

4.3 Elementos constituintes do HEV

O aço SAE 1020 utilizado na culatra e pólos do HEV tem as características magnéticas como mostradas na Figura 4-4.

O aço A1020 é recozido ou temperado com direção de laminação desconhecida; o L1020 é laminado a frio na direção da dimensão mais longa, e o T1020 é também laminado a frio, mas em forma transversal à dimensão mais longa. Embora não sejam conhecidas exatamente as características do aço usado no HEV, qualquer deles apresenta características magnéticas adequadas: alta permeabilidade relativa (maior que 2000) e saturação acima de 1 Tesla.

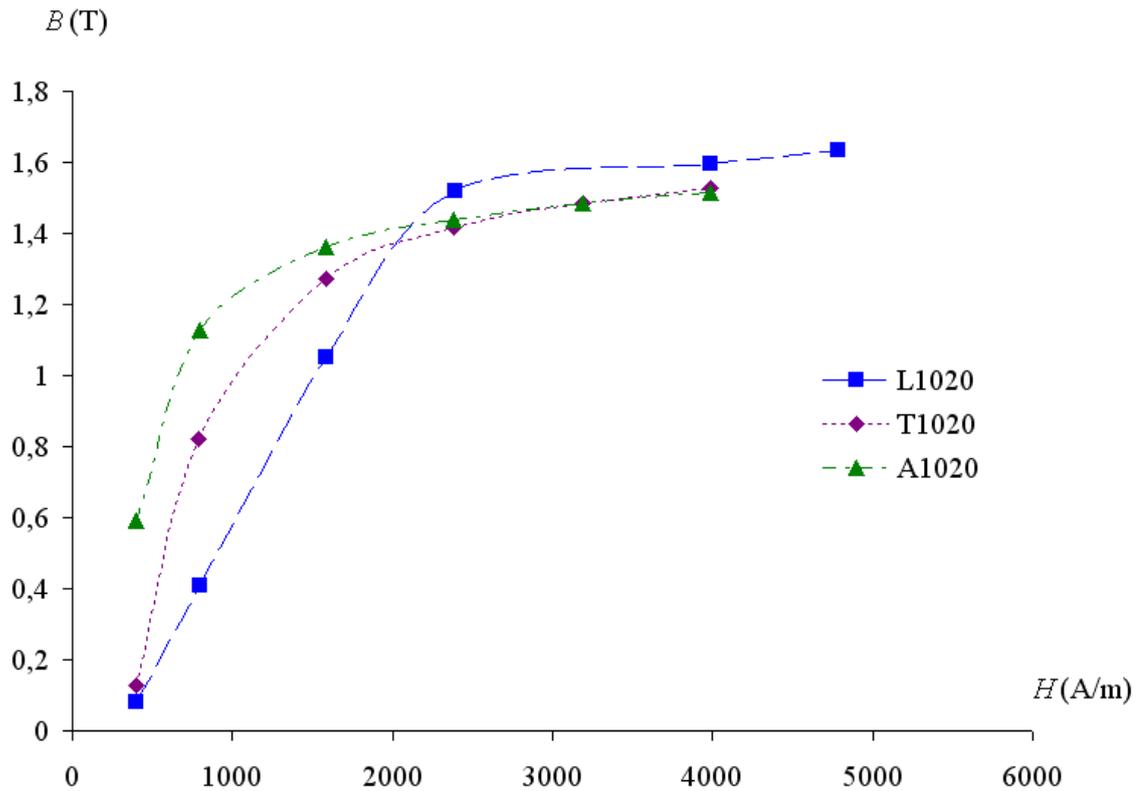


Figura 4-4. Características magnéticas do aço SAE 1020 [SCHOESSOW, 1998].

4.4 Circuito equivalente do HEV

Baseado na analogia existente entre o modelo de circuito magnético e o elétrico, pode-se ver o HEV como um circuito série formado pelo ímã permanente, a culatra e o entreferro, Figura 4-5.

De acordo com aquela figura: F_m e \mathfrak{R}_m são a força magneto motriz e a relutância magnética do ímã permanente; H_m e l_m são a força magnetizante e o comprimento na direção de magnetização do ímã; H_c^m e H_c^c são as coercitividades do ímã e da culatra respectivamente; F_c e \mathfrak{R}_c são a força magneto motriz e a relutância magnética da culatra; l_c e l_g são os comprimentos médios da culatra e do entreferro respectivamente; μ_m , μ_c e μ_0 são as permeabilidades magnéticas do ímã, da culatra e do entreferro, respectivamente.

O objetivo deste esquema elétrico da Figura 4-5 é mencionar alguns aspectos:

1. Sempre poderá existir uma pequena remanência no circuito magnético utilizado, seja qual for o material usado. Isto fica evidenciado nos ensaios logo ao se extrair a amostra. Embora o valor seja pequeno, este efeito deve ser levado em conta (Ver cap. 7).

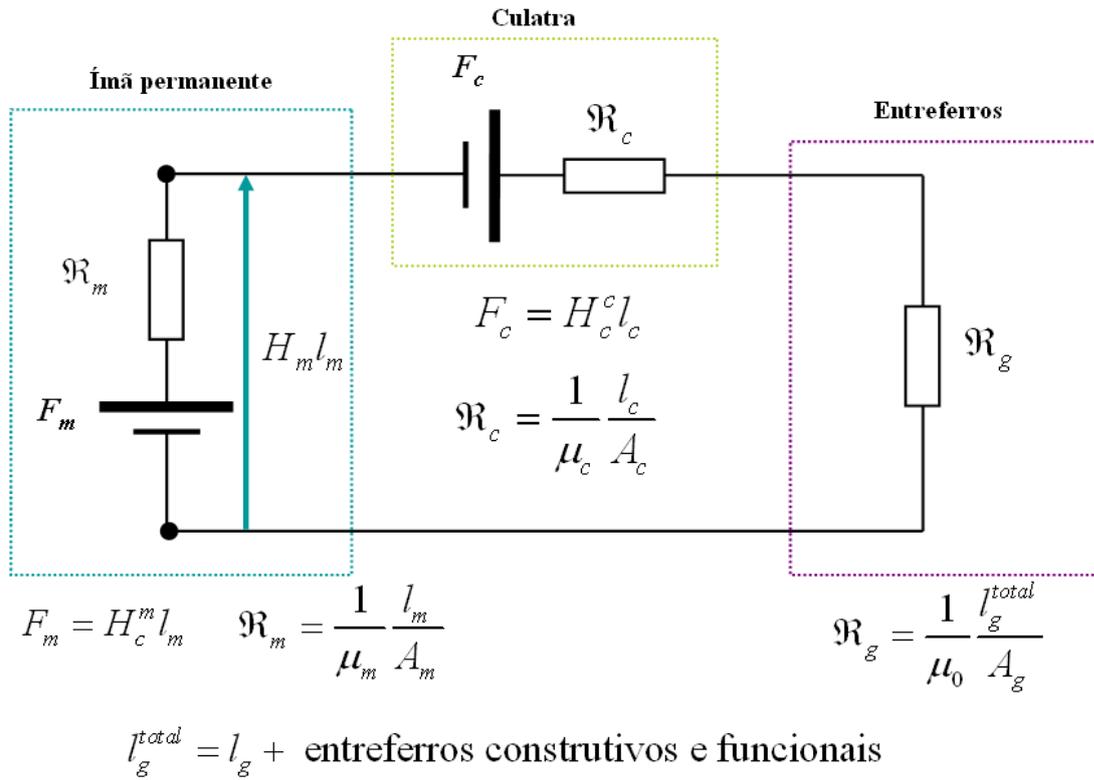


Figura 4-5. Circuito equivalente aproximado do HEV.

2. Um dos grandes desafios deste trabalho é determinar a densidade de fluxo magnético remanente de ímãs permanentes utilizando uma técnica de circuito aberto com entreferro variável. Embora isto possa parecer arriscado e incerto, a estratégia utilizada pretende não depender tanto do fluxo disperso e do espreadamento. Não é objetivo deste trabalho determinar o B_m num circuito magnético completamente aberto. No entanto, uma das estratégias é relacionar a leitura da densidade de fluxo magnético no centro geométrico do entreferro com a densidade de fluxo magnético remanente do ímã.
3. A relutância \mathfrak{R}_g pretende incluir todos os entreferros na expressão. É formada pelo entreferro de medição e pelos entreferros não desejados, que neste trabalho são denominados entreferros construtivos e funcionais. Os construtivos são aqueles que surgem na união do braço central superior móvel e o corpo, entre os polos e os respectivos braços centrais. E os funcionais são os que surgem na união do ímã e o polo central inferior. Não é objetivo deste trabalho avaliar estas características que são uma mistura de efeitos sistemáticos e randômicos, portanto a única alternativa achada aqui é, para o primeiro, determinar uma correção apropriada usando os ímãs padrões, e no segundo,

avaliando as incertezas conforme a GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) já introduzida no capítulo 3.

4.5 Metodologia de caracterização do HEV

A característica desmagnetizante linear dos ímãs permanentes com forte anisotropia magnetocristalina permite que a maioria dos parâmetros relevantes sejam determinados com base em dois deles. Este trabalho propõe a caracterização do ímã baseada na determinação do B_{re} (densidade de fluxo magnético remanente estimado) e do μ_{re} (permeabilidade de retorno estimada). Na Figura 4-6, apresenta-se o esquema geral das duas determinações.

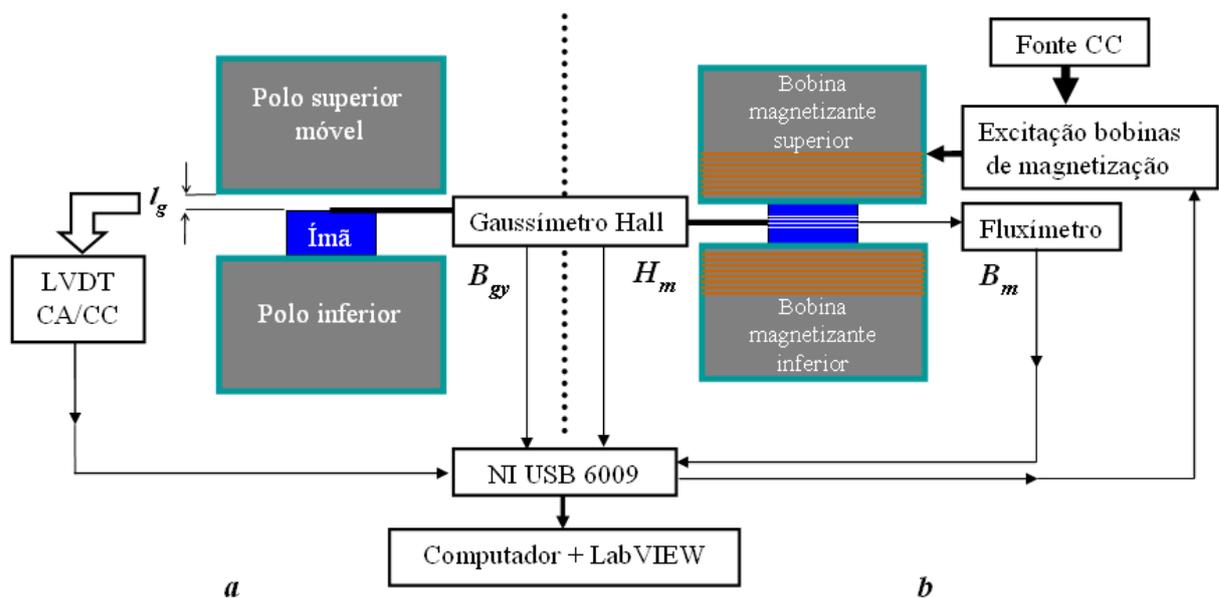


Figura 4-6. *a*) Configuração de medição de B_g em função de I_g para obter B_{re} , *b*) Configuração de medição de ΔB e ΔH para obter a permeabilidade de retorno.

O primeiro protótipo, denominado HEV1, teve suas dimensões ajustadas a um determinado tipo de ímã disponível, e o lote de amostras empregado nos testes consistia em 6 ímãs de NdFeB de geometria quadrada e de características magnéticas similares entre eles.

Na tentativa de testar outros ímãs (de outros tipos, com diferentes características magnéticas e geométricas) os resultados não foram os esperados (erros acima de 10%, longe do estabelecido pelas normas).

Além da necessidade de adequar o circuito magnético para outras geometrias, foi preciso mudar a metodologia. Em vez de usar um ímã padrão e achar uma constante de calibração do HEV que o defina magneticamente, optou-se por outra estratégia.

4.5.1 Metodologia usada na determinação do B_{re}

Fala-se em determinação dos parâmetros devido à impossibilidade da medição direta deles (como a grande maioria das magnitudes magnéticas). No caso da densidade de fluxo magnético remanente, para determinar seu valor, neste trabalho é feita a medição da densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes comprimentos. Que por sua vez não pode ser chamada de medição direta, porquanto se chega a conhecê-la pelo efeito Hall, Figura 4-7.

Frente à possibilidade de caracterização de amostras que apresentam diferença na magnetização em cada pólo é que deve se ensaiar as amostras em duas posições possíveis. Como pode ver-se na Figura 4-8, a sonda sempre deverá ser colocada na mesma posição; para isto foram desenvolvidos acessórios para cada geometria das amostras, Figura 4-9.

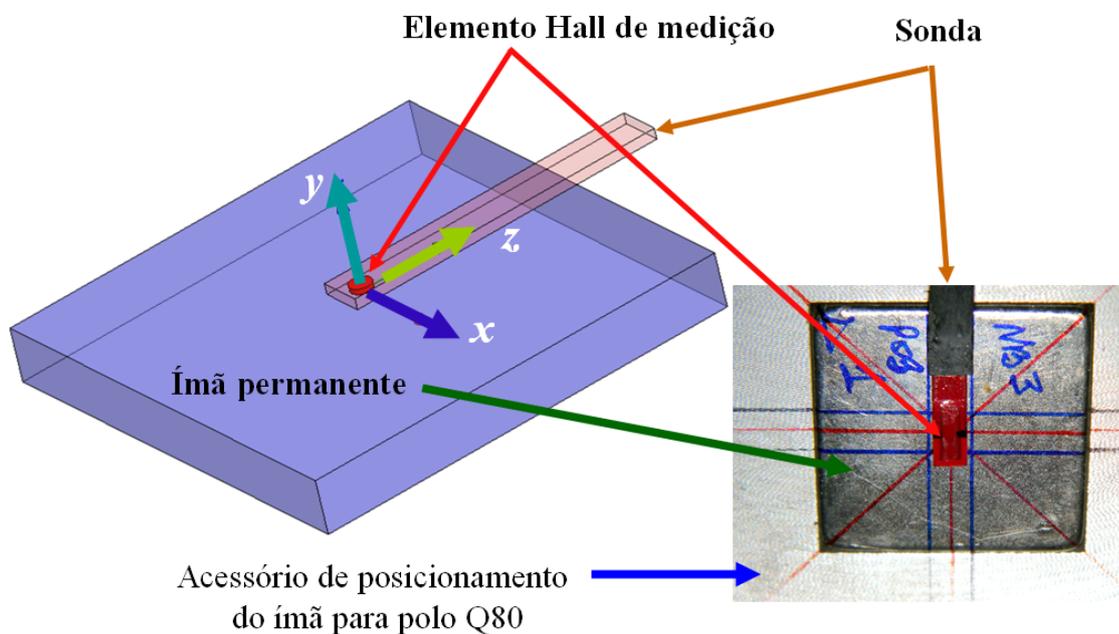


Figura 4-7. Sonda Hall e sua posição no centro geométrico.

Lugar geométrico das faces polares do ímã

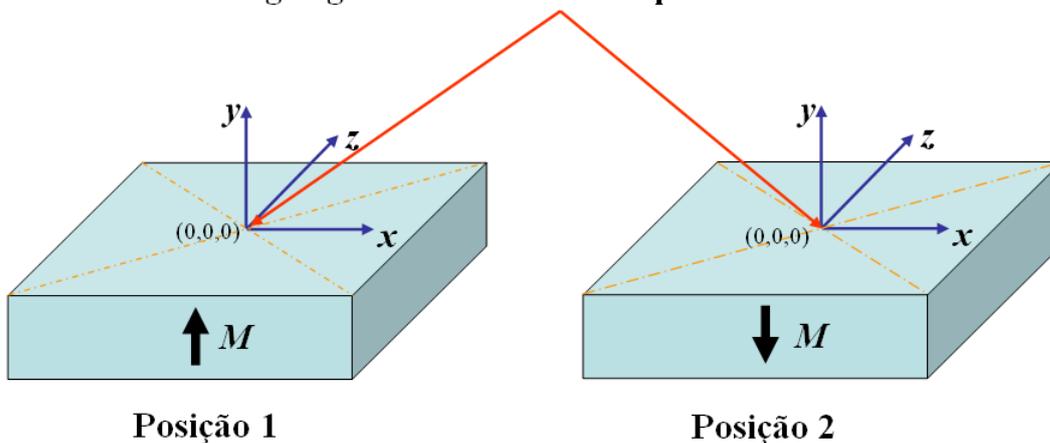


Figura 4-8. Lugar geométrico de medição para as duas posições possíveis do ímã.

Considerando a espessura da sonda de 1 mm, o entreferro mínimo ficou assim estabelecido. Fizeram-se diversas medições em abertura e fechamento do entreferro com diferentes amostras, diferentes entreferros máximos (2 mm, 4 mm, 6 mm e 10 mm), e diferentes passos (0,1 mm, 0,2 mm, 0,5 mm e 1 mm) não se observando diferenças significativas nos resultados obtidos na determinação do correspondente B_r ; portanto, adotou-se trabalhar com uma extensão fixa do entreferro de 1 a 4 mm com passos de 0,2 mm.

Comprovou-se a repetitividade do sistema no sentido de concluir que existe a possibilidade de controle estatístico da experiência e que a incerteza estatística consegue adotar valores dentro dos esperados pela norma. Compararam-se as medições de B_g com os resultados analíticos e de simulação por elementos finitos e achou-se semelhança na forma das curvas, mas também se detectou uma faixa de diferença entre as curvas, evidenciando os efeitos dos entreferros construtivos e funcionais antes mencionados.

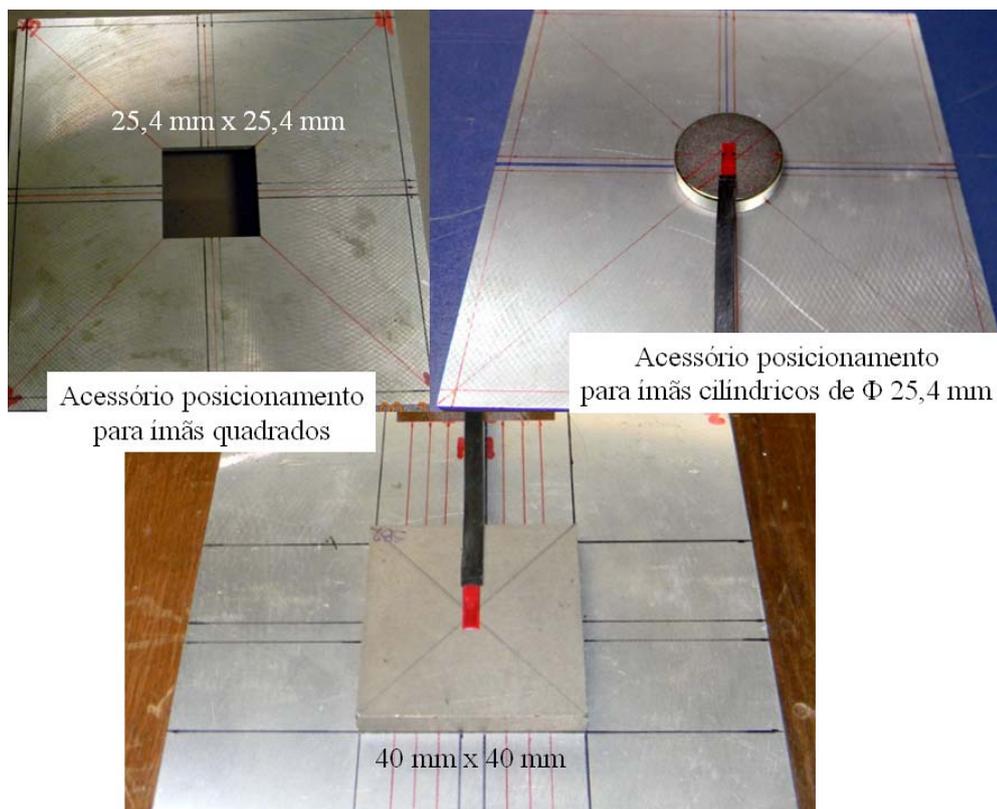


Figura 4-9. Acessórios de posicionamento do ímã no centro do polo Q80.

Nesta instância, surgem duas ações que definem a estratégia de determinação do B_{re} , o tipo de correção a ser efetuado e o tipo de ajuste dos pontos medidos e corrigidos.

Uma vez escolhido o ajuste de curva, explicado no capítulo 8, determinou-se aplicar todos os efeitos dos erros detectados numa faixa de entreferro adicionada à da medição num ajuste do HEV, Figura 4-10.

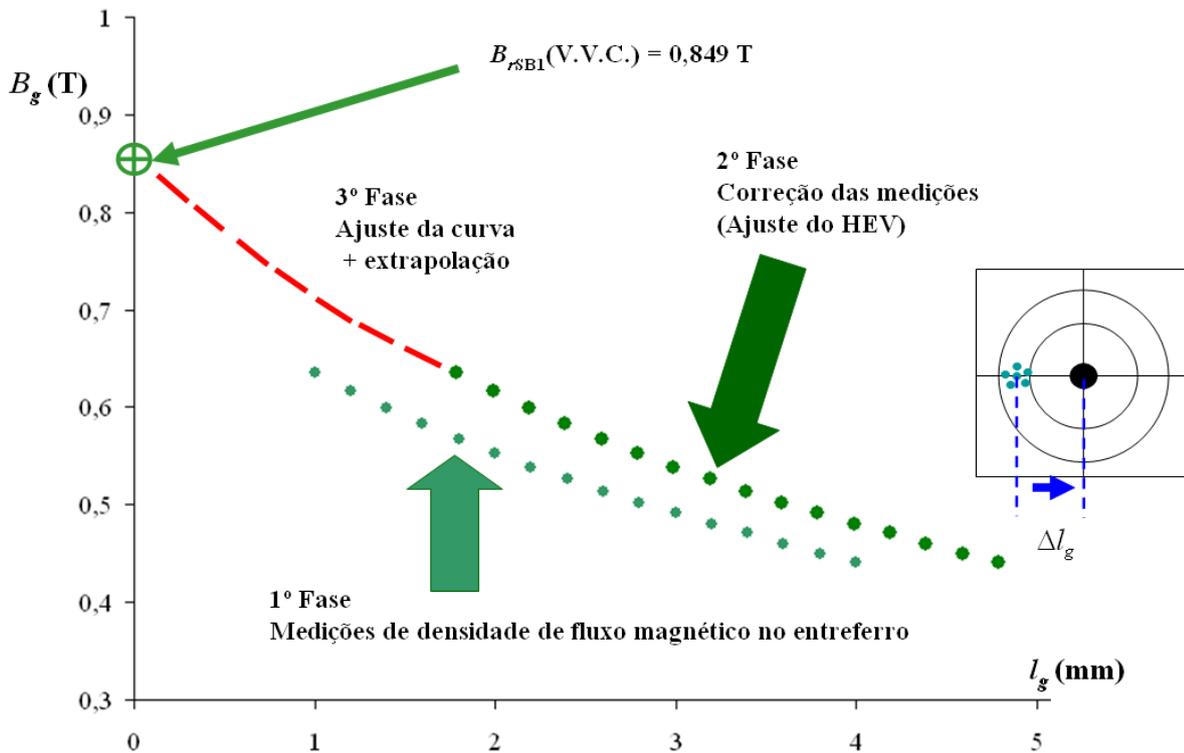


Figura 4-10. Fases na determinação do B_{re} adotando o ímã SB1 como exemplo.

O valor de Δl_g usado na correção dos valores de l_g numa caracterização de um ímã desconhecido surge do ensaio de quatro amostras padrão. Considerando a diversidade de ímãs, decidiu-se adotar dois valores de Δl_g atendendo somente à informação de volume.

Assim, para espécimes de 2,5 até 6 cm³, o fator de ajuste de entreferro utilizado é de 0,46 mm, e para ímãs de 8 a 16 cm³ o Δl_g usado é de 0,79. Os detalhes deste processo são apresentados no capítulo 7.

4.5.2 Metodologia usada na determinação do μ_{re}

A permeabilidade de retorno tem sua determinação baseada na medição do fluxo magnético no ímã permanente mediante uma bobina exploradora, Figura 4-11, que circunda a amostra e na queda magnética no espécime mediante a medição da densidade de fluxo magnético no ar ao lado da amostra com gaussímetro de efeito Hall.

A própria medição de fluxo é, na verdade, outra determinação, porquanto a informação de fluxo vem da indução de uma f.e.m. numa bobina frente a uma variação do fluxo magnético. A verdadeira medição direta é a desta f.e.m., que, logo após a integração analógica, é convertida a um valor de fluxo magnético.

A configuração de medição utilizada é conhecida quanto à disposição dos instrumentos, mas não no que diz respeito ao método. Basicamente, trata-se da medição fluximétrica convencional de uma amostra dentro de um circuito magnético totalmente fechado, mas com excitação reduzida, Figura 4-12. Diferentemente do sistema convencional em que a amostra é levada do primeiro ao terceiro quadrante, desmagnetizando-a irreversivelmente, neste trabalho, a excitação só movimenta o ponto de funcionamento do ímã ao redor do ponto $\mu_0 H_m = 0$; $B_m = B_{re}$.

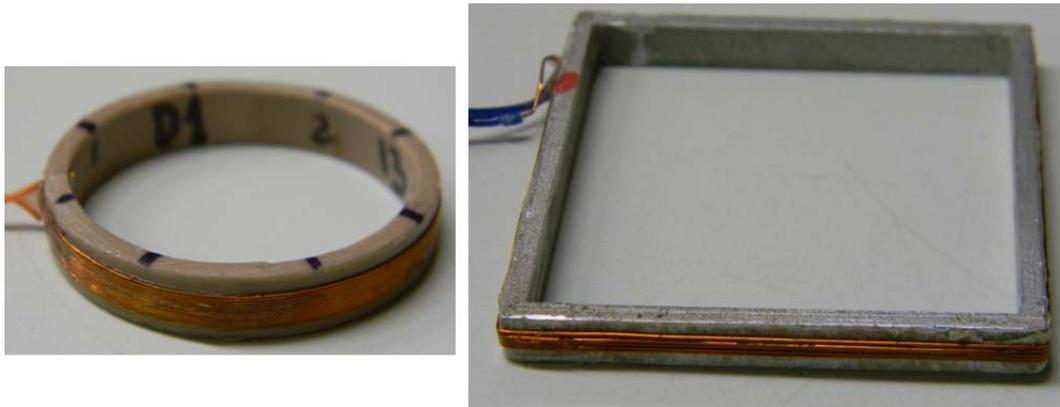


Figura 4-11. Bobinas fluximétricas para as diferentes geometrias.

O quociente $\frac{\Delta B_m}{\mu_0 \Delta H_m}$ das variações medidas e tratadas, considerando o fluxo no ar, permite obter a permeabilidade de retorno, Figura 4-13 e Figura 4-14.

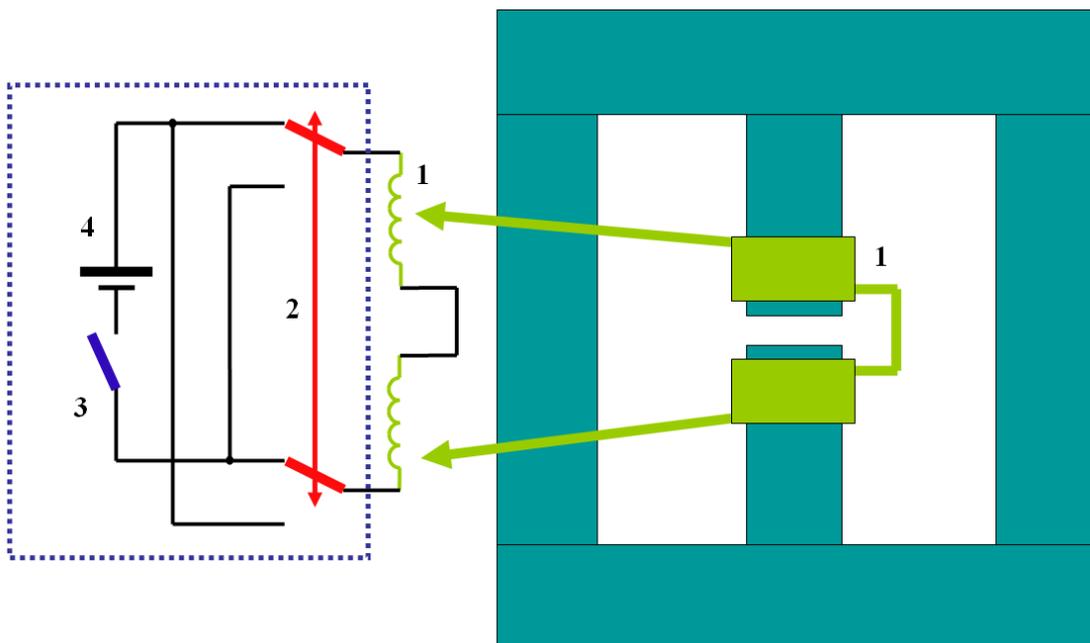


Figura 4-12. Excitação das bobinas de magnetização na determinação do μ_r do ímã. 1 Bobinas; 2 Chave inversora; 3 Chave eletrônica; 4 Fonte de alimentação de CC.

Embora a Norma ASTM A977 indique a necessidade de reportar a permeabilidade de retorno, determinados histerisímetros não têm essa opção. Frente à falta dessa informação, este trabalho adotou uma das providências sugeridas pelas normas para se obter esse parâmetro.

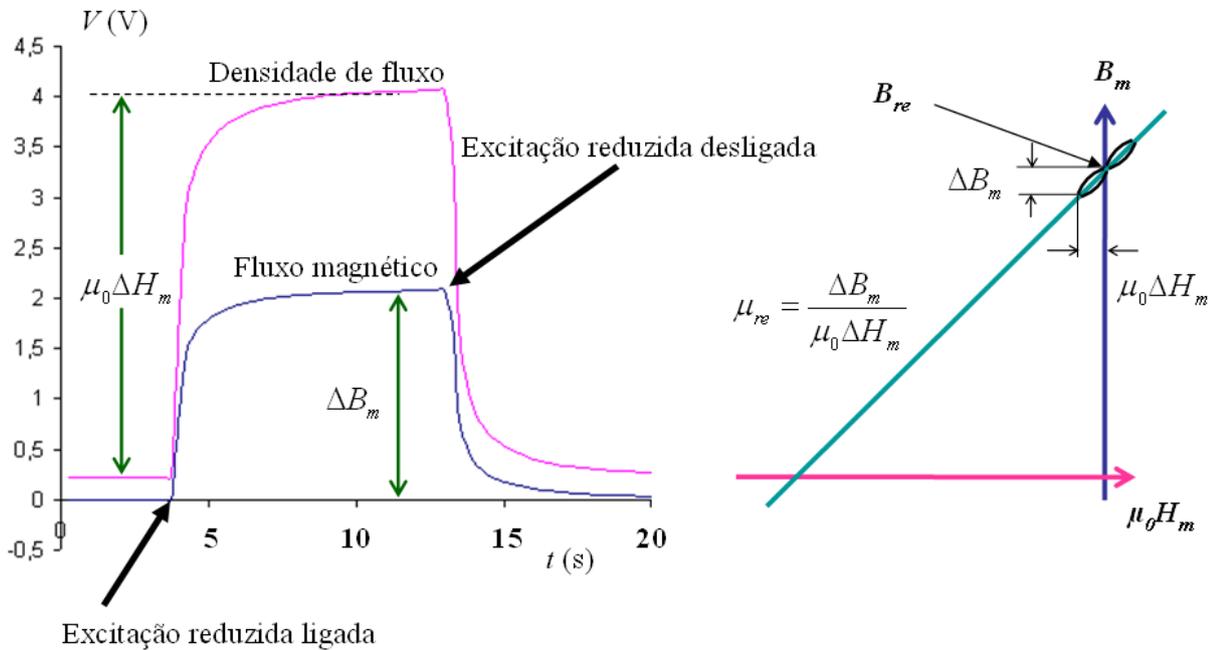


Figura 4-13. Medição de B e de Φ na determinação do μ_{re} do ímã.

Esta consiste em calcular a permeabilidade de retorno existente entre os pontos $(0, B_r)$ e (H_a, B_a) , considerando que todas as amostras com anisotropia magnetocristalina apresentam comportamento linear entre esses pontos e que eles são informados nos respectivos relatórios.

O primeiro desses pontos é simplesmente o ponto de medição do B_r , e o segundo corresponde ao ponto de determinação do máximo produto energético.

Outra questão surge com alguns ímãs que apresentam uma leve curvatura ou Joelho próximo ao eixo de H no segundo quadrante, especificamente os ímãs de ferrite. Nesse caso o valor reportado pelo HEV será expressivamente superior (entre 10 e 20% maior) ao valor considerado verdadeiro, Figura 4-15.

Como no caso da determinação do B_{re} , o uso do computador é fundamental. Além de armazenar os dados dos instrumentos, o *software* deve comandar as chaves do circuito de magnetização e desmagnetização.

Sincroniza as medições de fluxo e de densidade de fluxo procedendo aos cálculos que reportam a permeabilidade de retorno. Tanto nesta determinação como na anterior, começou-

se a implementar com módulos da National Instruments usando o *software* LabView. Os *VI*s (*Virtual Instruments*) atuais permitem adquirir os dados temporais da Figura 4-13, mas as rotinas de cálculo e apresentação de resultados, como de conformação da base de dados dos ímãs e dos instrumentos está em fase de desenvolvimento.

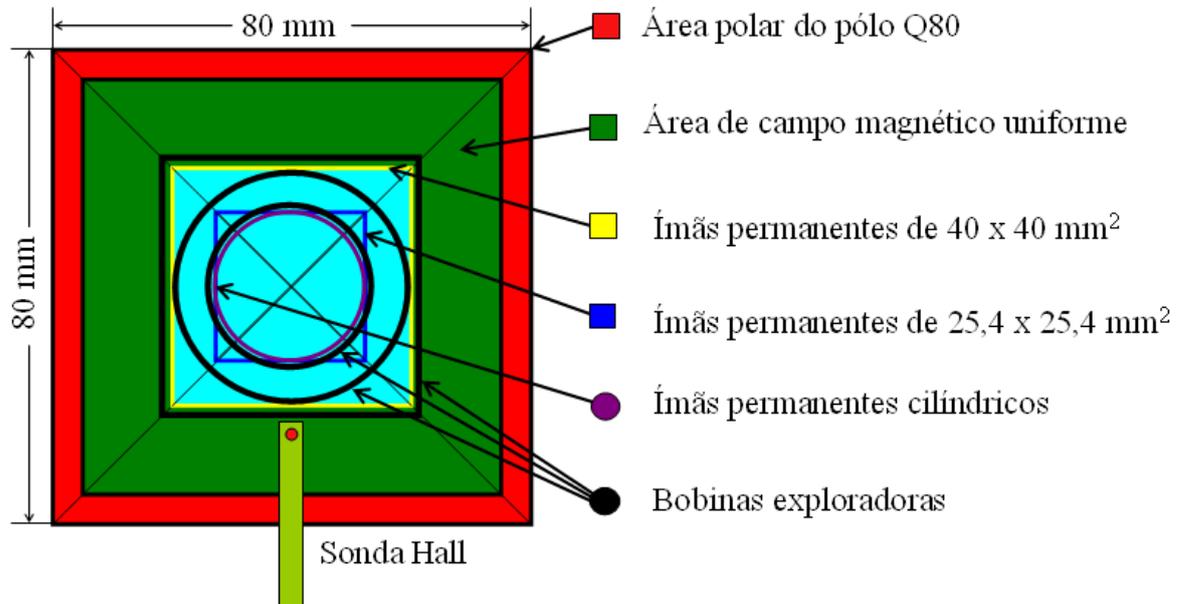


Figura 4-14. Posicionamento dos ímãs, das bobinas e da sonda Hall no pólo Q80 na configuração de circuito magnético fechado. Indicação dos limites de medição dentro do campo magnético uniforme conforme a norma (ASTM A977, 2007).

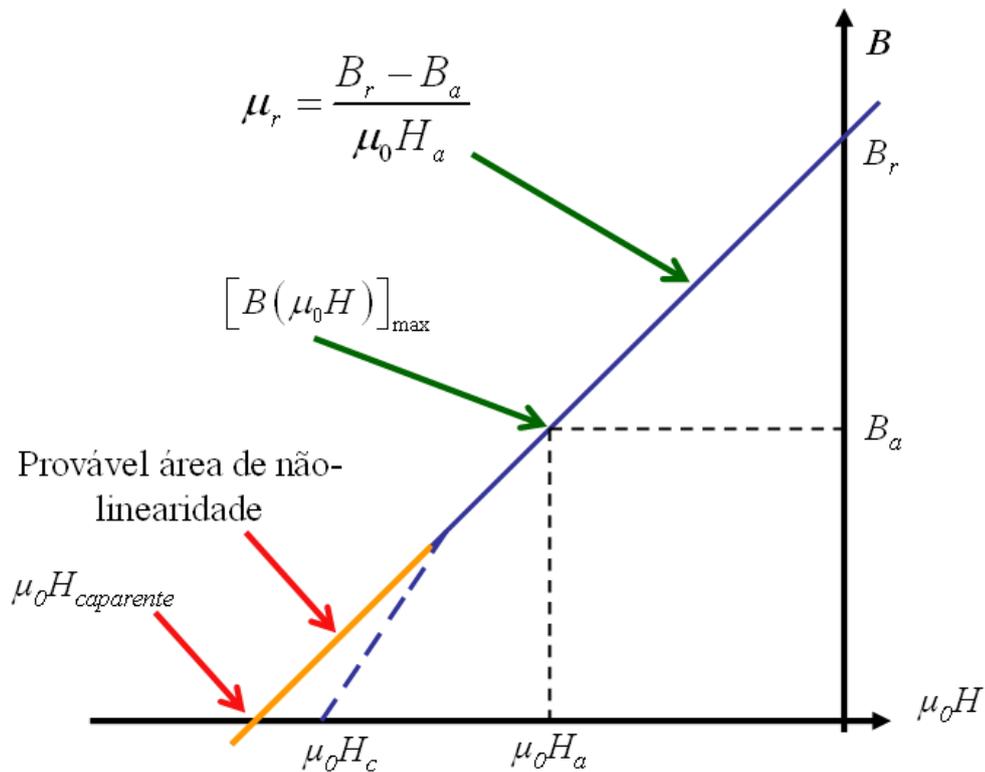


Figura 4-15. Definição do μ_r neste trabalho e faixa de possível joelho (dados V.V.C.).

4.6 Rotina de medição do HEV

No procedimento de caracterização de um ímã permanente com o HEV existem duas etapas diferenciadas: uma de entreferro variável para determinação do B_{re} e outra com entreferro fechado para determinação da permeabilidade de retorno μ_{re} . A seguir serão apresentados os passos para cada uma das etapas mencionadas.

4.6.1 Entreferro variável

Dentro do processo de determinação do B_{re} é preciso diferenciar a etapa de caracterização do próprio HEV feito com quatro ímãs padrão da caracterização de um ímã desconhecido. Tanto um como outro requerem a medição de densidade de fluxo magnético no entreferro. Portanto esse será o primeiro passo a ser considerado.

4.6.1.1 Medição de B_g

1. Inserção dos pólos correspondentes.
2. Verificação da densidade de fluxo remanente; se a leitura for $B_{rem} > |2 \text{ mT}|$, proceder à desmagnetização.
3. Inserir o ímã; em caso de usar pólos Q80, adicionar o acessório de posicionamento de acordo com o tipo de ímã junto com o calço de segurança apropriado para evitar quebrar o espécime no fechamento.
4. Fechar o entreferro até encostar no calço de segurança.
5. Fazer o zero mecânico dos dispositivos de medição de I_g .
6. Inserir a sonda Hall, verificando previamente o seu zero.
7. Registrar o valor de B_g para o mínimo I_g estabelecido pela espessura da sonda Hall.
8. Abrir o entreferro em 0,2 mm e registrar o B_g .
9. Repetir o passo 8 até atingir os 4 mm.
10. Fechar o entreferro em 0,2 mm e registrar o B_g .
11. Repetir o passo 10 até o ponto inicial.
12. Repetir os passos 7 a 11 um número par de vezes (no mínimo duas).
13. Depois de retirar o ímã, fazer a medição de B_{rem} para cada ponto em uma abertura e um fechamento.

14. Repetir o procedimento para o ímã virado (posição 2).

4.6.1.2 Determinação do ajuste do HEV

Escolhidas quatro amostras padrão, duas de volume de até 6 cm³ e duas de 8 cm³ ou mais:

1. Com a tabela de dados de l_g , B_g e B_{rem} e a informação dos instrumentos, procede-se a estimar as incertezas e as ponderações ou pesos.
2. Aplicando o ajuste racional ponderado (ver capítulo 8) e conhecendo o B_r (V.V.C.) do ímã padrão ensaiado, calcula-se o Δl_g que proporciona este B_r V.V.C.
3. Para cada ímã padrão, procede-se conforme a 4.6.1.a e os passos 1 e 2 de 4.6.1.b.
4. Com dois valores de Δl_g para cada volume de amostra é possível determinar a média informada no final do parágrafo 4.5.1.

4.6.1.3 Determinação do B_r

Dado um determinado espécime desconhecido:

1. Obter a informação dimensional da amostra (diâmetro se o ímã for cilíndrico, lados da área polar se for retangular, e comprimento na direção de magnetização).
2. Proceder aos passos de 4.6.1.a.
3. Com a informação dimensional da amostra, a informação das incertezas de medição da densidade de fluxo e dos instrumentos usados na determinação de l_g e B_g , escolhe-se o Δl_g apropriado, efetua-se o ajuste ponderado e determina-se o B_{re} com o intervalo de confiança correspondente a um nível da confiança de 95%.

4.6.2 Determinação do μ_{re}

1. Inserção dos pólos Q80.
2. Inserir o ímã com a bobina exploradora apropriada.
3. Posicionar a sonda Hall rente à bobina dentro da área de campo homogêneo como indicado na Figura 4-14.
4. Fechar o entreferro até comprovar que o ímã não consegue ser deslocado.
5. Mediante o *software* correspondente, obter duas excursões num sentido de magnetização e duas no outro.

6. A permeabilidade resultante é a média aritmética das quatro determinações de μ_{re} baseadas nas leituras de mudança de fluxo e densidade de fluxo.

4.6.3 Determinação do H_{ce} e $(BH)_{maxe}$

O princípio de medição com o HEV baseia-se na suposição de característica de desmagnetização linear das amostras. Sendo assim e considerando que a característica desmagnetizante linear está definida por (Figura 4-15):

$$B = \mu_r (\mu_0 H) + B_r \quad (4-1)$$

A coercitividade da amostra é definida como a força desmagnetizante que leva ao B a zero (Figura 4-15):

$$\mu_r (\mu_0 H_c) + B_r = 0 \Rightarrow \mu_0 H_c = \frac{B_r}{\mu_r} [T]; H_{ce} = \frac{B_{re}}{\mu_0 \mu_{re}} \quad (4-2)$$

O máximo produto energético da amostra numa amostra com desmagnetização linear em todo o segundo quadrante [FLORES FILHO, 1996]:

$$\begin{aligned} [B = \mu_r (\mu_0 H) + B_r] \times (\mu_0 H) &\rightarrow B(\mu_0 H) = \mu_r (\mu_0 H)^2 + B_r (\mu_0 H) \\ \frac{d[B(\mu_0 H)]}{d(\mu_0 H)} = 0 &\Rightarrow 2\mu_r (\mu_0 H_a) + B_r = 0 \Rightarrow (\mu_0 H_a) = -\frac{B_r}{2\mu_r} = -\frac{(\mu_0 H_c)}{2} \end{aligned} \quad (4-3)$$

Resultado que inserido na (4-1):

$$B_a = \mu_r (\mu_0 H_a) + B_r = \mu_r \left(-\frac{B_r}{2\mu_r} \right) + B_r = \frac{B_r}{2} \quad (4-4)$$

Finalmente, o máximo produto energético para uma amostra com todo o segundo quadrante linear será:

$$[B(\mu_0 H)]_{maxe} = B_a (\mu_0 H_a) = \frac{B_{re}}{2} \frac{(\mu_0 H_{ce})}{2} \quad (4-5)$$

As expressões das incertezas dos parâmetros são apresentadas no capítulo 8, as medições de sensibilidade da sonda no capítulo 7 junto com os dados das amostras padrão, das amostras a ser caracterizadas dos instrumentos e o ajuste do HEV.

5 ANÁLISE NUMÉRICA POR ELEMENTOS FINITOS

A simulação demonstrou em diferentes áreas (tecnológicas e educativas) e com diferentes objetivos seu grande valor. Embora fosse pensada principalmente como ferramenta profissional/industrial de desenvolvimento, é necessário ressaltar sua utilização em duas importantes aplicações:

1. No ensino e auto-aprendizagem de conceitos considerados difíceis que leva o aluno a poder aprender em seu tempo, com seu próprio ritmo no que se pode denominar um laboratório virtual onde é possível mexer sem perigo nem custo maior. Dispositivos complexos ou pouco comuns podem ser melhor compreendidos (FLORES FILHO, 1996).
2. Na comprovação de resultados de design, que, tendo superada alguma instância inicial de cálculo com considerações simplificadas, é preciso corroborar sem necessidade de implementação de algum protótipo.

Neste capítulo serão apresentadas as bases conceituais da simulação eletromagnética por elementos finitos que possibilitou o ensaio virtual prévio do Histerisímetro de Entreferro Variável (HEV). Os objetivos da utilização desta ferramenta computacional neste trabalho foram: determinar se os níveis de densidade de fluxo magnético afetariam o desempenho do material ferromagnético utilizado na culatra (problemas de saturação), e corroborar as idéias iniciais de determinação dos parâmetros magnéticos de diferentes ímãs.

5.1 Método de Análise Numérico em Eletromagnetismo

O método de elementos finitos (FEM) teve suas origens no campo da análise estrutural. Embora o tratamento matemático inicial fosse providenciado por Courant em 1943, o método não foi aplicado a problemas eletromagnéticos (EM) até 1968. Desde então o método foi empregado em diversas áreas como problemas de guia de ondas, máquinas elétricas, dispositivos semicondutores, linhas de transmissão, e absorção de radiação EM por corpos biológicos, entre outras.

Embora o método de diferenças finitas (FDM) e o método dos momentos (MOM) são conceitualmente mais simples e fáceis de programar que o FEM, este é considerado mais potente e versátil para resolver problemas envolvendo geometrias complexas e meios não homogêneos. A generalização sistemática do método tornou possível implementar programas de

propósito geral para resolver uma grande gama de problemas. Consequentemente, programas desenvolvidos para uma disciplina particular foram aplicados com sucesso para resolver problemas em diferentes campos com pouca ou nenhuma modificação (SADIKU, 2009).

É necessário salientar alguns aspectos:

1. Embora seja uma ferramenta que dispensa investimento em protótipos reais e instrumentos de medição, é necessário possuir o embasamento teórico adequado para compreender os resultados obtidos das simulações.
2. Partindo de uma análise teórica e continuando com cálculos, ainda que simplificados, pode-se simular para corroborar os passos anteriores. Mas de nenhuma maneira, algum dos passos anteriores exclui o último passo, a análise experimental do projeto. É finalmente este passo que deve validar os anteriores (ANOCIBAR, 2004).

5.2 Método de Análise Numérico por Elementos Finitos

O princípio do método de elementos finitos (FEM) consiste na divisão ou discretização do domínio solução em subdomínios, denominados “elementos finitos”. Esses elementos podem ser de diferente tamanho tais que, em regiões onde se podem antecipar grandes variações em campos, o número de elementos e seu tamanho possam ser mudados para obter uma apropriada densidade de elementos que descrevam adequadamente o desempenho do sistema. Por sua vez, em regiões de menor gradiente de campo, o número de elementos pode ser menor.

As superfícies contidas dentro de um conjunto de nodos são chamadas de “elementos”, que podem ser retangulares ou em forma de triângulo. Dado esse seu caráter geométrico, os elementos finitos adjacentes têm lados e nós ou vértices em comum. Um conjunto de elementos forma uma “malha”. Em 2D e considerando elementos triangulares, o potencial escalar magnético varia linearmente dentro de cada elemento finito, segundo a seguinte expressão:

$$\Psi(x, y) = a + bx + cy \quad (5-1)$$

Note-se que para os nós i , j , e k do elemento genérico da Figura 5-1, o potencial satisfaz a (5-1).

Escrevendo a equação para os três nós:

$$\begin{aligned}
 \Psi_i &= a + bx_i + cy_i \\
 \Psi_j &= a + bx_j + cy_j \\
 \Psi_k &= a + bx_k + cy_k
 \end{aligned}
 \tag{5-2}$$

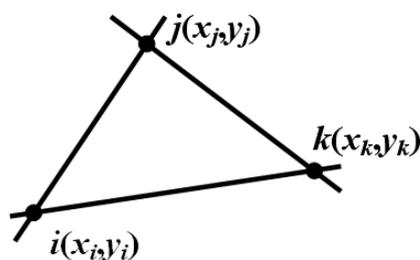


Figura 5-1. Elemento genérico formado por três nós.

Os problemas com condições de contorno formulados por equações diferenciais parciais apropriadas podem ser resolvidos seja pelo método variacional ou pelo método dos resíduos ponderados. No primeiro, a equação diferencial parcial é expressa por uma energia funcional relacionada. A região do campo é subdividida em elementos discretos. Em cada elemento a solução é expressa como uma interpolação dos valores dos vértices. As funções então são minimizadas com respeito a cada um dos valores dos vértices da solução requerida, e como resultado obtém-se um conjunto de equações matriciais. Resolvendo estas equações se chega à solução do problema do campo.

No método dos resíduos ponderados, o resíduo da equação diferencial, o qual deveria ser zero para a solução verdadeira, poderia ter um valor finito para a aproximação numérica da solução verdadeira. Neste último caso, o resíduo deve ser ponderado e integrado sob o domínio que proporcionaria a solução do problema do campo em um sentido de mínimo quadrado. Este procedimento resultará em uma equação matricial idêntica àquela da minimização funcional, se a função de ponderação é a mesma que a função de teste. Contudo, o método dos resíduos ponderados é mais geral e pode ser facilmente aplicado a uma variedade de problemas elípticos ou parabólicos. O método de Galerkin é um caso especial do método MWR (resíduos ponderados) e por sua generalização é muito utilizada (SALON, 1995).

5.3 Simulação por Elementos Finitos na Magnetostática

Um programa (*software*) que se utiliza na simulação se constitui numa ferramenta de engenharia já que por meio dela se estendem as capacidades de uma pessoa além do que normalmente pode realizar, ou secundariamente, para diminuir o esforço empregado na resolução

de um problema e recebe o nome de ferramenta EDA (Electronic Design Automation Tool) (YODER, 1993).

Na resolução do campo magnetostático, computa-se o campo magnético estático que existe em uma estrutura onde existe alguma distribuição de corrente contínua e/ou ímã permanente. O campo magnético pode ser calculado em estruturas com materiais lineares e não lineares. Da energia armazenada no campo magnético pode-se também calcular a matriz de indutância, força, torque, e fluxo magnético.

O simulador de campo magnetostático calcula o vetor potencial magnético $\vec{A}_z(x, y)$ da equação

$$\vec{J}_z(x, y) = \nabla \times \left\{ \frac{1}{\mu_{rel}\mu_0} [\nabla \times \vec{A}_z(x, y)] \right\} \quad (5-3)$$

onde $\vec{A}_z(x, y)$ é a componente z do vetor potencial magnético, $\vec{J}_z(x, y)$ é a densidade de corrente contínua, μ_{rel} é a permeabilidade relativa de cada material e μ_0 é a permeabilidade do espaço livre. Conhecendo $\vec{J}_z(x, y)$ como excitação, o simulador de campo magnetostático calcula o vetor potencial magnético em todos os pontos do espaço.

Em geral, tanto $\vec{J}_z(x, y)$ como $\vec{A}_z(x, y)$ são vetores. Porém, em um grande número de fenômenos, é possível reduzir o sistema a uma geometria simples e então $\vec{J}_z(x, y)$ é considerado que tem somente componente em z . Como consequência disto $\vec{A}_z(x, y)$ também terá somente componente em z . Ambas as quantidades podem, portanto ser tratadas como escalares.

A equação utilizada para resolver o campo magnetostático é derivada da lei de Ampère

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \text{ e da } \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (5-4)$$

Como

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0\mu_{rel}} \text{ pode-se escrever } \nabla \times \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0\mu_{rel}} \right) = \vec{J} \quad (5-5)$$

Como consequência de

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \text{ é possível escrever } \vec{B} = \nabla \times \vec{A} \text{ então } \nabla \times \left(\frac{\nabla \times \vec{A}}{\mu_0 \mu_{rel}} \right) = \vec{J} \quad (5-6)$$

O programa simulador do campo magnetostático calcula esta equação usando o método de elementos finitos. Uma vez determinado $\vec{A}_z(x, y)$, a densidade de fluxo magnético \vec{B} e a intensidade do campo magnético \vec{H} podem ser obtidas mediante as expressões anteriores.

O método de elementos finitos tem uma sólida fundamentação teórica. Está baseado em teoremas matemáticos que garantem um acréscimo assintótico da exatidão do cálculo do campo à medida que os elementos usados no processo de solução diminuem de tamanho.

Existe um compromisso entre o tamanho da malha, o nível de exatidão requerido e a quantidade de recursos informáticos. A maioria dos simuladores, para produzir uma malha otimizada, utiliza um processo iterativo, denominado análise adaptativa, no qual a malha é automaticamente refinada em regiões críticas. Primeiro é gerada uma solução baseada em uma malha inicial com poucos elementos de grande tamanho. Posteriormente é feito um refinamento da malha em áreas de grande densidade de erro e gera uma nova solução. Quando os parâmetros escolhidos convergem a limites requeridos, o programa finaliza o laço.

5.4 Simulação por Elementos Finitos do HEV

No caso da modelagem do HEV através de elementos finitos, o primeiro passo é definir a geometria do circuito magnético, estabelecer os materiais a serem usados, adotar as condições de contorno apropriadas e escolher que tipo de análise será feita e com qual grau de exatidão se pretendem os resultados, Tabela 5-1. Isto afetará o nível de discretização usado que, por sua vez, se reflete no tempo usado pelo programa em encontrar os resultados, Figura 5-2.

Em função dos objetivos apresentados no princípio deste capítulo e considerando que devem ser caracterizados diferentes ímãs descritos no capítulo 7, usando quatro tipos de polos, e que cada ímã deve ser caracterizado conforme duas disposições de medição diferentes, fizeram-se os seguintes modelos: um para cada ímã e para cada entreferro, considerando que a determinação da densidade de fluxo magnético remanente requer dez pontos desde 1 até 10 mm com passos de 1 mm o que implica ter dez modelos por cada ímã e para cada pólo. Como cada ímã será testado com pólo quadrado de 80 mm x 80 mm e com o pólo correspondente à sua geometria específica, isso corresponde dispor mais de 200 modelos para o ensaio de B_r . O ensaio da determinação da permeabilidade de retorno será feito com pólos quadrados e entre-

ferro nulo, portanto cada ímã será testado em duas situações, com e sem corrente de magnetização. Isso corresponde, então, dispor de 24 modelos extras. Como consequência foram feitos um total de 220 modelos para os testes do HEV na caracterização de ímãs permanentes.

Tabela 5-1. Detalhe dos laços de cálculo para atingir 0,5% de exatidão na energia. Num computador de propósito geral cada modelo requer em média três minutos de simulação.

| Laço | Elementos | Energia total (J) | Erro de energia (%) | Delta energia (%) |
|------|-----------|-------------------|---------------------|-------------------|
| 1 | 390 | 0,39298 | 13,098 | N/A |
| 2 | 515 | 0,48272 | 9,197 | 22,8330 |
| 3 | 676 | 0,51697 | 7,284 | 7,0958 |
| 4 | 890 | 0,54368 | 2,259 | 5,1667 |
| 5 | 1167 | 0,56511 | 2,273 | 3,9418 |
| 6 | 1527 | 0,57046 | 1,505 | 0,9475 |
| 7 | 1998 | 0,57929 | 1,367 | 1,5480 |
| 8 | 2606 | 0,58346 | 1,445 | 0,7192 |
| 9 | 3399 | 0,58747 | 1,025 | 0,6879 |
| 10 | 4425 | 0,58931 | 0,744 | 0,3119 |
| 11 | 5766 | 0,59072 | 0,550 | 0,2392 |
| 12 | 7506 | 0,5916 | 0,455 | 0,1493 |

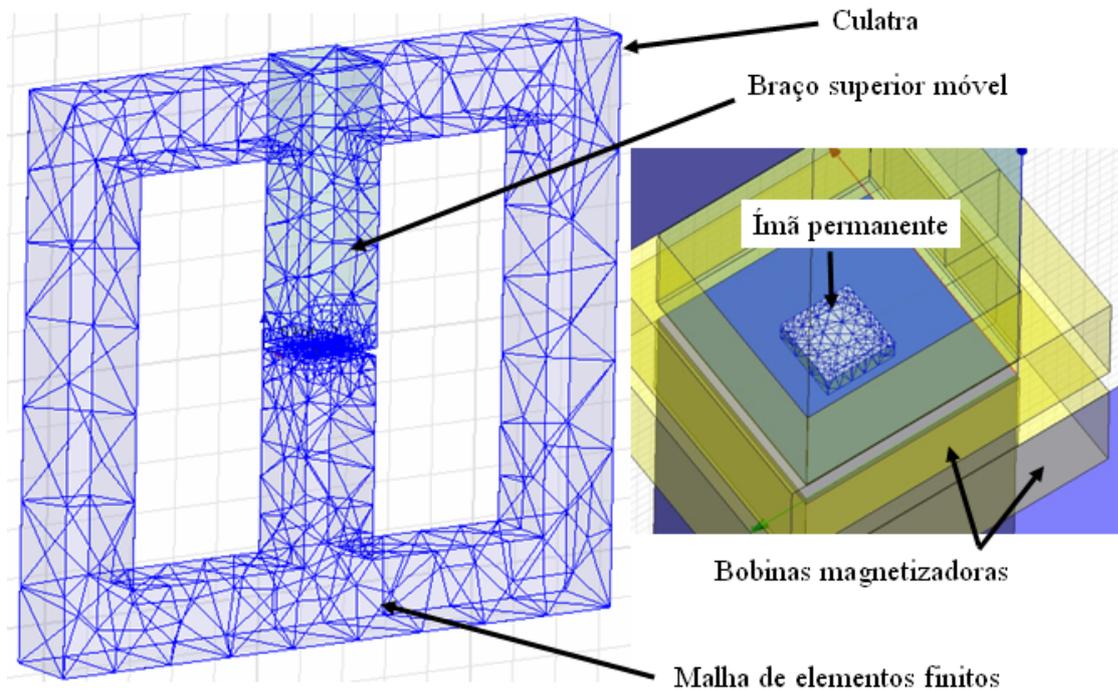


Figura 5-2. Discretização adaptativa do HEV, o maior número de elementos e seu menor tamanho corresponde às regiões de maior variação dos campos.

5.4.1 Resultados da simulação

Os dados da curva normal de magnetização do aço utilizado na culatra do HEV foram introduzidos como também os dados de cada ímã permanente a ser caracterizado. As simulações foram restringidas em complexidade e, por conseguinte, em tempo de execução dado o

objetivo de avaliar somente os campos magnéticos, inibindo para tanto as opções de determinação de força, torque, etc. Serão apresentados os resultados significativos de cada ímã e de cada configuração de medição virtual.

Todas as medições, tanto virtuais como experimentais, foram feitas em pontos 0,5 mm acima da amostra no entreferro. Nos testes virtuais, cada ímã foi testado em dois polos (quadrado e o correspondente à sua geometria). Uma conclusão que simplifica a análise surge de uma primeira comparação feita com os diferentes ímãs com diferentes polos. Como as mesmas conclusões se manifestaram com cada ímã, será apresentado somente o caso do ímã FB1, Figura 5-3 e Figura 5-4:

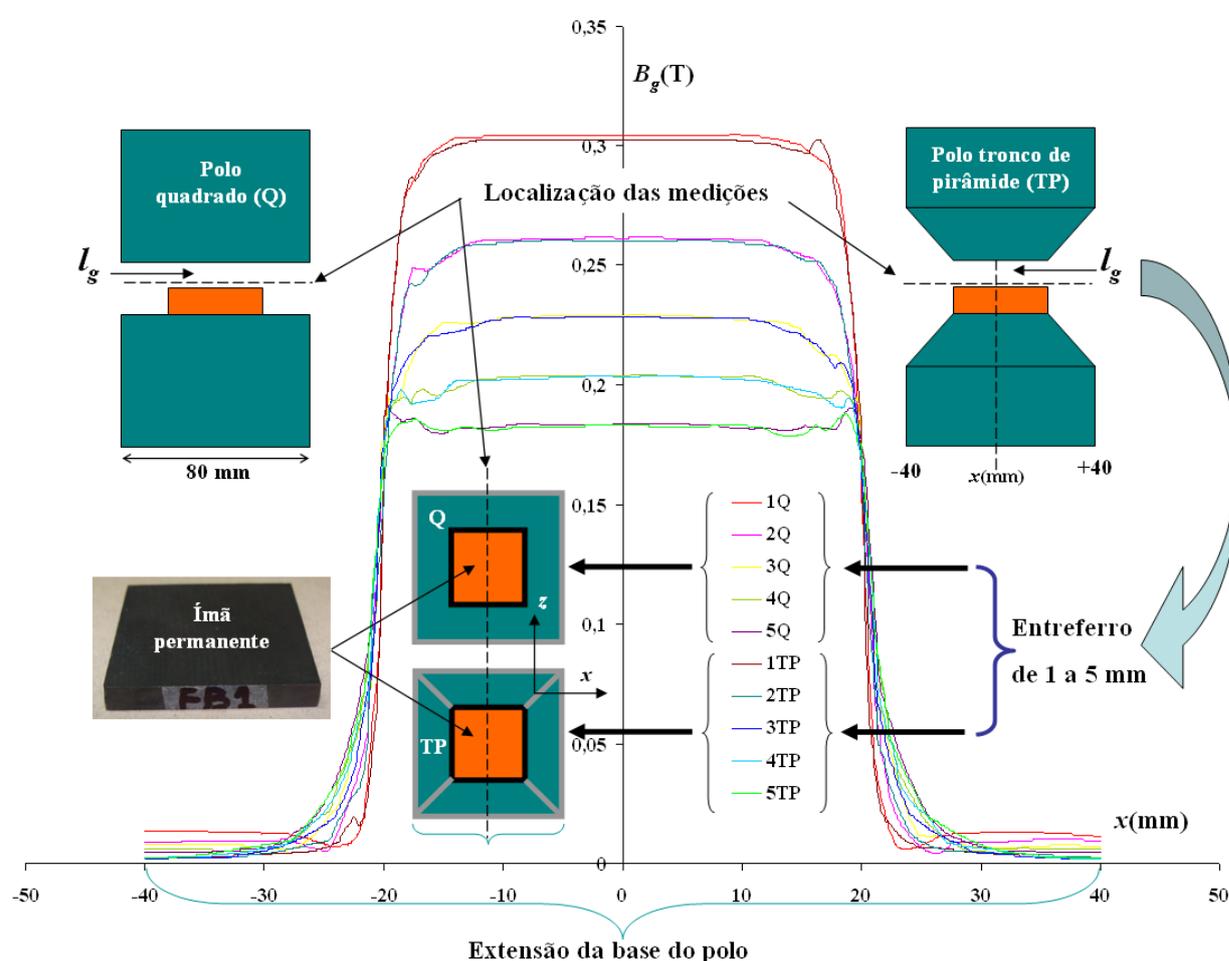


Figura 5-3. Comparação da medição de B_g para l_g de 1 a 5 mm e dois polos diferentes: quadrado (identificado como Q) e tronco de pirâmide (identificado como TP).

No ensaio correspondente à determinação do B_r , efetuam-se medições para cada entreferro, desde 1 até 10 mm. Só no caso dos testes virtuais é que foi possível fazer uma varredura no eixo x ao longo da largura da base do pólo (80 mm), mantendo z em zero (centro do ímã) e y em 0,5 mm acima do ímã. Observa-se das curvas para cada entreferro que os valores diferem em menos de 1%. Aos efeitos do método implementado no HEV de medir a densidade de

fluxo no centro geométrico do ímã, é possível então prescindir da troca de pólo para cada tipo diferente de ímã.

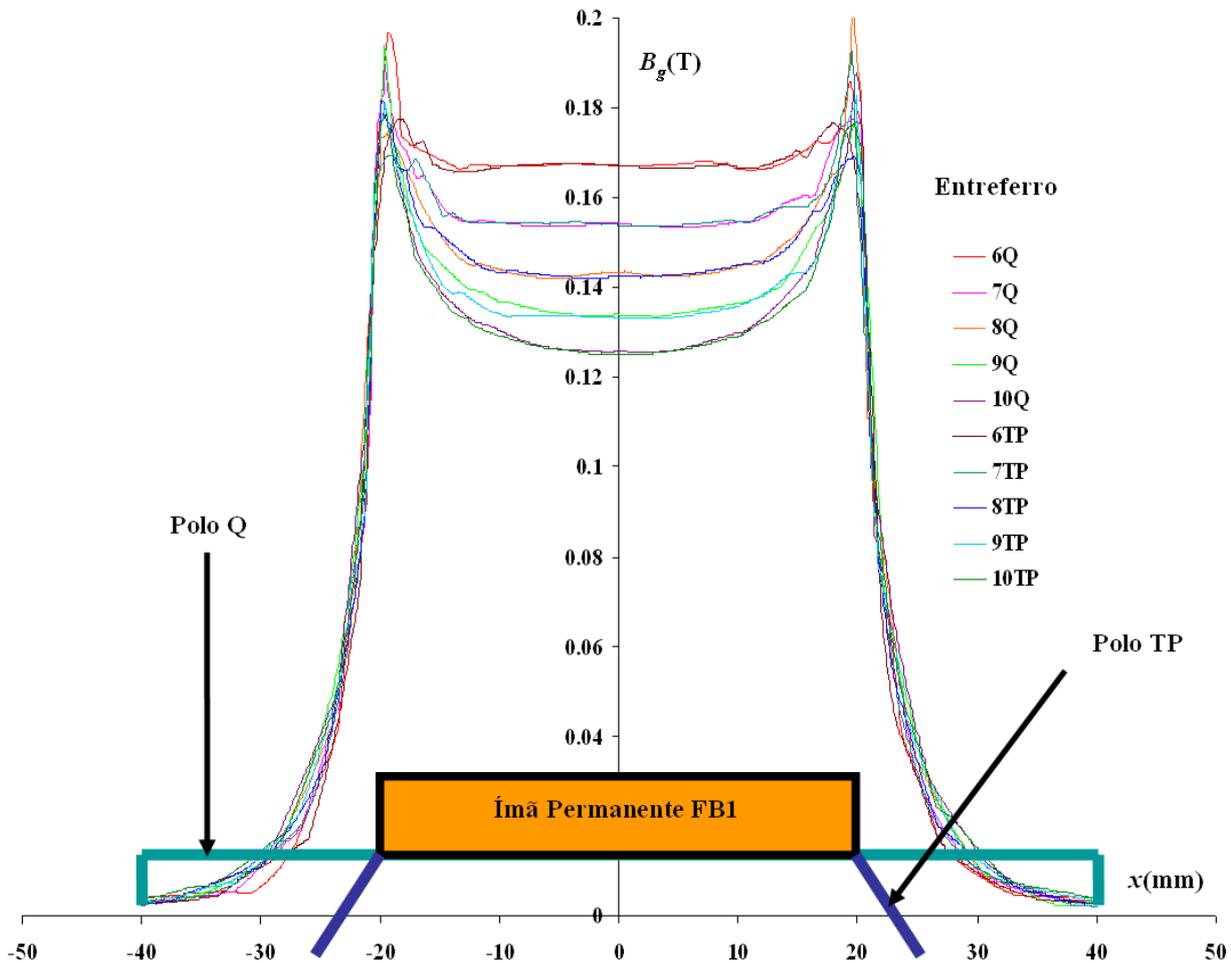


Figura 5-4. Comparação anterior estendida aos entreferros 6 até 10 mm.

Com o objetivo de organizar a informação, serão apresentados os resultados agrupados por geometria.

5.4.1.1 Ímãs tipo bloco quadrado 40 mm x 40 mm x 5 mm

Para os testes virtuais de determinação da densidade de fluxo remanente, foram feitos dez modelos para cada ímã, um para cada entreferro com pólo quadrado. Extraídos os valores para os respectivos centros geométricos obteve-se a Tabela 5-2 e Figura 5-5.

Como detalhado no capítulo 8, o ajuste escolhido para os pontos tanto das medições experimentais como virtuais é de tipo racional constante/linear do tipo:

$$\hat{y} = \frac{P_1}{x + q_1} \quad (5-7)$$

Tabela 5-2. Densidade de fluxo magnético no centro geométrico dos ímãs, em Tesla.

| l_g (mm) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| B_{gy}^s (FB1) | 0,3043 | 0,2616 | 0,2292 | 0,2040 | 0,1837 | 0,1671 | 0,1542 | 0,1436 | 0,1339 | 0,1256 |
| B_{gy}^s (SB1) | 0,6728 | 0,5780 | 0,5075 | 0,4517 | 0,4086 | 0,3732 | 0,3429 | 0,3176 | 0,2973 | 0,2801 |
| B_{gy}^s (NB1) | 0,9613 | 0,8250 | 0,7231 | 0,6424 | 0,5797 | 0,5255 | 0,4882 | 0,4516 | 0,4212 | 0,3964 |

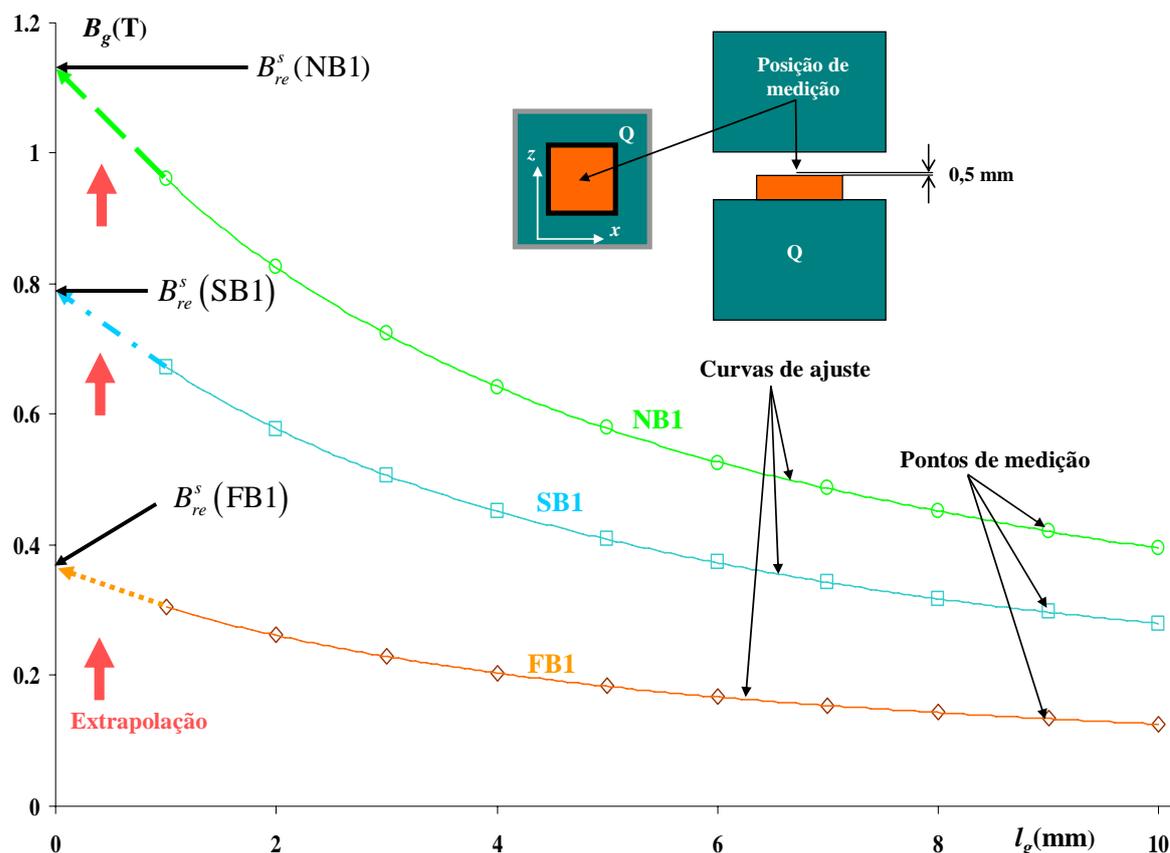


Figura 5-5. Determinação da densidade de fluxo magnético para diferentes entreferros nos ímãs FB1, SB1 e NB1 com simulação por elementos finitos.

Como resultado do ajuste das curvas da Figura 5-5 é possível obter os coeficientes e o valor extrapolado apresentados na Tabela 5-3.

Tabela 5-3. Coeficientes das curvas de ajuste racional constante linear para os ímãs NB1, SB1 e NB1.

| Ímã | p_1 | q_1 | p_1/q_1 |
|-----|----------|----------|-----------|
| FB1 | 1,887573 | 5,217878 | 0,361751 |
| SB1 | 4,222139 | 5,296237 | 0,797196 |
| NB1 | 5,935778 | 5,192526 | 1,143139 |

Lembrando que o mínimo entreferro de medição é aquele estabelecido pela espessura da sonda Hall. A obtenção da densidade de fluxo remanente estimada por simulação fazendo a extrapolação da (5-7) para o entreferro nulo:

$$\lim_{l_g \rightarrow 0} B_{gy}^s(l_g) = B_{re}^s = \frac{P_1}{q_1} \Rightarrow B_{re}^s [\text{FB1}] = 0,3618 \text{ T}; \quad (5-8)$$

$$B_{re}^s [\text{SB1}] = 0,7972 \text{ T e } B_{re}^s [\text{NB1}] = 1,1431 \text{ T}$$

Um dos objetivos da análise numérica estática foi o de verificar o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético no HEV, principalmente na região do entreferro de medição. Para cada um dos ímãs foram obtidos os mapeamentos do módulo da densidade de fluxo através da geometria do entreferro. Como exemplo são apresentados na Figura 5-6 os resultados para o ímã NB1.

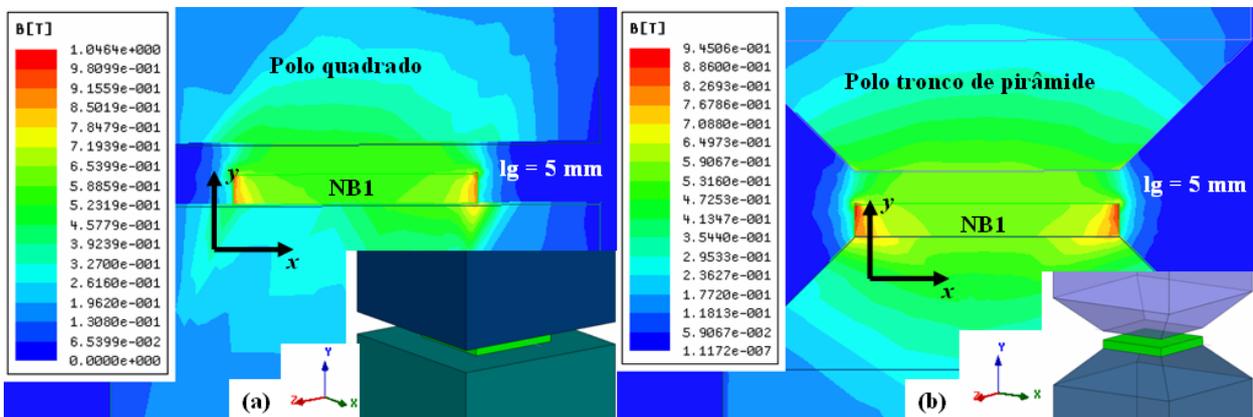


Figura 5-6. Densidade de fluxo magnético num entreferro de 5 mm com ímã NdFeB NB1: (a) Com polo quadrado; e (b) Com polo tronco de pirâmide.

Para a determinação da permeabilidade de retorno do ímã, o circuito magnético deve ser fechado ($l_g = 0$) e nas bobinas magnetizadoras é aplicada uma excitação de corrente contínua reduzida, Figura 5-7.

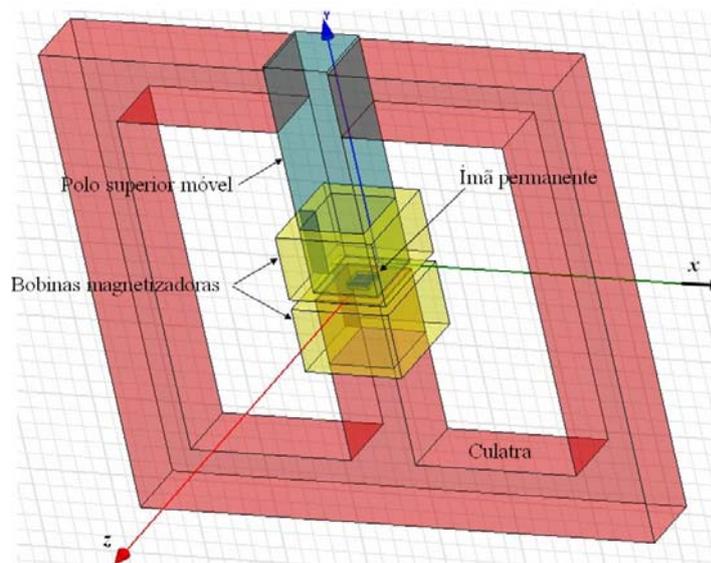


Figura 5-7. Configuração de determinação da permeabilidade de retorno, circuito magnético fechado ($l_g = 0$) e bobinas magnetizadoras com corrente reduzida.

Nesta configuração são feitos dois modelos para cada ímã com polo quadrado, um com entreferro fechado sem corrente e outro com corrente. Para os modelos com ímãs de Terras Raras foi aplicada uma excitação de corrente de 500 Ampère-espiras, e para o ímã de Ferrite usa-se uma excitação de 300 Ampère-espiras. Em cada simulação (com e sem corrente) são determinados os valores de B_m e H_m para logo determinar o quociente das variações:

$$\mu_{re}^s [\text{FB1}] = \frac{\Delta B_m}{\mu_0 \Delta H_m} = \frac{(0,3664 - 0,2478) \text{ T}}{\mu_0 (108,0 - 16,4) \text{ kA/m}} = 1,030 \quad (5-9)$$

$$\mu_{re}^s [\text{SB1}] = \frac{\Delta B_m}{\mu_0 \Delta H_m} = \frac{(0,8059 - 0,6111) \text{ T}}{\mu_0 (187,3 - 34,8) \text{ kA/m}} = 1,016 \quad (5-10)$$

$$\mu_{re}^s [\text{NB1}] = \frac{\Delta B_m}{\mu_0 \Delta H_m} = \frac{(1,2651 - 1,1546) \text{ T}}{\mu_0 (95,6 - 10,5) \text{ kA/m}} = 1,034 \quad (5-11)$$

A característica desmagnetizante dos ímãs com acentuada anisotropia magnetocristalina pode ser considerada linear, por conseguinte os parâmetros serão determinados partindo dessa base. A coercitividade normal H_c :

$$\mu_0 H_{ce}^s [\text{FB1}] = \frac{B_{re}^s}{\mu_{re}^s} = \frac{0,3650 \text{ T}}{1,030} = 0,3545 \text{ T} \Rightarrow H_{ce}^s = 282,1 \text{ kA/m} \quad (5-12)$$

$$\mu_0 H_{ce}^s [\text{SB1}] = \frac{B_{re}^s}{\mu_{re}^s} = \frac{0,7985 \text{ T}}{1,016} = 0,7856 \text{ T} \Rightarrow H_{ce}^s = 625,2 \text{ kA/m} \quad (5-13)$$

$$\mu_0 H_{ce}^s [\text{NB1}] = \frac{B_{re}^s}{\mu_{re}^s} = \frac{1,1631 \text{ T}}{1,034} = 1,1248 \text{ T} \Rightarrow H_{ce}^s = 895,1 \text{ kA/m} \quad (5-14)$$

O máximo produto energético (considerando desmagnetização linear), (FLORES FILHO, 1996) é:

$$(BH)_{\max}^s [\text{FB1}] = \frac{B_{re}^s}{2} \frac{H_{ce}^s}{2} = 25,28 \text{ kJ/m}^3 \quad (5-15)$$

$$(BH)_{\max}^s [\text{SB1}] = \frac{B_{re}^s}{2} \frac{H_{ce}^s}{2} = 124,44 \text{ kJ/m}^3 \quad (5-16)$$

$$(BH)_{\max}^s [\text{NB1}] = \frac{B_{re}^s}{2} \frac{H_{ce}^s}{2} = 251,42 \text{ kJ/m}^3 \quad (5-17)$$

Aos efeitos de comparação com o tratamento analítico e medições experimentais, somente serão apresentados os cálculos anteriores. Para as amostras restantes só serão apresentados resultados qualitativos das simulações e uma tabela resumida no final do capítulo. Como exemplo da simulação são apresentados os resultados para o ímã NB1, Figura 5-8.

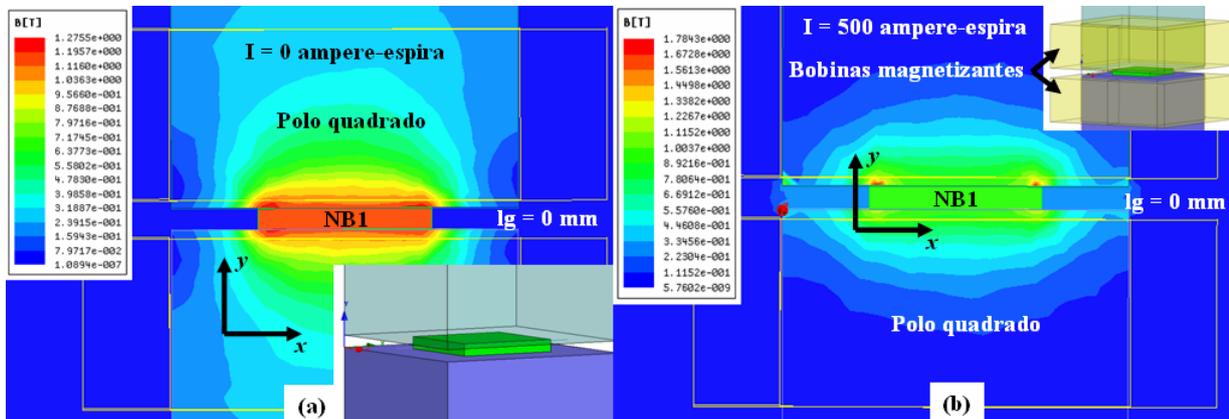


Figura 5-8. Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de NdFeB NB1 com circuito magnético fechado: (a) Sem corrente magnetizante; (b) Com corrente.

5.4.1.2 Ímãs tipo bloco quadrado de $(40 \times 40 \times 10) \text{ mm}^3$ e de $(25,4 \times 25,4 \times 8) \text{ mm}^3$.

Na simulação de elementos finitos para a determinação do B_r foram obtidos resultados tanto no mapeamento colorido do entreferro de medição como valores numéricos apresentados na Figura 5-9 e na Figura 5-10.

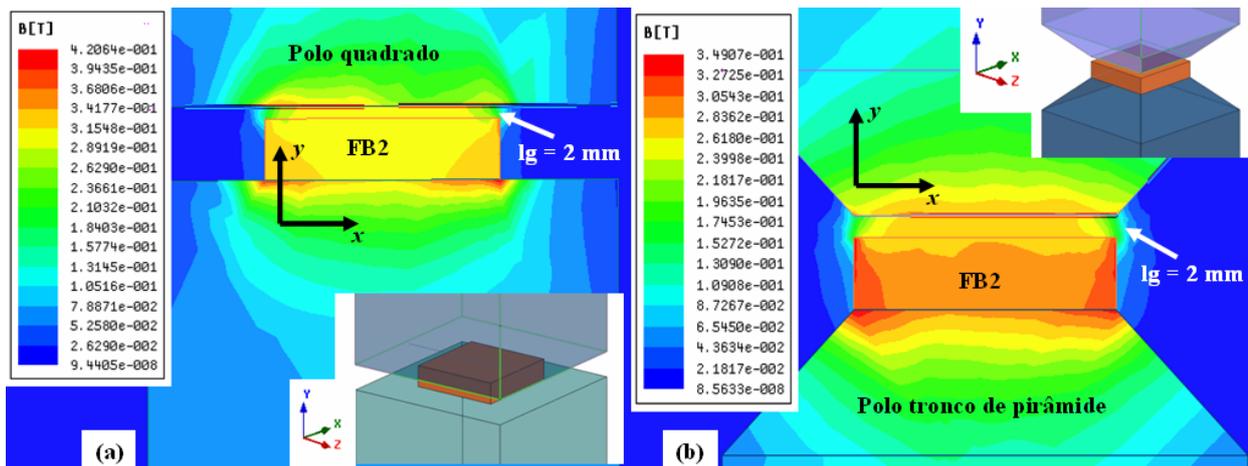


Figura 5-9. Densidade de fluxo magnético num entreferro de 2 mm com ímã cerâmico FB2: (a) Com polo quadrado; e (b) Com polo tronco de pirâmide.

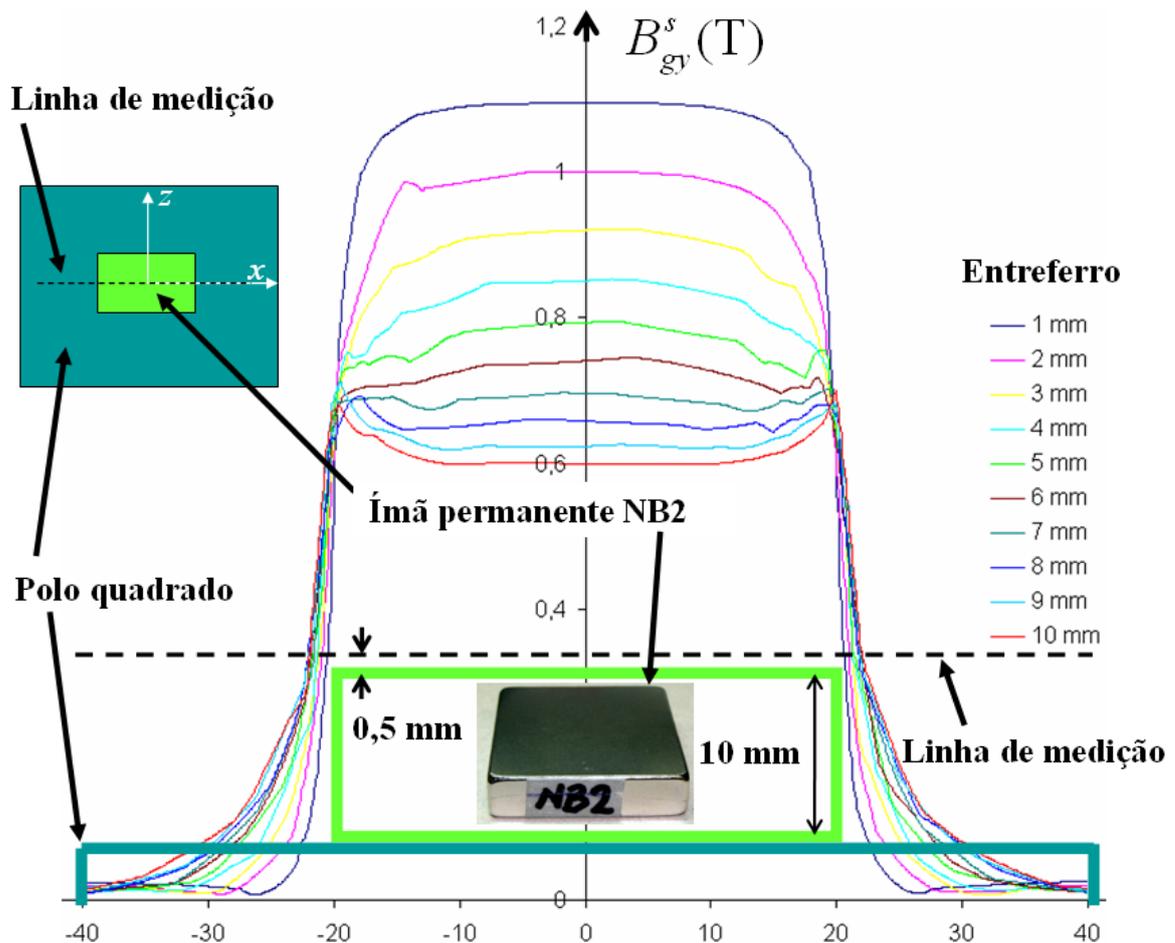


Figura 5-10. Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes posições do polo superior móvel no teste do ímã de NdFeB NB2.

Fecha-se o entreferro e feita a simulação por elementos finitos para a determinação da permeabilidade de retorno obteve-se os mapas coloridos e resultados numéricos observados na Figura 5-11 e nos resultados finais de tabela.

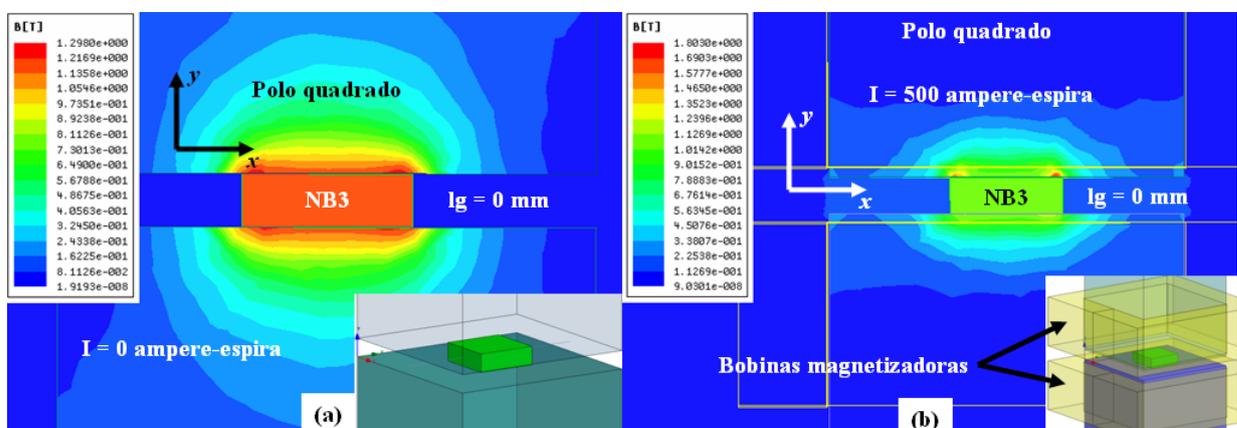
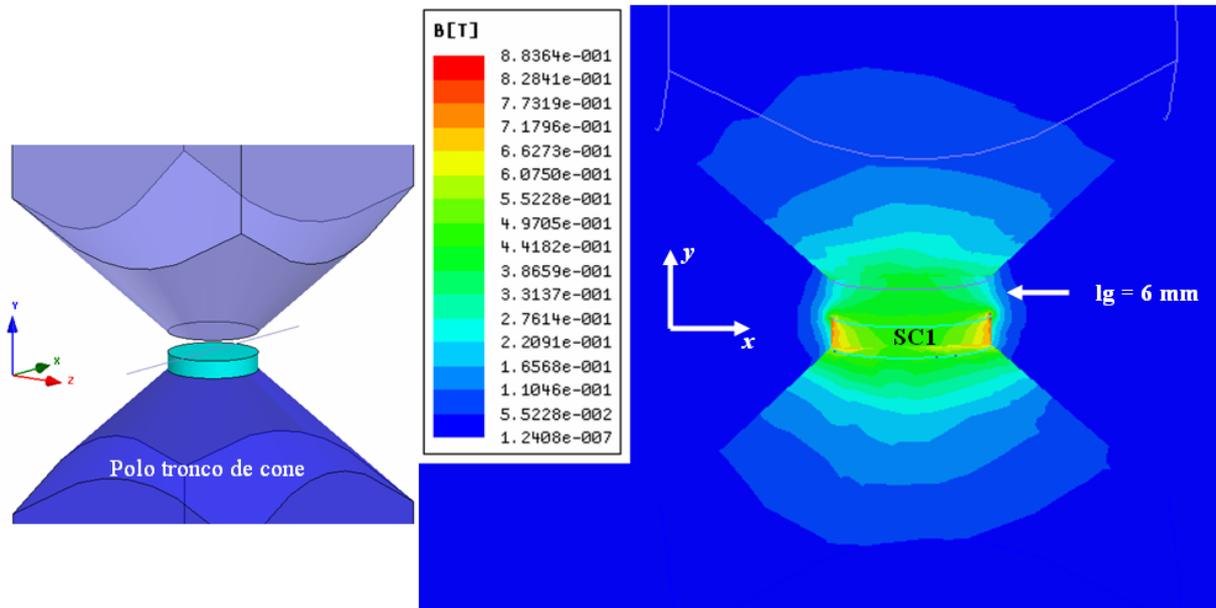


Figura 5-11. Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de NdFeB NB3 com circuito magnético fechado: (a) Sem corrente magnetizante; (b) Com corrente.

5.4.1.3 Ímãs tipo cilíndrico de 25,4 mm de diâmetro x 5 mm

Para os testes virtuais de determinação da densidade de fluxo remanente, foram feitos dez modelos para cada ímã, um para cada entreferro com pólo quadrado e com pólo tronco de cone, Figura 5-12.



Os resultados numéricos da simulação por elementos finitos pode ver-se na Figura 5-13.

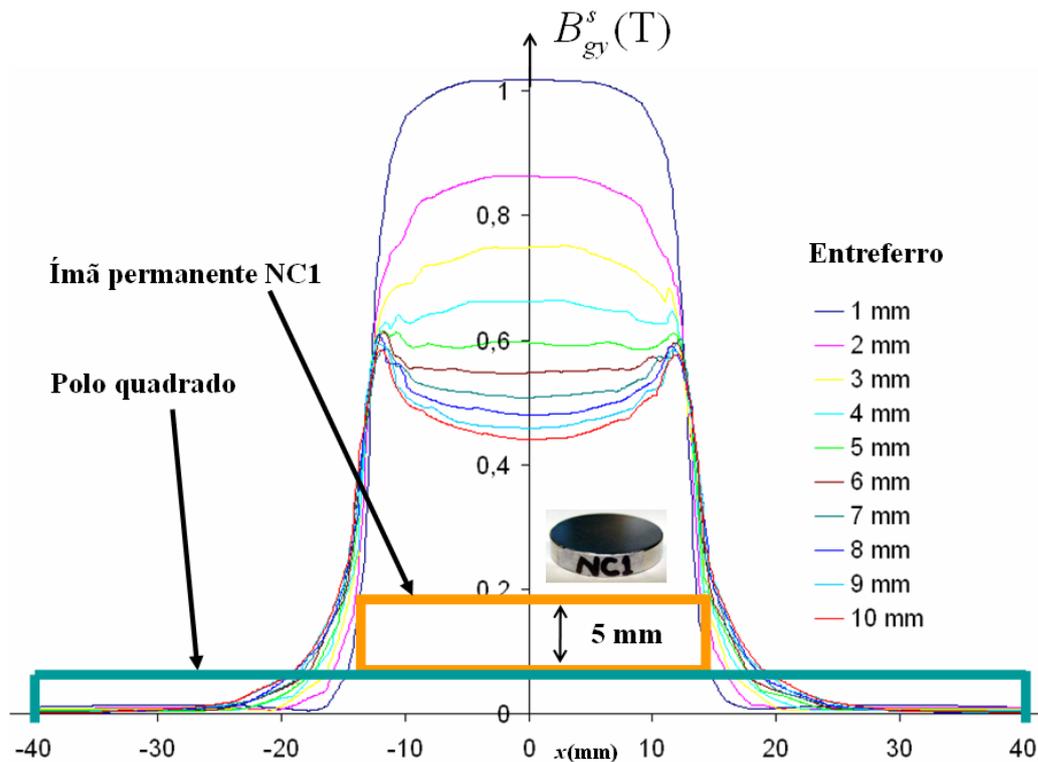


Figura 5-13. Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes posições do pólo superior móvel no teste do ímã de NdFeB NC1.

Como exemplo do mapa colorido da simulação com entreferro fechado na determinação da permeabilidade de retorno temos a Figura 5-14.

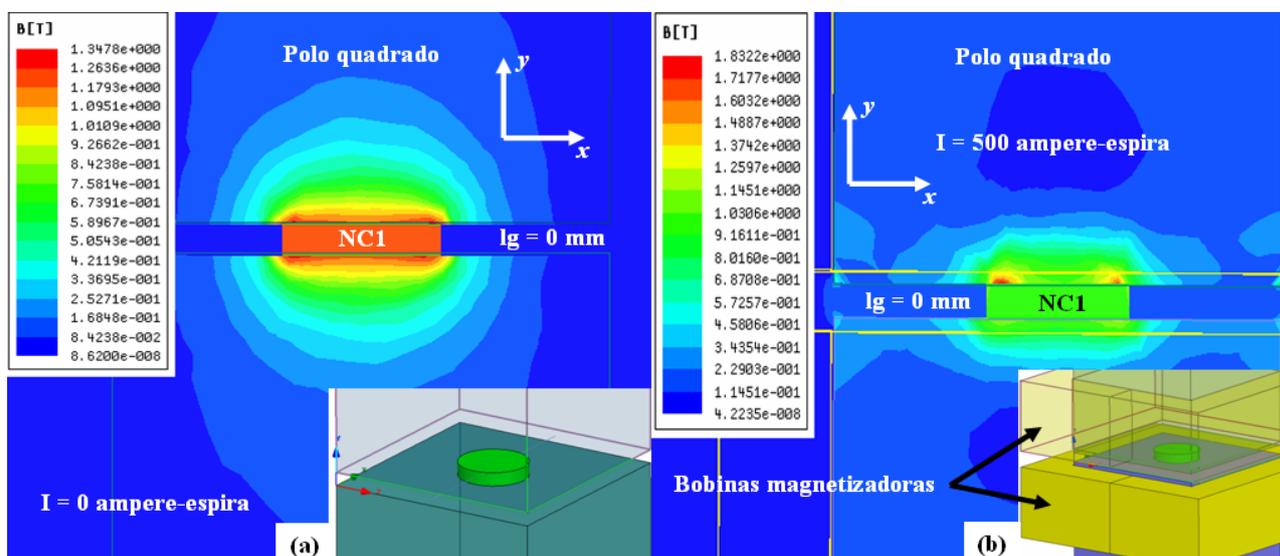


Figura 5-14. Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de NdFeB NC1 com circuito magnético fechado: (a) Sem corrente magnetizante; (b) Com corrente.

5.4.1.4 Ímãs tipo cilíndrico de 25,4 mm de diâmetro x 10 mm

Os resultados da simulação em mapa colorida na determinação da densidade de fluxo magnético remanente pode ver-se na Figura 5-15.

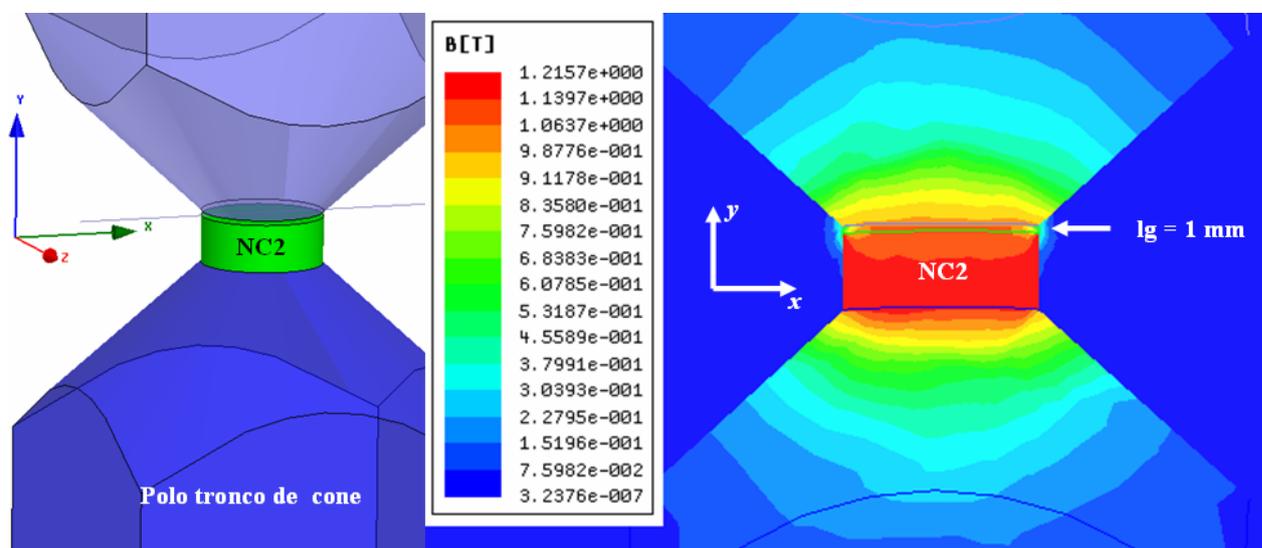


Figura 5-15. Densidade de fluxo magnético num entreferro de 1 mm com ímã NdFeB NC2 com polo tronco de cone.

Os resultados numéricos das varreduras para diferentes entreferros pode ver-se na Figura 5-16.

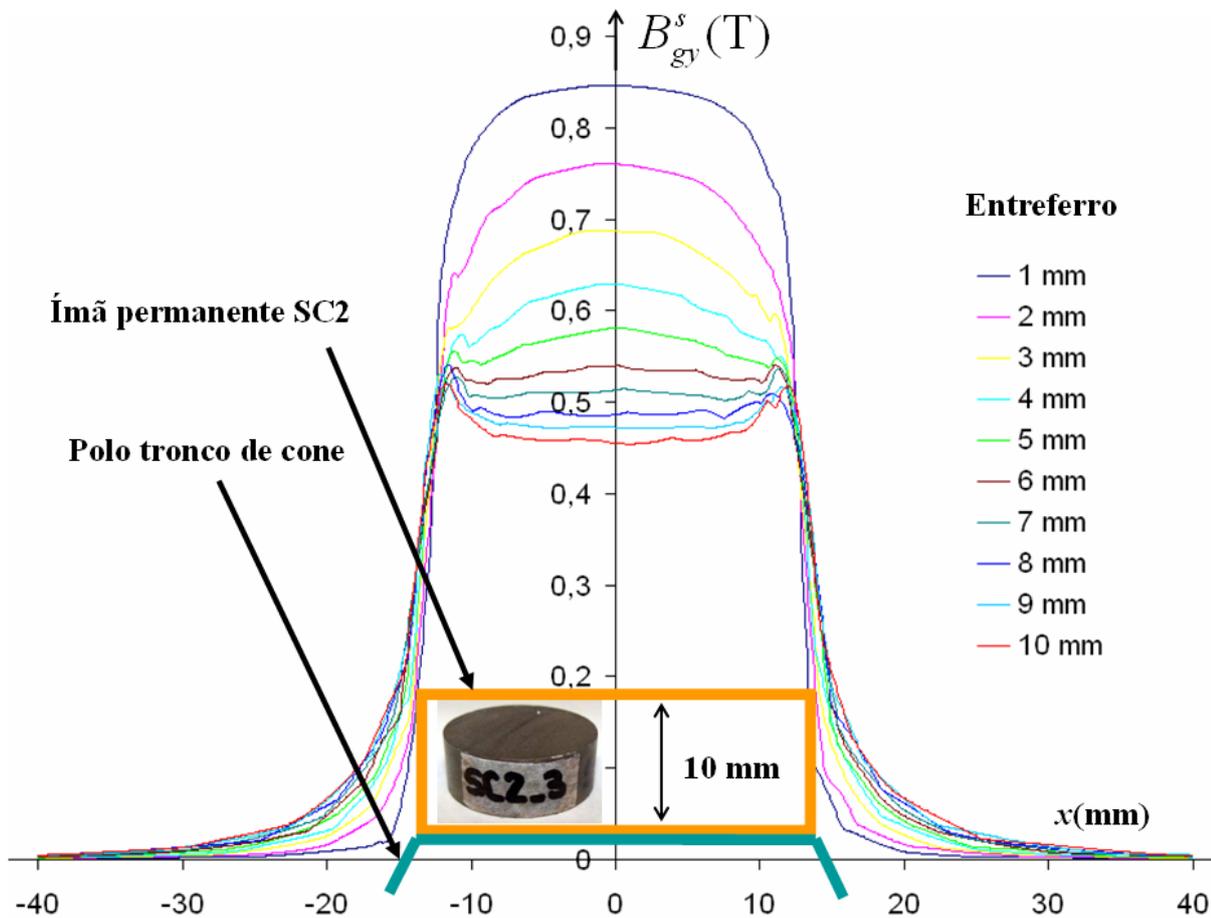


Figura 5-16. Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes posições do polo superior móvel no teste do ímã de SmCo SC2.

Na simulação com entreferro fechado visando a determinação da permeabilidade de retorno obteve-se a Figura 5-17.

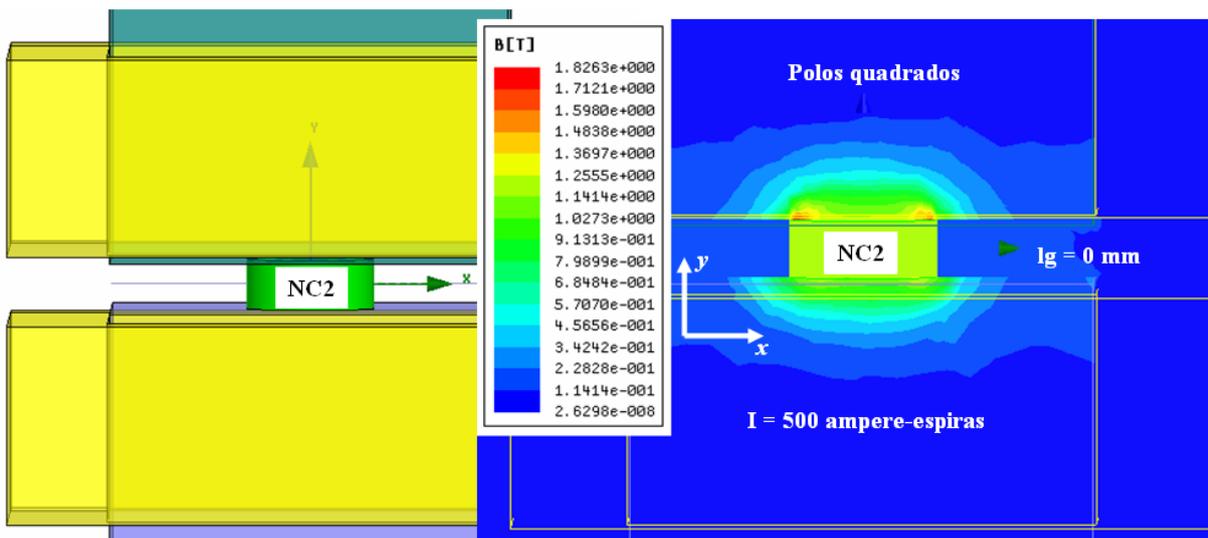


Figura 5-17. Ensaio virtual da determinação da permeabilidade de retorno da amostra de NdFeB NC2 com circuito magnético fechado e com corrente magnetizante.

Na Tabela 5-4 são apresentados os resultados resumidos das amostras simuladas.

Tabela 5-4. Parâmetros dos ímãs estimados por simulação.

| Ímã | $(BH)_{max}^s$ (kJ/m ³) | B_{re}^s (T) | H_{ce}^s (kA/m) | μ_{re}^s |
|------------|-------------------------------------|----------------|-------------------|--------------|
| FB1 | 25,74 | 0,362 | 282,1 | 1,030 |
| FB2 | 25,96 | 0,370 | 283,0 | 1,031 |
| FC1 | 27,67 | 0,367 | 289,4 | 1,052 |
| SB1 | 124,80 | 0,797 | 625,2 | 1,016 |
| SB2 | 170,91 | 0,929 | 735,1 | 1,007 |
| SC1 | 190,45 | 0,947 | 757,1 | 1,058 |
| SC2 | 173,06 | 0,932 | 737,6 | 1,013 |
| NB1 | 260,28 | 1,143 | 895,1 | 1,034 |
| NB2 | 270,05 | 1,207 | 914,7 | 1,027 |
| NB3 | 247,12 | 1,180 | 860,5 | 1,062 |
| NC1 | 289,87 | 1,193 | 934,0 | 1,058 |
| NC2 | 303,14 | 1,245 | 966,0 | 1,034 |

5.5 Comentários da Simulação por Elementos Finitos do HEV

Feitos diferentes modelos para os ímãs, polos e ensaios, encontrou-se que os resultados são compatíveis com os experimentais, o que permite afirmar que a simulação por FEM é uma ferramenta valiosa tanto no pré-design como na análise de resultados. Do ensaio em circuito magnético fechado com o ímã permanente de NdFeB NC2 (de maior densidade de fluxo magnético remanente) pode-se comprovar a inexistência de saturação na culatra. Através da análise dos mapas coloridos, verifica-se que o fluxo magnético distribui-se de forma aproximadamente simétrica e uniforme através do circuito magnético do HEV.

Página intencionalmente deixada em branco.

6 MODELO ANALÍTICO PARA O HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL

Os ímãs permanentes são frequentemente usados como fontes em circuitos magnéticos. A análise de um circuito com ímã permanente é similar a outro que tenha fonte de corrente elétrica. Porém, ímãs permanentes são diferentes em dois aspectos. Primeiro, a força magnetomotriz (*f.m.m.*) de uma fonte de corrente elétrica (bobina) é conhecida e dada pelo produto do número de espiras pela corrente, NI , mas, em princípio, a *f.m.m.* de um ímã permanente não é conhecida. Ela depende do ponto de funcionamento do ímã permanente (H_m, B_m), que, por sua vez, é função do circuito magnético como um todo. Segundo, o próprio ímã permanente é fisicamente parte do circuito, por conseguinte impõe uma relutância ao circuito.

O propósito neste capítulo é apresentar um estudo que produza um maior conhecimento do que acontece no entreferro de um circuito magnético do HEV com ímã permanente, através de um modelo que descreva analiticamente o comportamento da distribuição da densidade de fluxo magnético naquela região, permitindo assim que as medições de B e H nela feitas possam ser correlacionadas à característica de desmagnetização do ímã presente.

6.1 Entorno particular do modelo analítico do HEV

É inevitável que no desenvolvimento de qualquer teoria ou modelo matemático para a descrição de alguma parte do mundo físico sejam feitas aproximações. As conclusões baseadas nesse modelo devem ser obtidas com a precaução pelas simplificações implícitas e seus possíveis efeitos nos resultados. Sempre é conveniente dispor de alternativas que permitam corroborar as aproximações adotadas, e, se for o caso, ser possível obter conclusões do grau ou peso que cada aproximação teve nos resultados obtidos.

Neste trabalho, a ênfase reside no desenvolvimento de um método ou sistema de caracterização de ímãs permanentes com resultados finais rastreáveis a padrões internacionais. Isto permite não somente obter conclusões em relação ao protótipo implementado com seu método de medição associado, mas também em relação às outras ferramentas de análise, neste caso, o modelo matemático proposto e a análise numérica pelo método dos elementos finitos.

A seguir, serão apresentadas as equações fundamentais que descrevem o comportamento de um circuito magnético com ímã permanente na configuração aberta, ou seja, com entre-

ferro. No HEV, a determinação da densidade de fluxo remanente de um ímã permanente é baseada na medição de densidade de fluxo magnético no entreferro, para diferentes valores desse comprimento. Logo, neste capítulo serão apresentados e discutidos os diferentes tipos de condições de contorno que poderiam ser aproveitados no desenvolvimento do modelo procurado. Assim, serão apresentados os passos para obter uma expressão analítica que descreva o comportamento da densidade de fluxo magnético no entreferro que permita comparar com a determinação experimental do B_g e do B_r .

6.1.1 Equacionamento fundamental

As expressões gerais de Maxwell que se aplicam a um circuito magnético são (HAUS, MELCHER, 1998):

- Lei de Ampère

$$\oint_c \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_s \vec{J} \cdot d\vec{s} + \frac{d}{dt} \int_s \epsilon_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad \nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \epsilon_0 \vec{E}}{\partial t} \quad (6-1)$$

A circulação da intensidade do campo magnético ao redor de qualquer caminho fechado é igual à corrente elétrica circulante através da superfície encerrada pelo caminho.

- Lei de Faraday

$$\oint_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \int_s \mu_0 \vec{H} \cdot d\vec{s} = - \frac{d}{dt} \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} \quad \nabla \times \vec{E} = - \frac{\partial \mu_0 \vec{H}}{\partial t} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (6-2)$$

A força eletromotriz induzida num circuito fechado é igual à taxa de variação do fluxo magnético que enlaça o circuito ao longo do tempo. O sinal negativo indica que a reação tende a opor-se ao efeito que a gerou (Lei de Lenz).

- Lei de Gauss (continuidade ou conservação do fluxo magnético)

$$\oint_s \mu_0 \vec{H} \cdot d\vec{s} = \oint_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = 0 \quad \nabla \cdot \mu_0 \vec{H} = \nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6-3)$$

O fluxo magnético total a través de uma superfície fechada é nulo, indicando o conceito das linhas de fluxo fechadas, do fluxo que ingressa igual ao que egressa, e a não existência de monopolos ou elementos isolados como fonte ou sumidouro de campo magnético.

Nas equações anteriores, \vec{H} é o vetor intensidade de campo magnético em A/m, \vec{J} , o vetor densidade de corrente elétrica em A/m², \vec{E} é o vetor intensidade de campo elétrico e \vec{B} ,

o vetor densidade de fluxo magnético em Tesla. Esses vetores variam em função do espaço e do tempo (FURLANI, 2001):

$$\begin{aligned}\vec{H} &= H_x(x, y, z, t)\hat{x} + H_y(x, y, z, t)\hat{y} + H_z(x, y, z, t)\hat{z} \\ \vec{J} &= J_x(x, y, z, t)\hat{x} + J_y(x, y, z, t)\hat{y} + J_z(x, y, z, t)\hat{z} \\ \vec{E} &= E_x(x, y, z, t)\hat{x} + E_y(x, y, z, t)\hat{y} + E_z(x, y, z, t)\hat{z} \\ \vec{B} &= B_x(x, y, z, t)\hat{x} + B_y(x, y, z, t)\hat{y} + B_z(x, y, z, t)\hat{z}\end{aligned}\quad (6-4)$$

Acrescentam-se as equações constitutivas:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad \text{Indução magnética no entreferro.} \quad (6-5)$$

$$\vec{B} = \mu(H) \vec{H} \quad (6-6)$$

Indução magnética num material não linear

$$\vec{M} = \chi_m(H) \vec{H} \quad (6-7)$$

Considera-se $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m como a permeabilidade e a permissividade do vácuo, respectivamente, e \vec{M} é o vetor magnetização em A/m. Num material não linear, a permeabilidade e a susceptibilidade são, respectivamente, μ e χ_m . Estes coeficientes estão inter-relacionados entre si:

$$\mu = \mu_0(\chi_m + 1) \Rightarrow \chi_m = \frac{\mu}{\mu_0} - 1 \quad (6-8)$$

Em virtude da ausência de corrente elétrica no ensaio em questão, obtém-se da (6-1):

$$\oint_C \vec{H} \cdot d\vec{l} = 0 \quad \nabla \times \vec{H} = 0 \quad (6-9)$$

O método de obtenção da densidade de fluxo remanente com o HEV baseia-se em medições de densidade de fluxo no entreferro com abertura e fechamento manual do mesmo, o qual implica claramente que o fenômeno analisado pode ser considerado magnetoestático. Por conseguinte, da (6-2) e (6-4),

$$\frac{\mu_0 \partial \vec{H}}{\partial t} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \quad (6-10)$$

do que resulta

$$\begin{aligned}
\vec{H} &= H_x(x, y, z)\hat{x} + H_y(x, y, z)\hat{y} + H_z(x, y, z)\hat{z} \\
\vec{J} &= J_x(x, y, z)\hat{x} + J_y(x, y, z)\hat{y} + J_z(x, y, z)\hat{z} \\
\vec{E} &= E_x(x, y, z)\hat{x} + E_y(x, y, z)\hat{y} + E_z(x, y, z)\hat{z} \\
\vec{B} &= B_x(x, y, z)\hat{x} + B_y(x, y, z)\hat{y} + B_z(x, y, z)\hat{z}
\end{aligned} \tag{6-11}$$

Os ímãs permanentes, considerados o material sob ensaio no caso, devem apresentar segundo quadrante linear. Por conseguinte, das (6-6) e (6-7) obtém-se

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \tag{6-12}$$

Num material linear

$$\vec{M} = \chi_m\vec{H} \tag{6-13}$$

No caso de materiais não homogêneos, a permeabilidade é função das coordenadas:

$$\vec{B} = \mu(x, y, z)\vec{H} \tag{6-14}$$

Num material não homogêneo

Se o material apresenta anisotropia, a permeabilidade dependerá da direção:

$$\begin{aligned}
B_x &= \mu_{11}H_x + \mu_{12}H_y + \mu_{13}H_z \\
B_y &= \mu_{21}H_x + \mu_{22}H_y + \mu_{23}H_z \\
B_z &= \mu_{31}H_x + \mu_{32}H_y + \mu_{33}H_z
\end{aligned} \tag{6-15}$$

A conhecida relação constitutiva da indução ou densidade de fluxo magnético \vec{B} , que consiste da contribuição vetorial do campo magnético e da magnetização, é apresentada a seguir:

$$\vec{B} = \mu_0(\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0\vec{H} + \vec{J}_M \tag{6-16}$$

onde \vec{J}_M é vetor polarização magnética em Tesla.

6.1.2 Condições de contorno

Na determinação do desempenho das variáveis numa região com diferentes tipos de materiais, é necessário avaliar as formas integrais das equações de Maxwell em volumes de controle nas interfaces. Especificamente, a (6-1) é avaliada ao redor de um caminho infinitesimal de Stokes e a (6-3) sobre uma superfície infinitesimal de Gauss (IDA, BASTOS, 1997; CULLITY, 1972; FURLANI, 2001).

Aplica-se a (6-1) ao caminho infinitesimal de Stokes que se observa na Figura 6-1:

$$H_{t1}\Delta l - H_{t2}\Delta l = J\Delta l\Delta h + \frac{\partial D}{\partial t}\Delta l\Delta h \quad (6-17)$$

onde H_{t1} e H_{t2} são as componentes tangenciais à interface da intensidade do campo magnético. Para o caso particular da determinação do B_r com o HEV em que não se tem correntes elétricas envolvidas nem magnitudes dependentes do tempo:

$$H_{t1} = H_{t2} \quad (6-18)$$

A expressão é denominada continuidade da componente tangencial da intensidade do campo magnético \vec{H} .

Aplica-se agora a (6-3) à superfície de Gauss da Figura 6-1:

$$B_{n1}\Delta A - B_{n2}\Delta A = 0 \Rightarrow B_{n1} = B_{n2} \quad (6-19)$$

A expressão indica a continuidade da densidade de fluxo magnético ou indução numa interface.

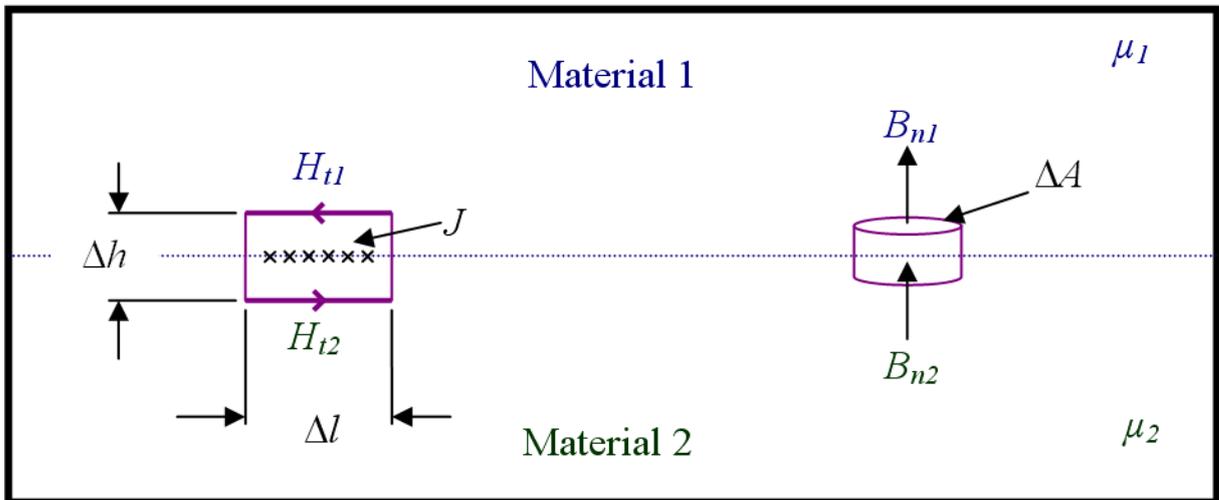


Figura 6-1. Condições de contorno entre dois materiais diferentes.

6.1.3 Potencial escalar magnético

Em determinados casos, é possível resolver problemas analíticos para determinação de campos diretamente das equações de Maxwell, porém, é mais frequente obter os campos utilizando funções potenciais (JACKSON, 1998; HAUS, MELCHER, 1998). Na ausência de corrente elétrica:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \quad (6-20)$$

Assim, \vec{H} poderia ser derivável do gradiente de um potencial denominado escalar magnético:

$$\nabla \times \vec{H} = 0 \Rightarrow \vec{H} = -\nabla\Psi \quad (6-21)$$

E como ademais:

$$\nabla \cdot \mu_0 \vec{H} = \nabla \cdot \vec{B} = 0 \Rightarrow \nabla^2\Psi = 0 \quad (6-22)$$

A expressão do potencial escalar magnético obedece à equação de Laplace no entreferro. Num ímã permanente, o potencial escalar magnético satisfaz também a equação de Poisson:

$$\nabla^2\Psi = \nabla \cdot \vec{M} = -\frac{\rho_m}{\mu_0} \quad (6-23)$$

onde ρ_m é a densidade de carga magnética, (HAUS, MELCHER, 1998).

6.2 Geometria adotada para o HEV

O HEV consiste de um circuito magnético de dupla janela, com os braços centrais reservados para acomodar as amostras e a instrumentação. Apenas a região central será exposta à análise e desenvolvimento do modelo analítico, porquanto, para os efeitos desta análise, a culatra será considerada como tendo permeabilidade infinita, e, por conseguinte, os dois polos ou cabeçotes representados como (3) na Figura 6-2 se encontram ao mesmo potencial escalar magnético.

Supondo geometria simétrica da culatra e do ímã permanente, ambos com seções quadradas:

$$l_{cx} = l_{cz} = l_c; l_{mx} = l_{mz} = l_m \text{ e } l_{c2} = l_c - l_{c1}$$

Adota-se l_{my} como o comprimento do ímã permanente através do seu eixo de magnetização. Em função da geometria do HEV, adota-se, para a resolução do problema, o sistema de coordenadas cartesianas retangulares.

Na Figura 6-2 é possível ver uma vista em perspectiva do entreferro do HEV e na Figura 6-3, uma vista bidimensional dos braços centrais e do ímã a ser caracterizado.

6.3 Expressão do problema do modelo analítico para o HEV

O objetivo é determinar uma expressão para o vetor densidade de fluxo na região do entreferro, identificada como (2) na Figura 6-2 e na Figura 6-3. A região (2) inicia-se na coordenada y e correspondente à localização da superfície polar superior do ímã permanente, e termina na coordenada y onde está localizada a superfície inferior da culatra superior.

Nessa região, a variação do vetor \vec{B} é linear com relação ao vetor \vec{H} , segundo (6-5), representada novamente com sub-índice usado internacionalmente em relação ao “gap”:

$$\vec{B}_g = \mu_0 \vec{H}_g \quad (6-24)$$

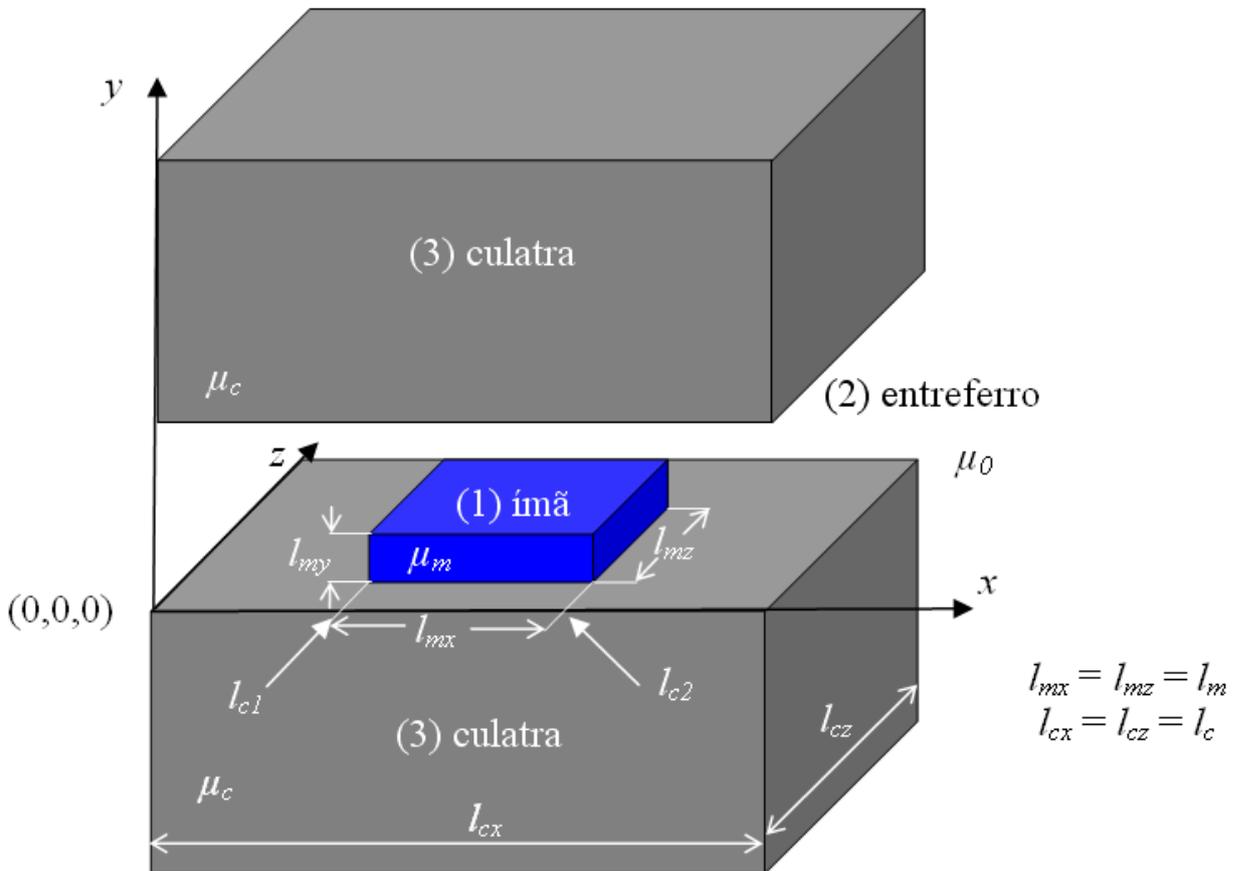


Figura 6-2. Vista tridimensional do entreferro com as regiões que participam na análise matemática do modelo analítico do HEV.

Da (6-21):

$$\vec{H}_g = -\nabla \Psi_g \Rightarrow \vec{B}_g(x, y, z) = \mu_0 [-\nabla \Psi_g(x, y, z)] \quad (6-25)$$

Em virtude do propósito do trabalho de caracterizar ímãs permanentes, relacionando sua densidade de fluxo magnético remanente com medições efetuados no centro geométrico do

entreferro, procura-se determinar a componente do vetor \vec{B} ao longo da direção paralela ao do eixo de y , obtida através da derivada parcial negativa do potencial escalar magnético em relação a y (denota-se a determinação analítica mediante o super-índice a):

$$B_{gy}^a = -\mu_0 \frac{\partial \Psi_g(x, y, z)}{\partial y} \quad (6-26)$$

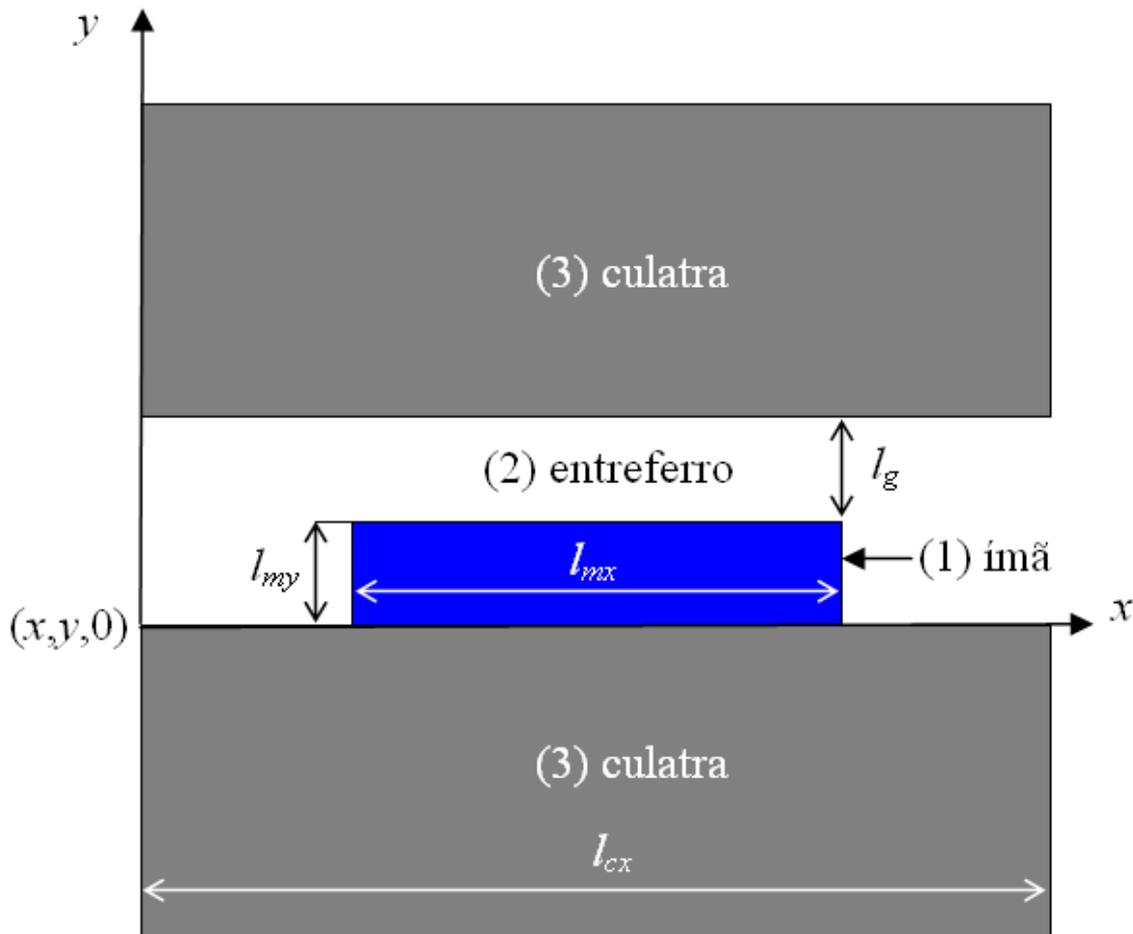


Figura 6-3. Vista bi-dimensional do entreferro do HEV.

Para determinar o potencial escalar magnético no entreferro, a estratégia será adaptar o fenômeno físico a expressões conhecidas que dispõem de resolução simples. Para isto é utilizada a divergência feita na (6-22):

$$\nabla \cdot \mu_0 \vec{H}_g = \nabla \cdot \vec{B}_g = 0 \Rightarrow \nabla^2 \Psi_g = 0 \quad (6-27)$$

Representando a equação de Laplace em coordenadas cartesianas retangulares, tem-se:

$$\frac{\partial^2 \Psi_g(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_g(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_g(x, y, z)}{\partial z^2} = 0 \quad (6-28)$$

O método a ser implementado é o da separação de variáveis, que leva a equação diferencial parcial a ser reduzida a um sistema de equações diferenciais ordinárias com resolução obtida através da aplicação de condições de fronteira mistas: Dirichlet, se o valor do potencial escalar magnético é especificado no contorno, e Neumann, se a derivada da solução é utilizada (FURLANI, 2001).

O primeiro passo, então, é supor que o potencial escalar magnético pode ser expresso como produto das funções X (somente função da variável x), Y (somente função da variável y) e Z (somente função da variável z):

$$\Psi_g(x, y, z) = X(x) \cdot Y(y) \cdot Z(z) \quad (6-29)$$

A (6-28) com a (6-29) toma a seguinte forma:

$$Y(y)Z(z)\frac{d^2X(x)}{dx^2} + X(x)Z(z)\frac{d^2Y(y)}{dy^2} + X(x)Y(y)\frac{d^2Z(z)}{dz^2} = 0 \quad (6-30)$$

Dividindo a (6-30) pela (6-29)

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2X(x)}{dx^2} + \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2Y(y)}{dy^2} + \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2Z(z)}{dz^2} = 0 \quad (6-31)$$

Devido ao fato de que x , y e z são variáveis independentes, a soma anterior é possível se cada um dos termos é igual a uma constante:

$$\frac{1}{X(x)} \frac{d^2X(x)}{dx^2} = -k_x^2 ; \frac{1}{Y(y)} \frac{d^2Y(y)}{dy^2} = k_y^2 ; \frac{1}{Z(z)} \frac{d^2Z(z)}{dz^2} = -k_z^2 \quad (6-32)$$

A soma das constantes deve ser igual a zero:

$$k_y^2 = k_x^2 + k_z^2 = k^2 \quad (6-33)$$

o que satisfaz a (6-31). Assim, o conjunto de equações (6-32) pode ser escrito como:

$$\begin{aligned}
\frac{d^2 X(x)}{dx^2} + k_x^2 X(x) &= 0 \\
\frac{d^2 Y(y)}{dy^2} - k^2 Y(y) &= 0 \\
\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + k_z^2 Z(z) &= 0
\end{aligned} \tag{6-34}$$

Estas equações têm as possíveis soluções

$$\begin{aligned}
X &\sim \sin k_x x \text{ ou } \cos k_x x \text{ ou } e^{jk_x x} \\
Y &\sim \sinh ky \text{ ou } \cosh ky \text{ ou } e^{ky} \\
Z &\sim \sin k_z z \text{ ou } \cos k_z z \text{ ou } e^{jk_z z}
\end{aligned} \tag{6-35}$$

No caso da região (1), Fig. 6-3, o ímã permanente que será analisado exclusivamente no segundo quadrante é considerado linear, homogêneo e possuindo anisotropia magnetocristalina, magnetizado no seu eixo “fácil” y . Portanto, o vetor magnetização \vec{M} pode ser representado como:

$$\vec{M}_{pm} = 0\hat{x} + M_s\hat{y} + 0\hat{z} \tag{6-36}$$

Também, considerando que \vec{M} é uniforme, se acrescenta que a densidade de carga magnética é zero em ambas as regiões:

$$\rho_{ip} = -\nabla \cdot \vec{M} = 0 \Rightarrow \nabla^2 \Psi_{ip} = 0 \tag{6-37}$$

Portanto, de forma similar como foi feito para o entreferro, para o ímã permanente a equação (5.23) pode ser expressa por:

$$\frac{\partial^2 \Psi_{ip}(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{ip}(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi_{ip}(x, y, z)}{\partial z^2} = 0 \tag{6-38}$$

As possíveis soluções para as duas regiões poderão ser escritas:

$$\text{Região (1) } \Psi_{ip} = (A_1 \sin k_x x + A_2 \cos k_x x)(B_1 e^{ky} + B_2 e^{-ky})(C_1 \sin k_z z + C_2 \cos k_z z) \tag{6-39}$$

$$\text{Região (2)} \quad \Psi_g = (A_3 \sin k_x x + A_4 \cos k_x x) (B_3 e^{ky} + B_4 e^{-ky}) (C_3 \sin k_z z + C_4 \cos k_z z) \quad (6-40)$$

6.4 Resolução do problema do modelo analítico para o HEV inserindo as condições de fronteira

Tanto na região (1) como na (2), Fig. 6-3, é possível considerar que o potencial escalar magnético é nulo (condição de fronteira Dirichlet) nos planos $x = z = 0$ e em $x = z = l_c$, por conseguinte se expressa as constantes k_x , k_z e k como:

$$k_x = \frac{m\pi}{l_c}; k_z = \frac{n\pi}{l_c} \Rightarrow k = \sqrt{k_x^2 + k_z^2} = \frac{\pi}{l_c} \sqrt{m^2 + n^2} \quad (6-41)$$

onde m e n são números positivos e inteiros. As (6-39) e (6-40) podem ser expressas como (SILVEIRA, 2003):

$$\text{Região (1)} \quad \Psi_{ip} = \sum_{m,n} \sin \frac{m\pi}{l_c} x (B_1 e^{ky} + B_2 e^{-ky}) \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-42)$$

$$\text{Região (2)} \quad \Psi_g = \sum_{m,n} \sin \frac{m\pi}{l_c} x (B_3 e^{ky} + B_4 e^{-ky}) \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-43)$$

Já no plano $y = 0$, na fronteira entre o pólo e o ímã permanente, a componente tangencial do campo magnético é nula:

$$H_{tm}(x, 0, z) = - \left. \frac{\partial \Psi_{ip}(x, y, z)}{\partial x \partial z} \right|_{y=0} = 0 \text{ para } (0 < x, z < l_c) \quad (6-44)$$

Esta condição proporciona

$$B_1 = -B_2 \quad (6-45)$$

No plano $y = l_{my} + l_g$ na fronteira superior do entreferro também tem-se que a componente tangencial do campo magnético é nula:

$$H_{tg}(x, l_{my} + l_g, z) = - \left. \frac{\partial \Psi_{ip}(x, y, z)}{\partial x \partial z} \right|_{y=l_{my}+l_g} = 0 \text{ para } (0 < x, z < l_c) \quad (6-46)$$

De esta condição obtém-se

$$B_3 e^{k(l_{my}+l_g)} = -B_4 e^{-k(l_{my}+l_g)} \Rightarrow B_3 = -B_4 e^{-2k(l_{my}+l_g)} \quad (6-47)$$

Na fronteira do ímã permanente com o entreferro $y = l_{my}$ deve manifestar-se a continuidade do potencial escalar magnético:

$$\Psi_{ip}(x, l_{my}, z) = \Psi_g(x, l_{my}, z) \quad (6-48)$$

Esta condição proporciona

$$B_1 e^{kl_{my}} + B_2 e^{-kl_{my}} = B_3 e^{kl_{my}} + B_4 e^{-kl_{my}} \quad (6-49)$$

Das (6-45); (6-47) e (6-49) pode-se obter

$$B_1 (e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}}) = B_4 e^{-kl_{my}} (1 - e^{-2kl_g}) \Rightarrow B_1 = B_4 \frac{e^{-kl_{my}} (1 - e^{-2kl_g})}{(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}})} \quad (6-50)$$

Na mesma fronteira deve-se observar continuidade da densidade de fluxo:

$$\begin{aligned} \mu_0 [H_{ip}(x, l_{my}, z) + M_{ip}] \Big|_{y=l_{my}} &= \mu_0 H_g(x, l_{my}, z) \Big|_{y=l_{my}} \\ \left(-\frac{d\Psi_{ip}}{dy} + M_{ip} \right) \Big|_{y=l_{my}} &= -\frac{d\Psi_g}{dy} \Big|_{y=l_{my}} \end{aligned} \quad (6-51)$$

O primeiro termo da expressão anterior será:

$$H_{ip}(x, l_{my}, z) = -\left. \frac{\partial \Psi_{ip}}{\partial y} \right|_{y=l_{my}} = \sum_{m,n=1}^{\infty} \left[-k \sin \frac{m\pi}{l_c} x (B_1 e^{kl_{my}} - B_2 e^{-kl_{my}}) \sin \frac{n\pi}{l_c} z \right] \quad (6-52)$$

Também nesta fronteira é preciso expressar a magnetização dentro dos limites do entreferro, para isto a mesma será representada como uma dupla série de Fourier (SILVEIRA, 2003):

$$M_{ip}(x, z) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} c_{mn} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-53)$$

A constante c_{mn} pode ser calculada como

$$c_{mn} = \frac{4M_s}{l_c l_c} \int_{l_{c1}}^{l_{c2}} \int_{l_{c1}}^{l_{c2}} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z dx dz = \frac{4M_s}{l_c^2} \left| \frac{\cos \frac{m\pi}{l_c} x}{\frac{m\pi}{l_c}} \right|_{l_{c1}}^{l_{c2}} \cdot \left| \frac{\cos \frac{n\pi}{l_c} z}{\frac{n\pi}{l_c}} \right|_{l_{c1}}^{l_{c2}} \quad (6-54)$$

A magnetização considerada em toda a extensão do sistema considerado:

$$M_{ip}(x, z) = \frac{16M_s}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{mn} \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-55)$$

O termo à direita da igualdade da (6-51) pode ser calculado como

$$H_g(x, l_{my}, z) = - \left| \frac{\partial \Psi_g}{\partial y} \right|_{y=l_{my}} = \sum_{m,n=1}^{\infty} \left[-k \sin \frac{m\pi}{l_c} x \left(B_3 e^{kl_{my}} - B_4 e^{-kl_{my}} \right) \sin \frac{n\pi}{l_c} z \right] \quad (6-56)$$

De (6-52), (6-55) e (6-56) tem-se

$$-kB_1 \left(e^{kl_{my}} + e^{-kl_{my}} \right) + \frac{16M_s \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c}}{mn\pi^2} = kB_4 \left(e^{-2k(l_{my}+l_g)} e^{kl_{my}} + e^{-kl_{my}} \right) \quad (6-57)$$

Incorporando a (6-50) e arranjando os termos,

$$B_4 = \frac{8M_s \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \left(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}} \right)}{kmn\pi^2 \left[1 - e^{-2k(l_{my}+l_g)} \right]} \quad (6-58)$$

Substituindo na (6-47),

$$B_3 = - \frac{8M_s \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \left(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}} \right)}{kmn\pi^2 \left[e^{2k(l_{my}+l_g)} - 1 \right]} \quad (6-59)$$

O potencial escalar magnético do entreferro da (6-43) pode agora ser obtido como

$$\Psi_g(x, y, z) = - \frac{8M_s}{\pi^2} \sum_{m,n=\text{impar}}^{\infty} \left[\frac{e^{ky}}{\left[e^{2k(l_{my}+l_g)} - 1 \right]} - \frac{e^{-ky}}{\left[1 - e^{-2k(l_{my}+l_g)} \right]} \right] \cdot \frac{\left(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}} \right)}{kmn} \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-60)$$

Agora é possível obter a densidade de fluxo no entreferro a partir de (6-26).

$$B_{gy}^a = -\mu_0 \frac{\partial \Psi_g(x, y, z)}{\partial y} = \frac{8\mu_0 M_s}{\pi^2} \sum_{m,n=\text{ímpar}}^{\infty} \left[\frac{e^{ky}}{\left[e^{2k(l_{my}+l_g)} - 1 \right]} + \frac{e^{-ky}}{\left[1 - e^{-2k(l_{my}+l_g)} \right]} \right] \cdot \frac{(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}})}{mn} \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-61)$$

Sabendo que $\mu_0 M_s = B_r$ é possível escrever (PARKER, 1990):

$$B_{gy}^a = \frac{8B_r}{\pi^2} \sum_{m,n=\text{ímpar}}^{\infty} \left[\frac{\left[1 - e^{-2k(l_{my}+l_g)} \right] e^{ky} + \left[e^{2k(l_{my}+l_g)} - 1 \right] e^{-ky}}{\left[e^{2k(l_{my}+l_g)} - 1 \right] \left[1 - e^{-2k(l_{my}+l_g)} \right]} \right] \cdot \frac{(e^{kl_{my}} - e^{-kl_{my}})}{mn} \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \quad (6-62)$$

Simplificando a expressão anterior com a relação $\cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2}$

$$B_{gy}^a = \frac{8B_r}{\pi^2} \sum_{m,n=\text{ímpar}}^{\infty} \cos \frac{m\pi l_{c1}}{l_c} \cos \frac{n\pi l_{c1}}{l_c} \cdot \sin \frac{m\pi}{l_c} x \sin \frac{n\pi}{l_c} z \cdot \left\{ \frac{\cosh[k(y+l_{my})] - \cosh[k(y-l_{my}-2l_g)] + \cosh[k(y-3l_{my}-2l_g)] - \cosh[k(y-l_{my})]}{mn \left\{ \cosh[2k(l_{my}+l_g)] - 1 \right\}} \right\} \quad (6-63)$$

Na Figura 6-4 pode-se ver o gráfico de densidade de fluxo da (6-63) em 2D para diferentes entreferros (1 a 10 mm) cujo código num *software* de cálculo numérico é incorporado no Apêndice 3. A partir de 50 termos na dupla série de Fourier não se observa modificação no valor máximo da densidade de fluxo magnético. No citado apêndice é apresentada a análise que permite alcançar esta conclusão.

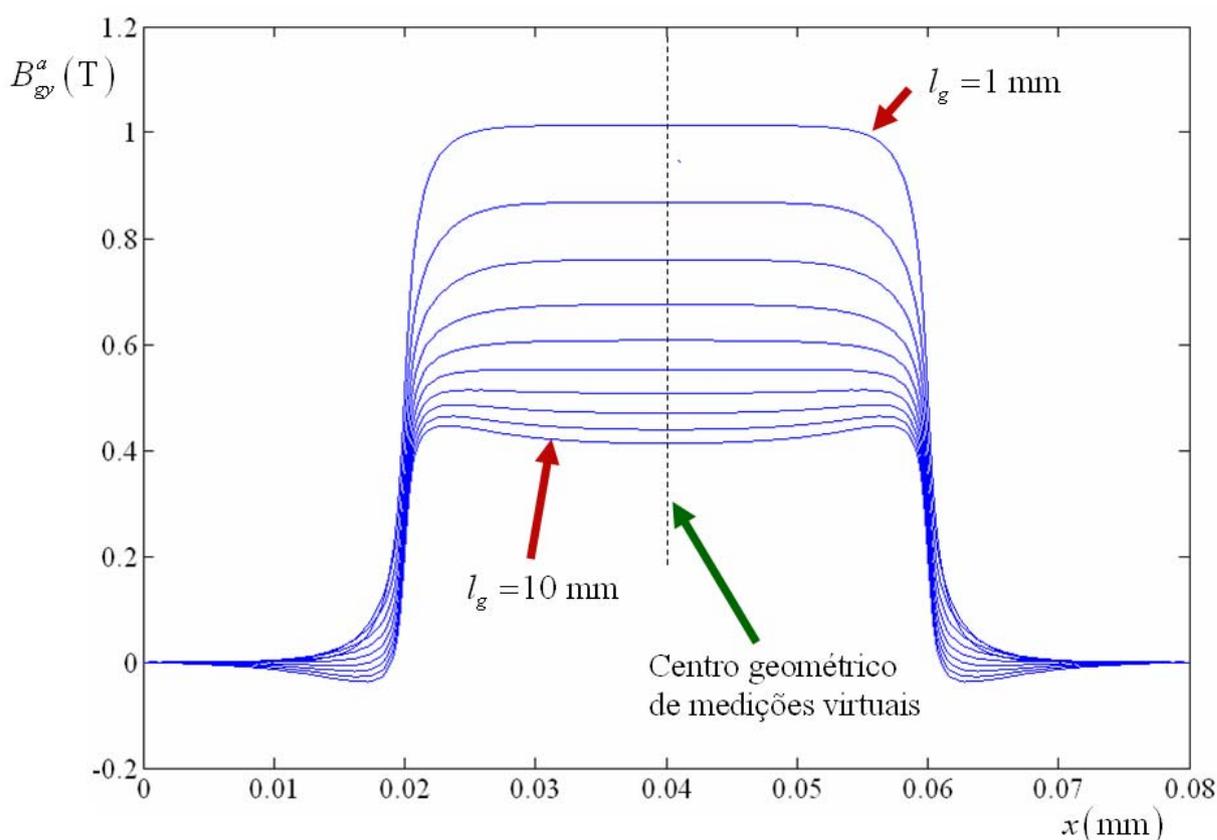


Figura 6-4. Curvas da densidade de fluxo magnético no entreferro em 2D para dez valores de l_g desde 1 até 10 mm. Leitura 0,5 mm por cima do ímã (equivalente a sonda Hall) em y e no centro geométrico do ímã e da culatra para z. O número de termos da serie dupla de Fourier se expressa com $p = 50$.

A representação em 3D da Figura 6-5 também foi obtida com leitura em 8,5 mm em y, sendo que o ímã permanente tem 8 mm de comprimento no sentido da magnetização (y), a leitura é efetuada 0,5 mm acima da amostra, tal como é feita a medição com a sonda Hall do Gaussímetro na medição experimental. Neste gráfico somente é observado o desempenho para o entreferro de 1 mm. A janela de dados no centro geométrico do gráfico 3D tem as coordenadas trocadas (y pelo z) em virtude do sistema adotado pelo Matlab.

Os valores determinados no centro geométrico para cada entreferro, equivalentes a uma “medição” analítica são incorporados na Tabela 6-1.

Tabela 6-1. Densidade de fluxo analítico no entreferro para diferentes valores de l_g .

| l_g (mm) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| B_g (T) | 1,078 | 0,961 | 0,864 | 0,785 | 0,721 | 0,670 | 0,630 | 0,598 | 0,572 | 0,552 |

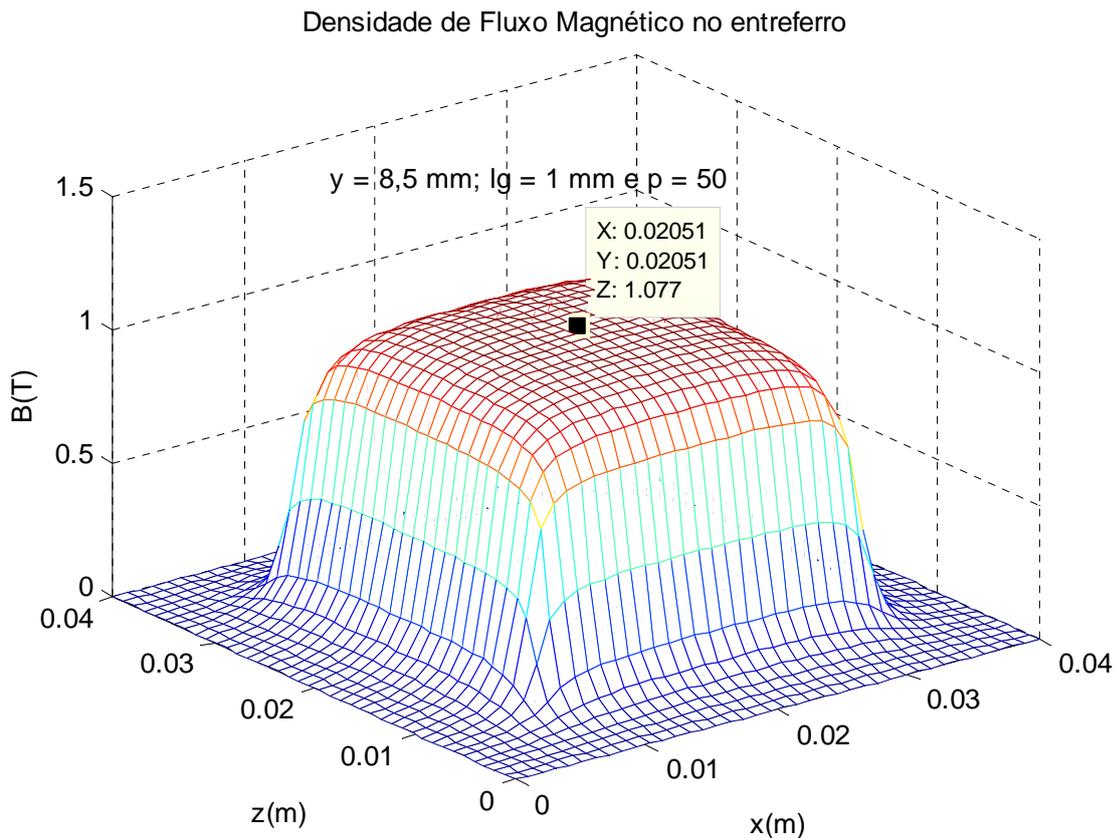


Figura 6-5. B_{gy} em 3D nas mesmas condições que na figura anterior para um entreferro de 1 mm.

Levantados estes dados de densidade de fluxo no entreferro obtidos no centro geométrico ao gráfico é possível observar a necessidade de extrapolação para estimar o valor analítico da densidade de fluxo remanente que surge da definição:

$$B_{re}^a = \lim_{l_g \rightarrow 0} B_{gy}^a(l_g) \quad (6-64)$$

No capítulo reservado às conclusões será feito a comparação dos resultados obtidos analiticamente, por simulação e experimentais.

6.5 Conclusões do estudo analítico do B no entreferro

Baseado nas equações de Maxwell, separação de variáveis e aplicando condições de fronteira, obteve-se uma expressão analítica da densidade de fluxo magnético no entreferro em dupla série de Fourier que consegue estimar a densidade de fluxo remanente de um ímã permanente que atenda as condições definidas nesta modelagem.

7 ENTORNO OPERATIVO DO HEV

Por entorno operativo entende-se tudo aquilo que não é parte da rotina de uma caracterização usual, mas tudo aquilo que deve estar pronto para uma adequada caracterização. Designado um determinado gaussímetro ao HEV, é preciso não somente incorporar os dados desse instrumento no *software* do computador, mas determinar as incertezas da sonda Hall nas variáveis dimensionais x , y , z e θ (definidas como as variáveis do entreferro apresentadas nos capítulos 4, 5 e 6, junto com o ângulo de rotação ao redor do eixo axial da sonda). Também serão apresentadas as características dos diferentes ímãs permanentes, ou seja, padrões e de teste, utilizados nos ensaios do HEV e o procedimento de ajuste ou calibração.

7.1 Amostras utilizadas

Para ajustar o HEV foram utilizadas quatro amostras padrão, enquanto que para avaliar sua capacidade na caracterização de ímãs permanentes foram utilizadas seis amostras de características conhecidas.

7.1.1 Ímãs permanentes padrões

A seguir, descrevem-se as principais características geométricas e magnéticas dos ímãs permanentes utilizados como padrão de ajuste do HEV, Figura 7-1, Tabela 7-1 e Tabela 7-2:

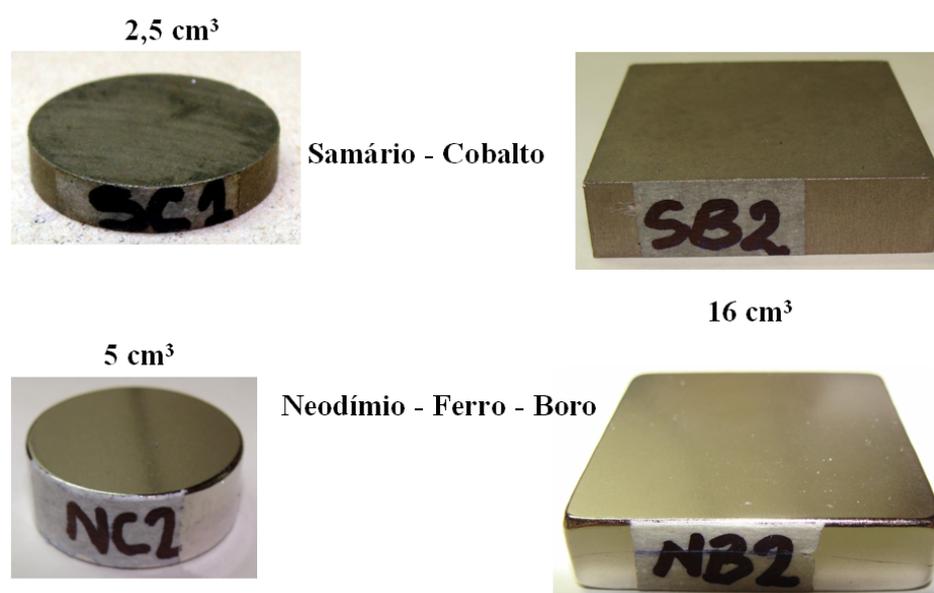


Figura 7-1. Ímãs permanentes usados como padrões.

Tabela 7-1. Ímãs permanentes usados como padrão de ajuste, descrição física.

| Material | ID | Tipo | Dimensões área polar (mm) | Dimensão na direção de magnetização (mm) | Volume (cm ³) |
|---------------------|-----|------------|---------------------------|--|---------------------------|
| Neodímio-Ferro-Boro | NB2 | Bloco | 40×40 | 10 | 16 |
| | NC2 | Cilíndrico | φ 25,4 | 10 | 5,07 |
| Samário-Cobalto | SB2 | Bloco | 40×40 | 10 | 16 |
| | SC1 | Cilíndrico | φ 25,4 | 5 | 2,53 |

Tabela 7-2. Ímãs permanentes usados como padrão de ajuste, descrição magnética.

| ID | $(BH)_{\max}$ (kJ/m ³) | B_r (T) | μ_r | H_c (kA/m) |
|-----|------------------------------------|-----------|---------|--------------|
| NB2 | 298,0 | 1,242 | 1,029 | 963 |
| NC2 | 310,6 | 1,278 | 1,046 | 962 |
| SB2 | 180,0 | 0,956 | 1,010 | 751 |
| SC1 | 187,5 | 0,999 | 1,059 | 730 |

7.1.2 Ímãs permanentes conhecidos usados nos testes

Seguem as principais características geométricas e magnéticas dos ímãs permanentes utilizados nos testes no HEV, Figura 7-2, Tabela 7-3 e Tabela 7-4.

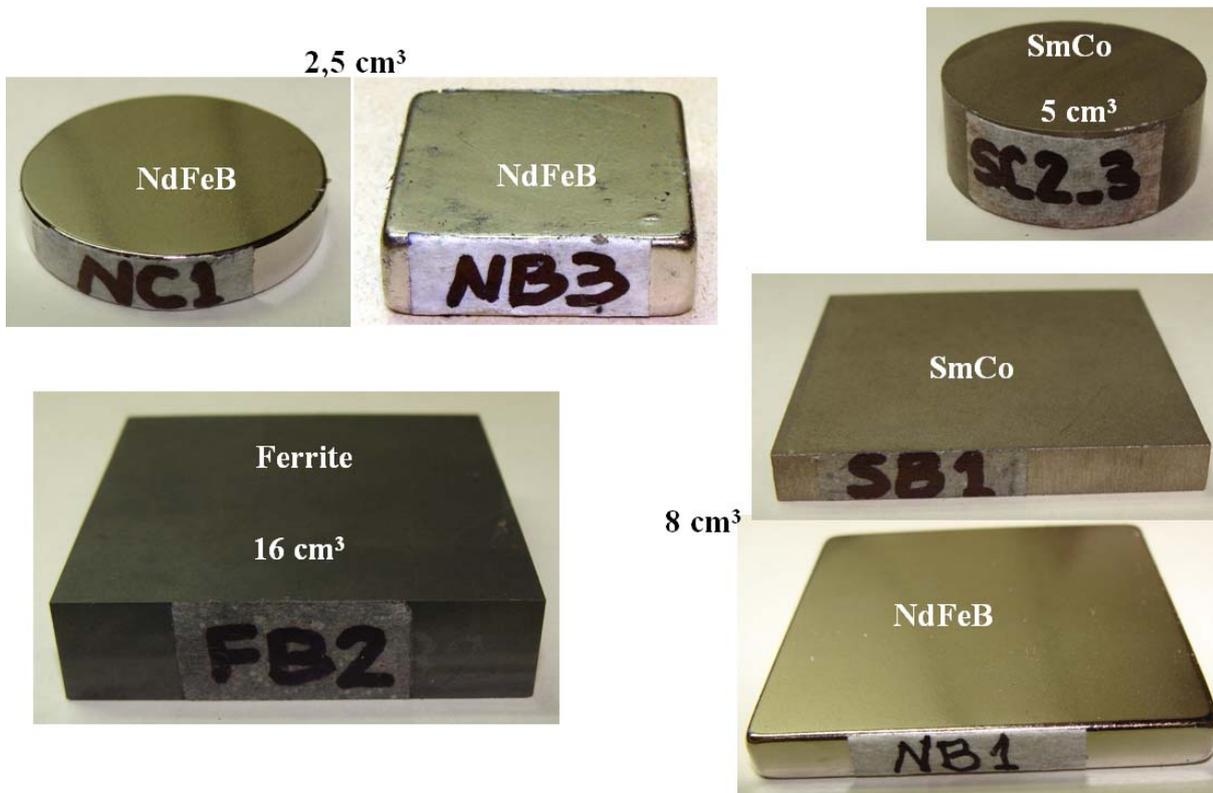


Figura 7-2. Ímãs permanentes usados nos testes.

Tabela 7-3. Ímãs permanentes usados nos testes, descrição física.

| Material | ID | Tipo | Dimensões área polar (mm) | Dimensão na di- reção de magne- tização (mm) | Volume (cm ³) |
|-------------------------|-----|------------|---------------------------------|--|------------------------------|
| Ferrite | FB2 | Bloco | 40×40 | 10 | 16 |
| | NB1 | Bloco | 40×40 | 5 | 8 |
| Neodímio- Ferro-Boro | NB3 | Bloco | 25,4×25,4 | 8 | 5,16 |
| | NC1 | Cilíndrico | φ 25,4 | 5 | 2,53 |
| Samário- Cobalto | SB1 | Bloco | 40×40 | 5 | 8 |
| | SC2 | Cilíndrico | φ 25,4 | 10 | 5,07 |

Tabela 7-4. Ímãs permanentes usados nos testes, descrição magnética.

| ID | $(BH)_{\max}$ (kJ/m ³) | B_r (T) | μ_r | H_c (kA/m) |
|-----|---------------------------------------|--------------|---------|-----------------|
| FB2 | 28,25 | 0,383 | 1,033 | 260,5 |
| NB1 | 283,6 | 1,216 | 1,038 | 929 |
| NB3 | 276,3 | 1,219 | 1,070 | 911 |
| NC1 | 295,2 | 1,257 | 1,065 | 934 |
| SB1 | 140,8 | 0,849 | 1,019 | 666 |
| SC2 | 176,8 | 0,955 | 1,027 | 741 |

Tanto os ímãs permanentes utilizados como amostras padrões como os utilizados para testar o HEV foram caracterizados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas da Universidade de São Paulo (IPT). As características do instrumento utilizado (Histerisímetro AMH-300 do Laboratório Eletrofísico Walker LDJ Scientific) como os dados de cada ímã são apresentados nos Anexos 1 e 2 respectivamente.

7.2 Instrumentos utilizados

Os instrumentos que foram utilizados nos diferentes testes com o HEV são apresentados pela tabela 7-5.

Tabela 7-5. Instrumentos utilizados nos testes com o HEV.

| Instrumento | Marca | Modelo | Serie |
|--------------------|-------------------------------|----------|---------|
| Fluxímetro | Magnetic Instrumentation Inc. | 916 | - |
| Gaussímetro | Hirst | GM05 | GM5055 |
| Paquímetro digital | Mitutoyo | CD-6"CS | 500-196 |
| Relógio comparador | Mitutoyo | ID-S112M | 543-691 |
| LVDT* | - | - | - |

* LVDT de fabricação local com circuito experimental em fase de teste.

Destes instrumentos, o gaussímetro GM05 tem rastreabilidade a uma calibração no IPT.

7.2.1 Especificações dos instrumentos utilizados

Dos manuais dos instrumentos e do relatório de calibração é possível obter as seguintes especificações:

Tabela 7-6. Especificações dos instrumentos utilizados nos testes com o HEV.

| Instrumento | Display (dígitos) | Exatidão | Outras |
|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|
| Fluxímetro 916 | 3½ | ±(0,25% de plena escala ± 1 dígito) | Velocidade de deriva do integrador: ±3 dígitos cada 15 seg. para +22°C < Ta < +28°C; 35% < Hr < 60% |
| Gaussímetro GM05 | 4 | ±0,25% (k = 2; @20°C) | Melhor que ±0,1% de leitura/°C |
| Paquímetro digital | 4 | ±0,02 mm | Resolução ±0,01 mm |
| Relógio comparador | 4 | ±0,003048 mm | Resolução ±0,001 mm |

7.3 Acessórios utilizados nos testes

Tabela 7-7. Aparatos e elementos acessórios usados nos testes com o HEV.

| Acessório | Descrição |
|---|--|
| Fonte de alimentação de CC | Marca Dawer modelo FCC-3020D. |
| Bobinas magnetizadoras | Duas, cada uma com 54 voltas (condutor de $\phi = 1,5$ mm) em cada braço central. |
| Bobina fluximétrica B2 | Cilíndrica com 7 voltas, ϕ médio de 33,455 mm. |
| Bobina fluximétrica B6 | Cilíndrica com 9 voltas, ϕ médio de 41,305 mm. |
| Bobina fluximétrica J2 | Quadrada com 5 voltas, l médio de 45,756 mm. |
| Mecanismo tri-axial com redução mecânica | Posicionamento da sonda em x, y, z de 3 mm por volta com 40 divisões (0,075 mm/div). |
| Mecanismo angular | Posicionamento da sonda com 5°/div. |

Sendo ϕ o diâmetro e l o comprimento.

7.4 Determinação das incertezas no posicionamento da sonda Hall

Havendo confirmado com vários ímãs e com diferentes polos que a forma da dependência da densidade de fluxo magnético com as variáveis espaciais é similar para todos eles (diferenças < 1%), determinou-se fazer as medições de sensibilidade com a amostra NB1 e, finalmente, normalizar sua resposta para poder aplicar esses resultados aos outros ímãs. Aos efeitos de determinar as respectivas sensibilidades, as medições feitas foram ajustadas com equações polinômicas que providenciaram um coeficiente de correlação adequado (>0,99) que permitisse desprezar a incerteza do próprio ajuste.

7.4.1 Sensibilidade da sonda Hall a variações em x e z

Considerando a simetria do ímã e do sistema de medição, resolveu-se adotar os mesmos resultados para os dois eixos. Na realização deste ensaio, é considerado que as outras variáveis mantêm-se constantes. Com entreferro de 1 mm, z e θ iguais a 0 e com $y = 0,5$ mm (altura de meia sonda encostada no ímã) é produzida a movimentação da sonda no eixo x num entorno reduzido de ± 6 mm com leitura do B_g . Traduzindo as medições para diferentes valores de x no entorno de medição numa aproximação de quarta ordem têm-se os pontos na Figura 7-3.

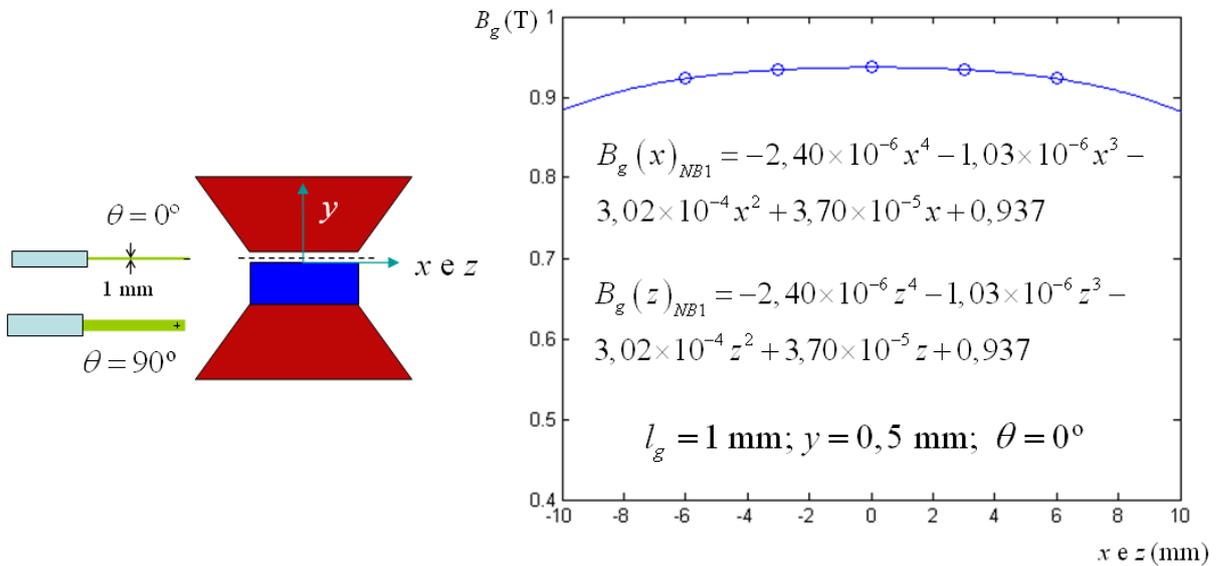


Figura 7-3. Sensibilidade da sonda Hall em x e z para o ímã NB1.

Para poder aplicar o coeficiente de sensibilidade a cada medição com diferente entreferro ou diferente ímã, as expressões devem ser normalizadas:

$$\frac{B_g(x)_{NB1}}{B_0} = -2,56 \times 10^{-6} x^4 - 1,10 \times 10^{-6} x^3 - 3,22 \times 10^{-4} x^2 + 3,95 \times 10^{-5} x + 1$$

$$\frac{B_g(z)_{NB1}}{B_0} = -2,56 \times 10^{-6} z^4 - 1,10 \times 10^{-6} z^3 - 3,22 \times 10^{-4} z^2 + 3,95 \times 10^{-5} z + 1$$
(7-1)

A dependência de B frente a variações de x ou z no entorno da medição será então:

$$\frac{c_x}{B_0} = \frac{1}{B_0} \frac{\partial B_g}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{c_z}{B_0} = \frac{1}{B_0} \frac{\partial B_g}{\partial z} \Big|_{z=0} = 3,95 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1}$$
(7-2)

7.4.2 Sensibilidade da sonda Hall à variação em y

Com abertura de 7 mm de entreferro, mantendo x , z e θ em zero efetuou-se medições de B_g ao longo de y como mostra o gráfico da Figura 7-4:

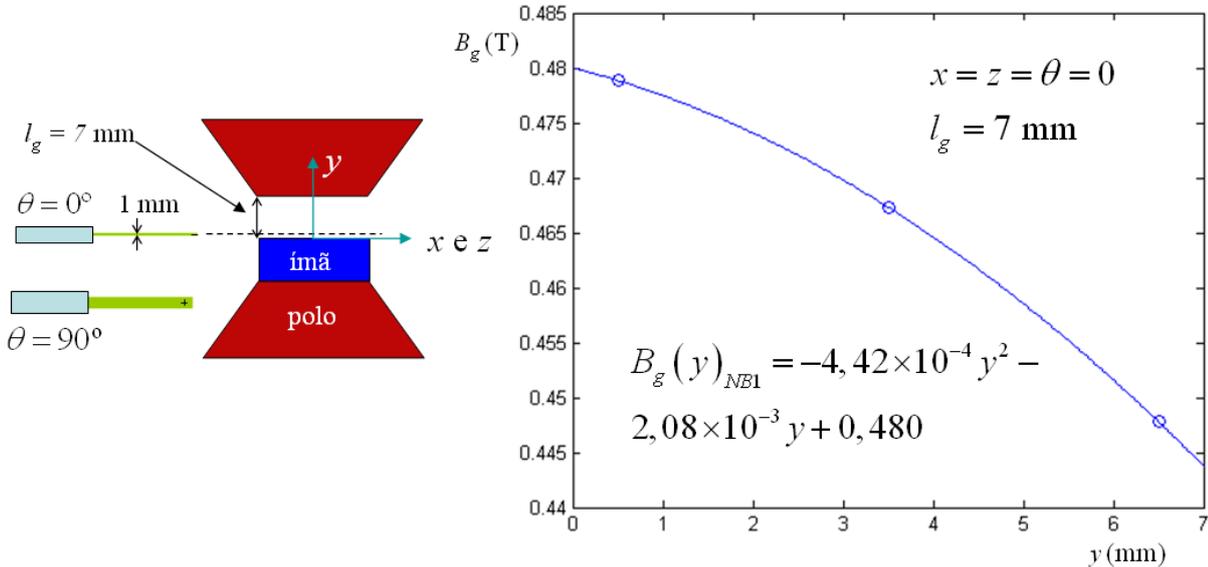


Figura 7-4. Sensibilidade da sonda Hall em y para o ímã NB1.

Obtida a aproximação quadrática é possível achar a normalização e a sensibilidade da densidade de fluxo magnético no eixo y :

$$\frac{B_g(y)}{B_0} = -9,21 \times 10^{-4} y^2 - 4,33 \times 10^{-3} y + 1,000 \quad (7-3)$$

A dependência de B frente a variações de y no entorno de medição será então:

$$\frac{c_y}{B_0} = \frac{1}{B_0} \frac{\partial B_g}{\partial y} \Big|_{y=0,5} = -5,25 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1} \quad (7-4)$$

7.4.3 Sensibilidade da sonda Hall ao ângulo θ

Com a mesma disposição de entreferro da medição anterior (7 mm) insere-se a sonda Hall transversal, Figura 7-5, à meia altura ($y = 3,5$ mm) para poder girá-la livremente no seu eixo axial. Foi possível conferir que para um ângulo reto ($\theta = 90^\circ$) a leitura é aproximadamente zero. Mantendo as outras variáveis constantes ($x = z = 0$ e $y = 3,5$ mm) obteve-se a curva de sensibilidade seguinte:

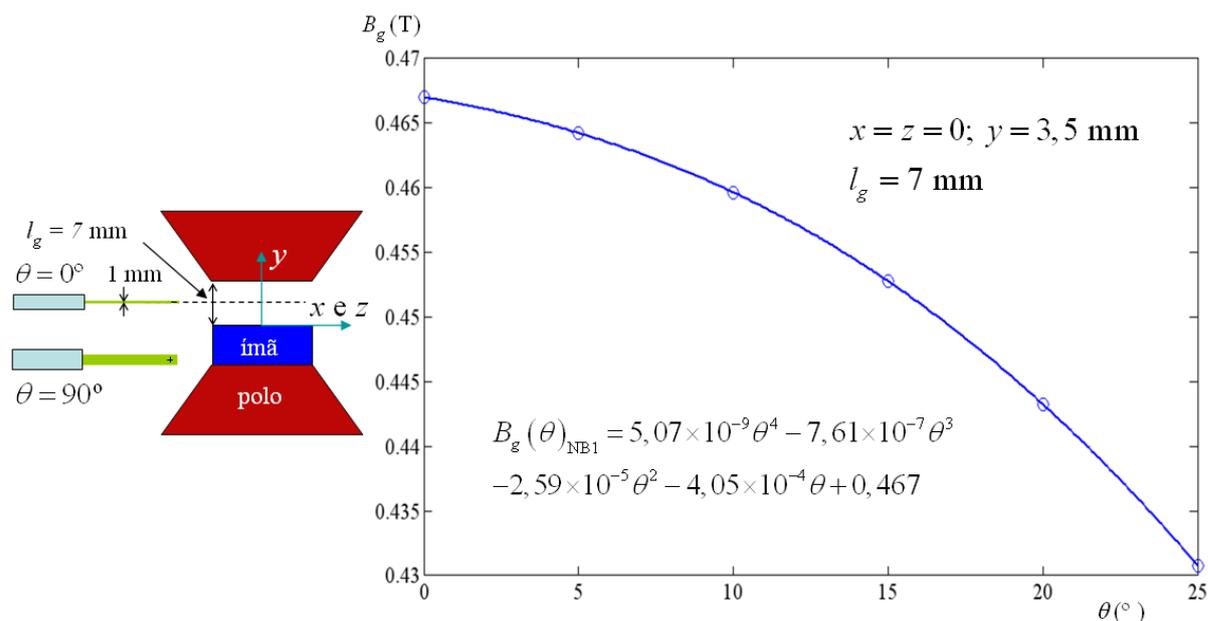


Figura 7-5. Sensibilidade da sonda Hall com mudanças em θ para o ímã NB1.

Obtida a aproximação de quarta ordem é possível achar a normalização e a sensibilidade da densidade de fluxo magnético com θ :

$$\frac{B_g(\theta)}{B_0} = 1,08 \times 10^{-8} \theta^4 - 1,63 \times 10^{-6} \theta^3 - 5,55 \times 10^{-5} \theta^2 - 8,67 \times 10^{-4} \theta + 1,000 \quad (7-5)$$

A dependência de B frente a variações de θ no entorno de medição será então:

$$\frac{c_\theta}{B_0} = \frac{1}{B_0} \left. \frac{\partial B_g}{\partial \theta} \right|_{\theta=0} = -8,67 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ^{-1} \quad (7-6)$$

No Apêndice 4 foram incorporadas a medição das dimensões de uma amostra com a determinação das incertezas e o cálculo da área polar, e, com idêntico procedimento, foram feitas as determinações das bobinas fluximétricas.

7.5 Normas pertinentes à caracterização de ímãs permanentes

As normas que se aplicam neste trabalho de caracterização de ímãs permanentes são a IEC 404 – 5 *Permanent magnet (magnetically hard) materials – Methods of measurements of magnetic properties* e a ASTM A977M – 07 *Standard Test Method for Magnetic Properties of High-Coercivity Permanent Magnet Materials Using Hysteresigraphs*.

Algumas considerações em relação ao tipo de amostras e questões dimensionais foram introduzidas no capítulo 2. Nesta instância serão considerados aspectos relacionados às medi-

ções magnéticas. As duas normas apresentam exatamente as mesmas condições; então, daqui em diante, somente serão aludidas como normas sem distinção.

As medições de densidade de fluxo magnético B e de intensidade de campo magnético H deverão ter um erro total de medição não maior do que $\pm 2\%$; isto, portanto, aplica-se aos parâmetros B_r e H_c .

O máximo produto energético $(BH)_{\max}$, sendo um parâmetro que depende dos anteriores, deverá ser obtido com um erro não superior a $\pm 3\%$. O parâmetro permeabilidade de retorno é obtido segundo as normas, informando o segmento da característica de desmagnetização utilizado e determinado segundo a expressão

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (7-7)$$

As normas não especificam o erro, mas atento ao critério adotado com o $(BH)_{\max}$, este trabalho considera que o erro não deve ser superior a $\pm 3\%$. Considerando que no relatório não se informa do valor da permeabilidade das amostras padrões disponíveis, neste trabalho será considerado o valor calculado no segmento determinado entre o B_r e o ponto de máximo produto energético (Ver parágrafo 4.5.2).

As condições ambientais indicadas nas normas e respeitadas em todos os ensaios referem-se unicamente à temperatura, a qual não deve ficar fora da faixa $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$. Não se faz referência à umidade nas referidas normas.

7.6 Calibração ou ajuste do HEV

Na linguagem das medições alguns termos estão sendo revisados e atualizados; o que antigamente era conhecido por aferição agora é calibração, o que antes significava calibração agora é ajuste, (VOCABULÁRIO INTERNACIONAL DE TERMOS GERAIS E FUNDAMENTAIS DE METROLOGIA VIM, 2007). O primeiro implica a comparação da leitura de um instrumento com um padrão, indicando num relatório as discrepâncias; e o segundo termo (ajuste) implica numa atuação sobre o *hardware* a fim de levar um instrumento a proporcionar leituras dentro de uma faixa conveniente, minimizando a tendência (*bias*). Como o HEV não tem ajuste por *hardware*, o processo implica em um ajuste por *software* equivalente a mudar de escalas num instrumento; neste caso, a escala depende do volume da amostra.

Descreve-se, agora, o procedimento de ajuste baseado em quatro amostras padrão. Para isto, tomando uma delas, a NC2, por exemplo, efetua-se o processo descrito em 4.6.1.1 de medição de densidade de fluxo magnético no entreferro com gaussímetro de efeito Hall, Figura 7-6.

abertura do entreferro

Medições em azul; cálculos em violeta

| lg(mm) | A1(T) | F1(T) | RA1(T) | RF1(T) | A1- RA1(T) | F1- RF1(T) | N | B _{g1} (T) | DP1(T) | DPM1(T) |
|--------|-------|-------|--------|--------|---------------|---------------|---|---------------------|----------|----------|
| 1,000 | 1,077 | 1,078 | 0,000 | 0,000 | 1,0770 | 1,0780 | 2 | 1,0775 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 1,200 | 1,052 | 1,054 | 0,000 | 0,000 | 1,0520 | 1,0540 | 2 | 1,0530 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 1,400 | 1,029 | 1,031 | 0,000 | 0,000 | 1,0290 | 1,0310 | 2 | 1,0300 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 1,600 | 1,007 | 1,009 | 0,000 | 0,000 | 1,0070 | 1,0090 | 2 | 1,0080 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 1,800 | 0,986 | 0,987 | 0,000 | 0,000 | 0,9860 | 0,9870 | 2 | 0,9865 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 2,000 | 0,965 | 0,966 | 0,000 | 0,000 | 0,9650 | 0,9660 | 2 | 0,9655 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 2,200 | 0,945 | 0,946 | 0,000 | 0,000 | 0,9450 | 0,9460 | 2 | 0,9455 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 2,400 | 0,926 | 0,927 | 0,000 | 0,000 | 0,9260 | 0,9270 | 2 | 0,9265 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 2,600 | 0,907 | 0,908 | 0,000 | 0,000 | 0,9070 | 0,9080 | 2 | 0,9075 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 2,800 | 0,890 | 0,891 | 0,000 | 0,000 | 0,8900 | 0,8910 | 2 | 0,8905 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 3,000 | 0,873 | 0,874 | 0,000 | 0,000 | 0,8730 | 0,8740 | 2 | 0,8735 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 3,200 | 0,856 | 0,858 | 0,000 | 0,000 | 0,8560 | 0,8580 | 2 | 0,8570 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 3,400 | 0,841 | 0,843 | 0,000 | 0,000 | 0,8410 | 0,8430 | 2 | 0,8420 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 3,600 | 0,826 | 0,828 | 0,000 | 0,000 | 0,8260 | 0,8280 | 2 | 0,8270 | 1,41E-03 | 1,00E-03 |
| 3,800 | 0,812 | 0,813 | 0,000 | 0,000 | 0,8120 | 0,8130 | 2 | 0,8125 | 7,07E-04 | 5,00E-04 |
| 4,000 | 0,798 | 0,798 | 0,000 | 0,000 | 0,7980 | 0,7980 | 2 | 0,7980 | 0,00E+00 | 0,00E+00 |

com ímã **sem ímã**

fechamento do entreferro

Figura 7-6. Medição de B_g e cálculos na posição 1 para NC2.

A1 e F1 são densidades de fluxo magnético medidas no entreferro com o ímã; RA1 e RF1 são as densidades de fluxo magnético sem o ímã. A1–RA1 e F1–RF1 são os resultados da diferença algébrica dos dados anteriores, dadas as condições assumidas *a priori* para a densidade de fluxo magnético no centro geométrico dos braços centrais como sendo co-lineares (considerando o circuito equivalente aproximado da Figura 4-5); N é o número de medições replicadas; B_{g1} é a média aritmética da abertura e do fechamento na posição 1. As últimas colunas correspondem ao tratamento estatístico dos dados: o desvio padrão e o desvio padrão da média (aspectos já tratados no capítulo 3).

Feito idêntico procedimento com o ímã virado (na posição 2), observa-se um comportamento semelhante ao observado na posição 1, e, devido ao fato de serem os desvios padrão da mesma ordem de magnitude, procede-se a obter os valores finais de densidade de fluxo para cada entreferro como média aritmética simples (não sendo necessária utilização da média ponderada).

Com os valores finais assim obtidos de l_g e B_g começa-se a análise de incertezas a fim de achar os pesos ou ponderações que possibilitarão o ajuste da curva que contemple todas as incertezas, ou seja, das medições, dos instrumentos e da extrapolação com o objetivo de estimar o valor de B_{re} com seu respectivo intervalo de confiança.

A medição de densidade de fluxo magnético num entreferro pode ser expressa da seguinte maneira:

$$B_g = \bar{B}_g + \delta\bar{B}_g + \delta B_{xyz\theta} + \delta B_{l_g} \quad (7-8)$$

\bar{B}_g é o valor estimado de B_g obtido como média aritmética de um número de medições repetidas e independentes (onde já foi considerado o efeito da remanência da culatra). $\delta\bar{B}_g$ é a correção devida a: deriva desde a última calibração (gaussímetro + sonda), especificações de exatidão em relação à faixa e à leitura (gaussímetro + sonda), mudanças de temperatura fora da faixa indicada pelo fabricante ou pela instituição responsável pela calibração (gaussímetro + sonda), mudanças de temperatura fora da faixa de medição do ímã pela instituição que o avaliou como padrão; arredondamento da leitura digital devido à resolução finita (gaussímetro).

$\delta B_{xyz\theta}$ é a correção devida ao posicionamento da sonda nos eixos x , y , z e no ângulo θ ; e δB_{l_g} é a correção devida ao posicionamento do braço central do HEV (este termo traduz a equivalência da incerteza no eixo da variável independente a uma incerteza na variável dependente) (TAYLOR, 1997).

Considerando uma distribuição Gaussiana nas medições, as variáveis como sendo estatisticamente independentes; e as avaliações como sendo não-correlacionadas, a incerteza combinada da densidade de fluxo magnético no entreferro pode ser calculada como:

$$\begin{aligned}
u_c^2(B_g) = & \left[\frac{\partial B_g}{\partial \bar{B}_g} \right]^2 u^2(\bar{B}_g) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial \delta \bar{B}} \right]^2 u^2(\delta \bar{B}) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial \delta B_{res}} \right]^2 u^2(\delta B_{res}) + \\
& \left[\frac{\partial B_g}{\partial x} \right]^2 u^2(x) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial y} \right]^2 u^2(y) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial z} \right]^2 u^2(z) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial \delta l_g} \right]^2 u^2(\delta l_g) + \\
& \left[\frac{\partial B_g}{\partial T} \right]^2 u^2(T) + \left[\frac{\partial B_g}{\partial \theta} \right]^2 u^2(\theta)
\end{aligned} \tag{7-9}$$

O termo $\left[\frac{\partial B_g}{\partial \bar{B}_g} \right]^2 u^2(\bar{B}_g)$ é a avaliação Tipo A (estatística) das medições de densidade de fluxo. Já $\left[\frac{\partial B_g}{\partial \delta \bar{B}} \right]^2 u^2(\delta \bar{B})$ é a avaliação Tipo B em relação à especificação do gaussímetro enquanto a sua exatidão.

$\left[\frac{\partial B}{\partial \delta B_{res}} \right]^2 u^2(\delta B_{res})$ é termo correspondente à incerteza do arredondamento do display do gaussímetro (avaliação Tipo B); os quatro seguintes correspondem a incertezas de posicionamento da sonda Hall (avaliação mista de Tipo A e Tipo B).

As duas últimas relacionadas à dependência com a temperatura e com o ângulo serão consideradas desprezíveis; a primeira porque as experiências foram realizadas num ambiente climatizado de temperatura e umidade respeitando as especificações das normas, dos instrumentos e das amostras; e no segundo, providenciando que a sonda encosta-se à amostra em cada caracterização.

Considerando os dados dos instrumentos (especificações), as sensibilidades determinadas nos parágrafos anteriores e a estatística dos dados medidos, é possível determinar a incerteza total $u_i = u_c(B_g)$ de cada entreferro medido e seu correspondente peso ou ponderação w_i .

$$w_i = \frac{1}{\frac{u_i^2}{u_y^2}} = \frac{u_y^2}{u_i^2} \tag{7-10}$$

onde $\frac{1}{u_i}$ é a ponderação individual e $\frac{1}{u_y}$ é a média das ponderações. Na Tabela 7-8 são apresentados esses dados, e na Figura 7-7 pode ser vista a composição das incertezas para a medição de densidade de fluxo magnético no entreferro.

Tabela 7-8. Dados das medições afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NC2).

| l_g (mm) | B_g (T) | u_i (T) | w_i |
|------------|-----------|-----------|----------|
| 1 | 1,0803 | 0,00149 | 0,968098 |
| 1,2 | 1,0550 | 0,00197 | 0,553969 |
| 1,4 | 1,0323 | 0,001747 | 0,704324 |
| 1,6 | 1,0100 | 0,001931 | 0,576824 |
| 1,8 | 0,9885 | 0,001469 | 0,996812 |
| 2 | 0,9675 | 0,001446 | 1,029024 |
| 2,2 | 0,9475 | 0,001424 | 1,060945 |
| 2,4 | 0,9280 | 0,001403 | 1,093257 |
| 2,6 | 0,9093 | 0,001631 | 0,808247 |
| 2,8 | 0,8920 | 0,001364 | 1,156253 |
| 3 | 0,8750 | 0,001346 | 1,187557 |
| 3,2 | 0,8583 | 0,001585 | 0,855561 |
| 3,4 | 0,8433 | 0,001572 | 0,869967 |
| 3,6 | 0,8283 | 0,001559 | 0,884562 |
| 3,8 | 0,8140 | 0,001282 | 1,308791 |
| 4 | 0,7995 | 0,001051 | 1,945808 |

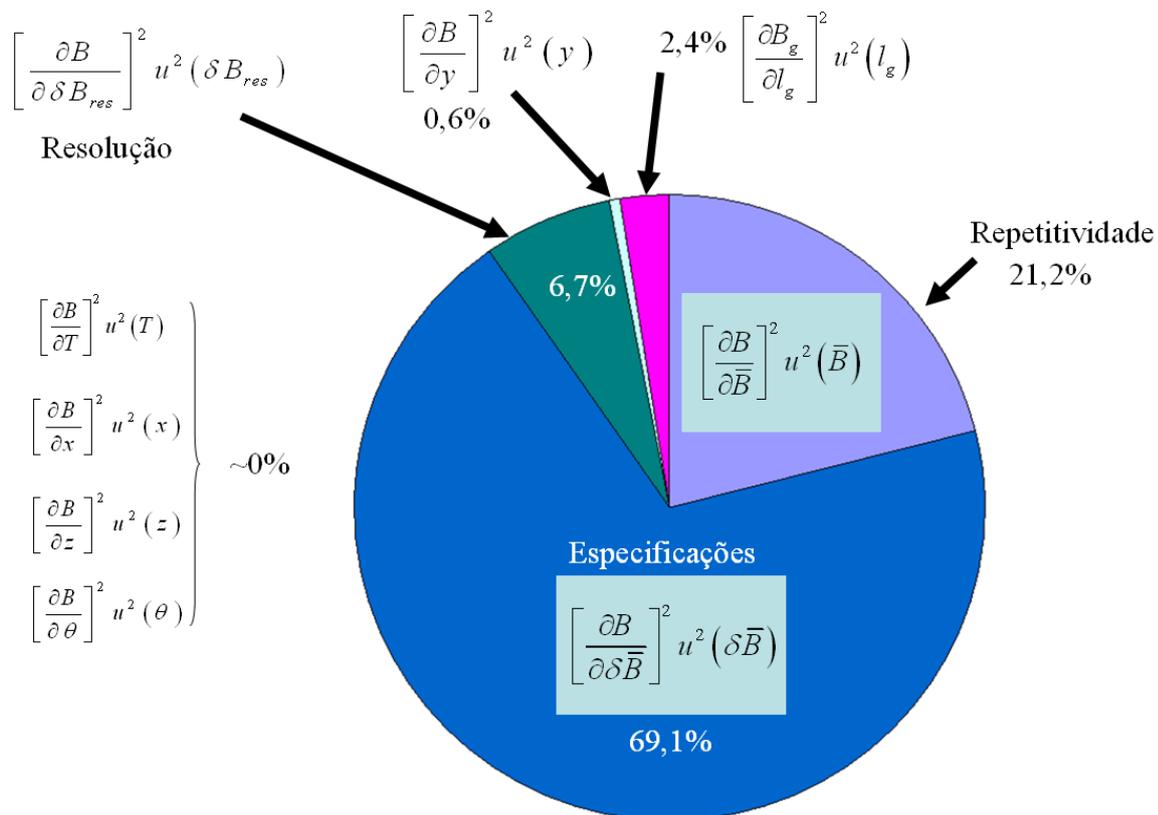


Figura 7-7. Distribuição percentual das incertezas da (7-9) na medição de B_g .

Adotando o ajuste de curva de tipo racional constante/linear:

$$B_g(l_g) = \frac{p_1}{l_g + q_1} \quad (7-11)$$

onde p_1 e q_1 são os coeficientes do ajuste. Desta expressão sabe-se que:

$$\lim_{l_g \rightarrow 0} B_g(l_g) = \frac{p_1}{q_1} = B_{re} \quad \text{e} \quad \lim_{l_g \rightarrow \infty} B_g(l_g) = 0 \quad (7-12)$$

Portanto, o modelo de ajuste de curva será inicialmente $\hat{y} = \frac{p_1}{q_1 + x}$, indicando com \hat{y} o

valor estimado da variável dependente, neste caso a densidade de fluxo no entreferro. Aplicando a ferramenta Solver do Excel e mínimos quadrados aos dados da Tabela 7-8, é possível determinar que para o NC2 os parâmetros são $p_1 = 9,21907$ e $q_1 = 7,532441$ (resultados comprovados no Matlab). Assim, a extrapolação para $l_g = 0$ proporcionada pelo valor $p_1/q_1 = 1,224$ T indica que a curva está produzindo um valor com discrepância negativa (menor que o V.V.C.). Este valor de densidade de fluxo magnético abaixo do verdadeiro valor convencional é devido aos entreferros indesejáveis que devem ser compensados com uma correção ou ajuste. Para transformar os efeitos destes entreferros indesejáveis em um fator equivalente é preciso conhecer o valor padrão do B_r que é 1,278 T (ver Tabela 7-2) e para esse valor o deslocamento da curva deveria ser

$$\Delta x = \frac{p_1}{y_v} - q_1 \Rightarrow \Delta l_g = \frac{p_1}{B_r} - q_1 \quad (7-13)$$

Sua correspondente variância

$$u_c^2(\Delta l_g) = \left[\frac{\partial \Delta l_g}{\partial B_r} \right]^2 u^2(B_r) + \left[\frac{\partial \Delta l_g}{\partial p_1} \right]^2 u^2(p_1) + \left[\frac{\partial \Delta l_g}{\partial q_1} \right]^2 u^2(q_1) \quad (7-14)$$

O Δl_g que proporcionaria o mesmo valor que o V.V.C. segundo a (7-13) é de 0,318772 mm. Os detalhes da aplicação do Solver em mínimos quadrados são apresentados no Apêndice 5. Em virtude da necessidade de dispor de uma ferramenta de caracterização de ímãs permanentes para diferentes tipos e formas de ímãs, a proposta é procurar um ajuste que permita determinar os parâmetros da maior quantidade de amostras com erro dentro das especifica-

ções das normas. Para isto é que este trabalho utilizou quatro amostras para determinar este ajuste do HEV.

Fazendo idêntico procedimento para as outras três amostras é possível determinar dois valores de Δl_g que poderiam permitir caracterizar um maior número de amostras de diferentes tipos e geometrias. A classificação delas deverá ser feito em função do volume da amostra, conforme indicado na Tabela 7-9.

Tabela 7-9. Correção do entreferro para as diferentes amostras.

| Δl_g (mm) | Ímãs permanentes - Volume | Amostras testadas |
|-------------------|---|-------------------|
| 0,46 | NdFeB e SmCo de até 6 cm ³ | NB3; NC1; SC2 |
| 0,79 | NdFeB e SmCo de 8 a 16 cm ³ Ferrite de 16 cm ³ | NB1; SB1 FB2 |

A correspondente incerteza de Δl_g , segundo a (7-14), depende das incertezas dos coeficientes de ajuste e do B_r da amostra padrão considerada. A incerteza final da densidade de fluxo magnético remanente determinado com o HEV dependerá do valor da incerteza do ajuste (Intervalo de Confiança) e da incerteza do Δl_g .

Com os dados das incertezas dos instrumentos, coeficientes de sensibilidade e ajustes em função do volume carregados no *software*, é possível testar amostras, ingressando seus dados dimensionais e as correspondentes medições de densidade de fluxo magnético para obter o respectivo B_{re} . No capítulo 8 serão apresentados os resultados das medições das amostras indicadas na Tabela 7-9 tanto no que corresponde à determinação de B_{re} como μ_{re} (que não requer ajustes). Com esses dois parâmetros serão determinados a intensidade do campo magnético coercitivo H_c e o máximo produto energético $(BH)_{max}$.

8 CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS COM HEV

Considerando o número de amostras, será descrito em detalhe o procedimento de caracterização para uma das amostras de teste. Para as demais somente serão apresentados os resultados finais.

8.1 Determinação do parâmetro B_{re}

O procedimento utilizado no HEV para determinar a densidade de fluxo remanente de um ímã permanente baseia-se na medição de B num entreferro variável como mostrado no capítulo 7. A medição de densidade de fluxo magnético com gaussímetro de efeito Hall numa das amostras de teste (NB1) é a seguinte:

| lg mm | abertura do entreferro | | | | Medições em azul; cálculos em violeta | | | | | | |
|----------|------------------------|---------|----------|----------|---------------------------------------|-------------|---|----------|-------------|--------------|--|
| | A1 T | F1 T | RA1 T | RF1 T | A1-RA1 T | F1-RF1 T | N | Bg1 T | DesPad T | DPMédia T | |
| 1,000 | 0,898 | 0,900 | 0,008 | 0,008 | 0,8900 | 0,8920 | 2 | 0,8910 | 1,41E-03 | 1,00E-03 | |
| 1,200 | 0,871 | 0,872 | 0,008 | 0,008 | 0,8630 | 0,8640 | 2 | 0,8635 | 7,07E-04 | 5,00E-04 | |
| 1,400 | 0,847 | 0,847 | 0,008 | 0,008 | 0,8390 | 0,8390 | 2 | 0,8390 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 1,600 | 0,823 | 0,824 | 0,008 | 0,008 | 0,8150 | 0,8160 | 2 | 0,8155 | 7,07E-04 | 5,00E-04 | |
| 1,800 | 0,802 | 0,802 | 0,008 | 0,008 | 0,7940 | 0,7940 | 2 | 0,7940 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 2,000 | 0,781 | 0,781 | 0,008 | 0,008 | 0,7730 | 0,7730 | 2 | 0,7730 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 2,200 | 0,761 | 0,761 | 0,008 | 0,008 | 0,7530 | 0,7530 | 2 | 0,7530 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 2,400 | 0,742 | 0,741 | 0,008 | 0,008 | 0,7340 | 0,7330 | 2 | 0,7335 | 7,07E-04 | 5,00E-04 | |
| 2,600 | 0,723 | 0,723 | 0,007 | 0,007 | 0,7160 | 0,7160 | 2 | 0,7160 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 2,800 | 0,707 | 0,706 | 0,007 | 0,007 | 0,7000 | 0,6990 | 2 | 0,6995 | 7,07E-04 | 5,00E-04 | |
| 3,000 | 0,690 | 0,690 | 0,007 | 0,007 | 0,6830 | 0,6830 | 2 | 0,6830 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 3,200 | 0,674 | 0,674 | 0,007 | 0,007 | 0,6670 | 0,6670 | 2 | 0,6670 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 3,400 | 0,658 | 0,658 | 0,007 | 0,007 | 0,6510 | 0,6510 | 2 | 0,6510 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 3,600 | 0,644 | 0,644 | 0,007 | 0,007 | 0,6370 | 0,6370 | 2 | 0,6370 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 3,800 | 0,631 | 0,631 | 0,007 | 0,007 | 0,6240 | 0,6240 | 2 | 0,6240 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |
| 4,000 | 0,617 | 0,617 | 0,007 | 0,007 | 0,6100 | 0,6100 | 2 | 0,6100 | 0,00E+00 | 0,00E+00 | |

Figura 8-1. Dados de medição e cálculo na posição 1 na determinação de B_{re} .

O significado das colunas é o mesmo dado no parágrafo 7.6 de ajuste do HEV.

Feito idêntico procedimento com o ímã virado (na posição 2), observa-se um comportamento semelhante ao observado na posição 1, e devido ao fato de serem os desvios padrão da mesma ordem de magnitude, procede-se a obter os valores finais de densidade de fluxo para cada entreferro como média aritmética simples (não sendo necessária utilização da média ponderada), Tabela 8-1.

Tabela 8-1. Dados das medições afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NB1).

| l_g (mm) | B_g (T) |
|------------|-----------|
| 1,000 | 0,8970 |
| 1,200 | 0,8698 |
| 1,400 | 0,8448 |
| 1,600 | 0,8213 |
| 1,800 | 0,7995 |
| 2,000 | 0,7780 |
| 2,200 | 0,7580 |
| 2,400 | 0,7383 |
| 2,600 | 0,7200 |
| 2,800 | 0,7033 |
| 3,000 | 0,6865 |
| 3,200 | 0,6705 |
| 3,400 | 0,6550 |
| 3,600 | 0,6405 |
| 3,800 | 0,6270 |
| 4,000 | 0,6135 |

Com os valores finais assim obtidos de l_g e B_g começa-se a análise de incertezas a fim de achar os pesos ou ponderações que possibilitarão a correção de l_g com o Δl_g adequado e o ajuste ponderado da curva que contemple todas as incertezas, ou seja, das medições, dos instrumentos e da extrapolação com o objetivo de estimar o valor de B_{re} com seu respectivo intervalo de confiança de 95%.

Havendo ingressado os dados dimensionais da amostra no software, este determina que seu volume é de 8 cm^3 , portanto, conforme a Tabela 7.9, corresponde aplicar uma correção na Tabela 8-1 de 0,79 mm. A nova Tabela 8-2 está agora em condições de ser usada no novo processo de ajuste ponderado de curva para a correspondente determinação da densidade de fluxo magnético remanente B_{re} .

Dada a especial importância e a complexidade do processo de extrapolação requerido para obter o parâmetro B_{re} , se faz necessário explicar o modelo adotado neste trabalho.

Tabela 8-2. Dados das medições corrigidos e afetados pelo cálculo das incertezas (ímã NB1).

| l_g (mm) | B_g (T) | u_c (T) | w_i |
|------------|-----------|-----------|----------|
| 1,79 | 0,8970 | 0,001849 | 0,302421 |
| 1,99 | 0,8698 | 0,001606 | 0,399611 |
| 2,19 | 0,8448 | 0,001227 | 0,681222 |
| 2,39 | 0,8213 | 0,001199 | 0,714011 |
| 2,59 | 0,7995 | 0,001061 | 0,908919 |
| 2,79 | 0,7780 | 0,001034 | 0,958874 |
| 2,99 | 0,7580 | 0,001009 | 1,008848 |
| 3,19 | 0,7383 | 0,001104 | 0,845997 |
| 3,39 | 0,7200 | 0,000961 | 1,113759 |
| 3,59 | 0,7033 | 0,001065 | 0,910426 |
| 3,79 | 0,6865 | 0,00092 | 1,219256 |
| 3,99 | 0,6705 | 0,0009 | 1,274381 |
| 4,19 | 0,6550 | 0,000882 | 1,33104 |
| 4,39 | 0,6405 | 0,000864 | 1,387309 |
| 4,59 | 0,6270 | 0,000848 | 1,442771 |
| 4,79 | 0,6135 | 0,000831 | 1,501156 |

8.1.1 Determinação do B_{re} por extrapolação

A modelagem de um processo é uma descrição concisa da variação de uma quantidade y devida a uma componente determinística dada por uma função matemática de um ou mais quantidades x_1, x_2, \dots, x_n mais uma componente aleatória que obedece a uma distribuição de probabilidade particular. Os modelos de processos são usados principalmente para: estimação, predição, calibração e otimização (NIST, 2011).

O objetivo da estimação é determinar o valor da função regressão (a média dos valores da variável de resposta) para uma combinação particular dos valores de entrada. Os valores de uma função de regressão podem ser estimados para qualquer combinação de entrada, incluindo valores para os quais não se tem medições. Um valor da função estimado dentro da faixa de valores medidos é denominado interpolação. Estimação da função regressão para um ponto fora da faixa de medição é denominada extrapolação e, em geral requer mais atenção e cuidado (NIST, 2011; MANDEL, 1964).

Na Figura 8-2 podem ser observados dados das medições corrigidas de três amostras com seus respectivos valores de densidade de fluxo remanente padrão. Segundo os autores antes mencionados, esta é uma das poucas, senão a única, situação em que se pode aplicar extrapolação com certa confiança de obter resultados confiáveis:

1. Existe um ponto de referência conhecido (o valor verdadeiro convencional V.V.C.) relatado pelo IPT em $x = 0$ (Anexo 2).

2. Existe um conjunto de dados experimentais numa faixa $a < x < b$.
3. A faixa entre a e b é da ordem (preferencialmente maior) da distância entre $x = 0$ e $x = a$.

A estas condições devem-se acrescentar os pontos específicos deste trabalho que reforçam a confiança na extrapolação atual:

4. O modelo usado especialmente apropriado para extrapolação.
5. Os pontos com parâmetros de qualidade de ajuste ótimos.
6. E um último fator de peso fundamental: Como o trabalho é em relação ao desenvolvimento de um método de caracterização, o que interessa é obter valores em $x = 0$ dentro do estabelecido pelas normas, não importando muito o que acontece entre $x = 0$ e $x = a$.

O próximo passo consiste em determinar qual dos modelos de ajuste consegue correlacionar esses pontos com aquele considerado padrão cumprindo as premissas do presente trabalho e superando a Qualidade do Ajuste (“Goodness of Fitting”).

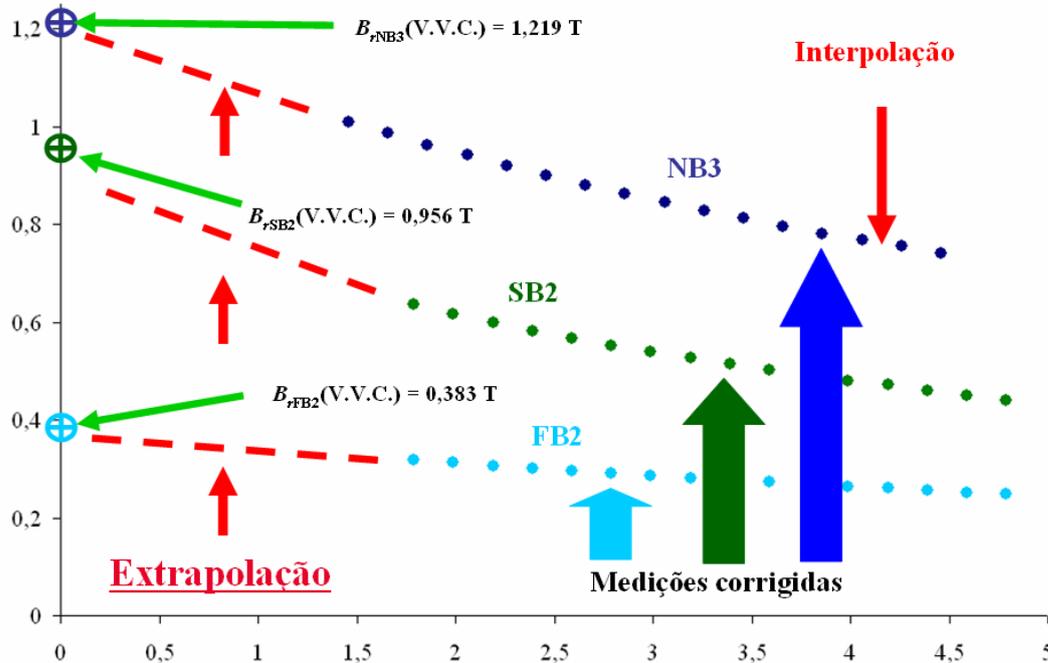


Figura 8-2. Medições corrigidas de três amostras, os valores V.V.C. e a necessidade de extrapolação para determinar a densidade de fluxo magnético remanente estimado B_{re} .

Para escolher um dos modelos de ajuste existentes será necessário atender as seguintes questões também:

1. Obter um valor de B_{re} que esteja compreendido dentro da faixa exigida pelas normas.

2. Informar um Intervalo de Confiança ao redor deste B_{re} que esteja de acordo com as normas.
3. Cumprir com os mínimos requerimentos de Qualidade do Ajuste.

Quando se fala em Qualidade do Ajuste, isso geralmente implica uma série de considerações, mais difíceis de ser atendidas todas em conjunto, muitas vezes polêmicas, e que, geralmente, é impossível de revelar como informação num único parâmetro. Existem dois passos que devem ser dados para avaliar a qualidade do ajuste, um de tipo visual e outro mais estatístico.

Em geral, o método gráfico é mais apropriado que o numérico devido ao fato que permite ver o panorama completo e manifestar num gráfico só a relação entre os dados medidos e o ajuste. No entanto, os valores numéricos focam a análise num determinado aspecto particular, comprimindo todo num número que tenta expressar a qualidade ou não do modelo. Na prática, dependendo de cada caso particular e dos requerimentos de análise, será necessário utilizar ambos os tipos para determinar o melhor modelo (NIST, 2011). Definições, gráficos e parâmetros destas análises são:

Resíduos (avaliação num gráfico) - Os resíduos de um modelo ajustado são definidos como as diferenças entre as medições (variável independente y ou resposta) e o ajuste para cada valor da variável independente (ou indicador \hat{y}),

$$r = y - \hat{y} \quad (8-1)$$

Supondo que o modelo escolhido é adequado, os resíduos produzem aproximadamente os erros aleatórios. Portanto, se no gráfico os resíduos aparentam comportamento randômico, é indício de que o modelo permite ajustar os dados adequadamente. No entanto, se os resíduos apresentam um padrão sistemático, é um claro sinal de que o modelo produz um ajuste inadequado (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

Soma do erro quadrático - Esta quantidade estatística indica o desvio total dos valores da resposta do ajuste. Também é chamada soma quadrática dos resíduos SSE . Um valor perto de zero indica que o modelo tem uma componente randômica de erro pequena, e que o ajuste será mais útil para predição.

$$SSE = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (8-2)$$

Usualmente, é considerado o caso em que os dados de saída (resposta y) são todos obtidos com a mesma qualidade (variância constante); como consequência, os pesos w_i são iguais a 1. No presente trabalho em que cada ponto tem uma incerteza diferente deverá ser usada regressão de mínimos quadrados ponderada.

R^2 - Este parâmetro estatístico indica quanto sucesso teve o ajuste em explicar a variação dos dados na faixa considerada. Consiste, matematicamente, no quadrado da correlação entre os valores de resposta e os valores de resposta preditos. Também é chamado quadrado do coeficiente da múltipla correlação ou coeficiente de múltipla determinação. É definido como relação da soma dos quadrados da regressão SSR e a soma total dos quadrados SST , onde SSR é

$$SSR = \sum_{i=1}^n w_i (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (8-3)$$

SST também é chamado soma dos quadrados ao redor da média:

$$SST = \sum_{i=1}^n w_i (y_i - \bar{y})^2 \quad (8-4)$$

onde $SST = SSR + SSE$. Com essas definições, o R^2 fica definido como

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (8-5)$$

O R^2 pode adotar valores entre 0 e 1; um valor perto de 1 indica que uma grande proporção da variação é considerada pelo modelo. Um R^2 de 0,8 significa que o ajuste explica 80% da variação total dos dados ao redor da média. Incrementando a complexidade do modelo, pode-se incrementar o R^2 , embora o ajuste não melhore no sentido prático. Para evitar esta situação é melhor usar a estatística dos graus de liberdade e o R^2 ajustado. No caso que o R^2 reporte um valor negativo, será necessário adicionar um termo constante ao modelo (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

Graus de liberdade residual - R^2 ajustado - Esta estatística usa o R^2 calculado no parágrafo anterior e ajustado baseado nos graus de liberdade residuais. Os graus de liberdade residuais são definidos como o número de valores da resposta n menos o número de coeficientes ajustados m estimados dos valores de resposta: $\nu = n - m$, onde ν (também indicado como **DF**) indica o número independente de peças de informação (coeficientes) envolvendo os n dados que são requeridos para calcular a soma dos quadrados.

$$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{SSE(n-1)}{SST(v)} \quad (8-6)$$

Pode-se adotar qualquer valor menor ou igual a 1, com o mesmo significado que o R^2 . Valores negativos podem indicar que o modelo contém termos que não são necessários para prever a resposta (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

Raiz do erro médio quadrático - Esta estatística é também conhecida como o erro padrão de ajuste ou erro padrão da regressão. É uma estimativa do desvio padrão da componente randômica dos dados, definida como

$$RMSE = s = \sqrt{MSE} \quad (8-7)$$

onde MSE é o erro quadrático médio ou média quadrática residual:

$$MSE = \frac{SSE}{v} \quad (8-8)$$

Como o SSE , um MSE perto de 0 indica um ajuste que é mais útil para predição (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

Limites de confiança e predição – Intervalo de Confiança IC - Uma parte importante da estimativa é a avaliação de quanto um valor estimado pode flutuar. Sem essa informação não existe base de comparação com outra estimativa. O intervalo de confiança proporciona uma faixa de valores possíveis da média da variável estudada. Os limites de confiança e predição definem o valor inferior e superior que estão associados a um intervalo, e definem a largura do mesmo. A largura do intervalo indica quão incerta é a determinação do coeficiente ajustado, a observação predita, ou o ajuste predito. Os limites ficam definidos com um nível de incerteza especificado *a priori* (usualmente de 95%) (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

Cálculo e visualização dos limites de confiança - Os limites de confiança para coeficientes ajustados estão dados por

$$CI = b \pm t\sqrt{S} \quad (8-9)$$

onde b é coeficiente produzido pelo ajuste, t depende do nível de confiança e é computado usando a inversa da função distribuição cumulativa de Student, e S é um vetor dos elementos diagonais da matriz de covariância estimada dos coeficientes $(X^T X)^{-1} s^2$. Em um ajuste não

linear, X é o Jacobiano dos valores ajustados com respeito aos coeficientes, X^T é a transposta de X e s^2 é o erro médio quadrático (Curve Fitting Toolbox MATHWORKS, 2004).

No decorrer do presente trabalho, foram testados diferentes modelos de ajuste: polinômicos, exponenciais, racionais e de potência. Na avaliação destes modelos foram encontrados os seguintes aspectos:

1. Sem aplicação de restrições (cruzamento pelo valor V.V.C. no eixo y) todos os modelos apresentaram valores R^2 perto de 1, implicando uma grande proporção de explicação da variabilidade dos dados dentro da faixa de dados (interpolação ótima).
2. Instabilidades e oscilações na extrapolação nas aproximações polinômicas, consequentemente elevados valores de Intervalo de Confiança, Figura 8-3.
3. Os modelos não lineares apresentam excelente estabilidade na extrapolação, não apresentam oscilações e conseguem modelar sistemas complexos com funções de baixo grau e com menor quantidade de coeficientes.

O melhor resultado obtido no ajuste foi com função racional. A seguir, apresenta-se uma breve explicação sobre esta escolha.

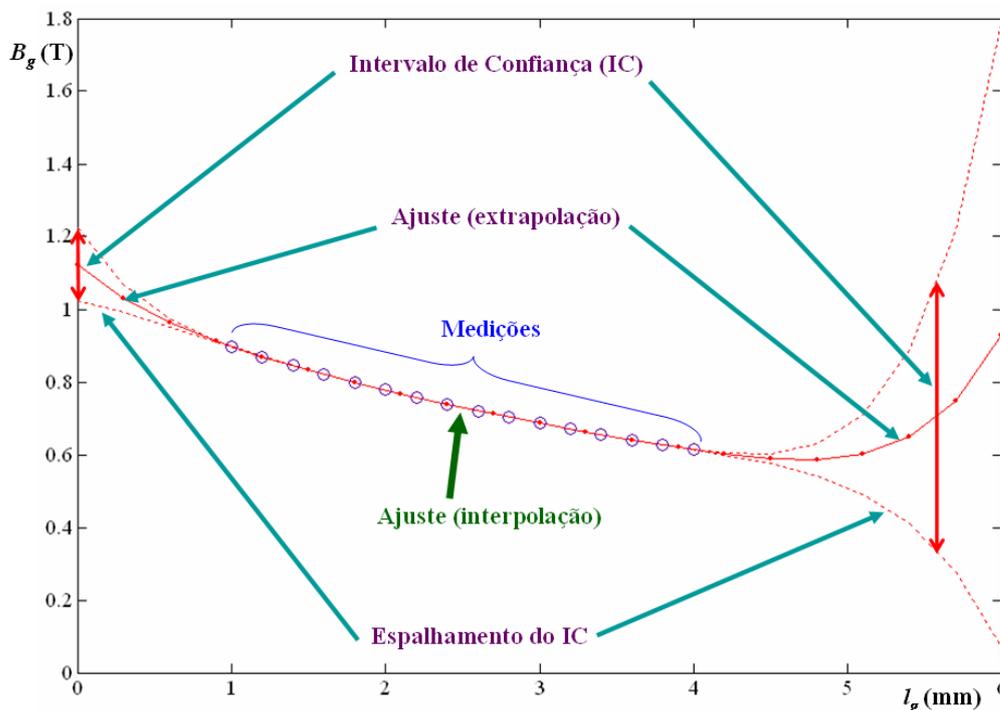


Figura 8-3. Tentativa de ajuste polinômico. Instabilidade para valores fora do intervalo, excessivo IC.

Uma função racional é simplesmente a relação ou quociente entre dois polinômios ou funções polinomiais:

$$y = \frac{p_{n+1}x^n + p_nx^{n-1} + \dots + p_3x^2 + p_2x + p_1}{q_{m+1}x^m + q_mx^{m-1} + \dots + q_3x^2 + q_2x + q_1} \quad (8-10)$$

com n denotando um inteiro não negativo que define o grau do numerador e m denotando um inteiro não negativo que define o grau do denominador. As funções racionais são tipicamente identificadas pelo grau do numerador e do denominador. Assim, uma função quadrática no numerador e uma cúbica no denominador seria identificada como função racional quadrática/cúbica.

Um modelo de função racional é uma generalização do modelo polinômico. Os modelos de função racional contêm modelos polinômicos como subsistema (a função do denominador é uma constante). O ajuste mediante modelos de funções racionais também é conhecido como aproximação Padé (NIST, 2011).

Os modelos de funções racionais têm as seguintes vantagens:

1. Têm uma forma relativamente simples.
2. Podem adotar uma ampla gama de formas, acomodando uma maior faixa de formas que as polinômicas.
3. Têm melhores propriedades de interpolação que os modelos polinomiais. Os racionais são tipicamente mais suaves e menos oscilantes.
4. Têm excelente poder de extrapolação. Elas podem ser acondicionadas para modelar não somente no domínio dos dados, mas num entorno que seja conhecido teoricamente de comportamento assintótico fora do domínio de interesse.
5. Têm excelentes propriedades assintóticas.
6. Sistemas complicados podem ser modelados com funções de baixo grau tanto no numerador como no denominador. O que por sua vez significa que é requerido menor número de coeficientes comparado ao modelo polinomial.
7. São relativamente simples de resolver computacionalmente. Embora sejam modelos não lineares, são modelos particularmente fáceis de ajustar.

Desvantagens:

1. As propriedades das famílias de funções racionais não são tão bem conhecidas quanto as polinômicas.
2. A bibliografia ainda é limitada.

3. Funções racionais não limitadas podem, em ocasiões, resultar em perturbações assintóticas (verticalmente) devido às raízes do denominador.

Uma dificuldade comum em ajuste com modelos não lineares é achar os valores adequados iniciais. Uma vantagem importante dos modelos com funções racionais é a possibilidade de começar o cálculo com um ajuste linear de mínimos quadrados. Esta técnica será mostrada para uma das amostras testadas usando a ferramenta Solver do Excel no Apêndice 5.

Após as considerações antes mencionadas, e considerando intuitivamente a não linearidade da força existente entre um material ferromagnético e um ímã permanente nas proximidades do circuito magnético é que este trabalho adotou o modelo de ajuste não linear racional constante/linear:

$$B_g = \frac{P_1}{x + q_1} = \frac{P_1}{l_g + q_1} \quad (8-11)$$

Com este ajuste o valor de B_{re} é determinado como:

$$B_{re} = \lim_{l_g \rightarrow 0} B_g = \frac{P_1}{q_1} \quad (8-12)$$

Na determinação da incerteza expandida do parâmetro B_{re} participam os seguintes fatores previamente considerados: a) incertezas da medição de densidade de fluxo no entreferro, tanto na avaliação Tipo A estatística, como Tipo B nas especificações dos instrumentos; b) incerteza do ajuste ponderado da curva com os pontos corrigidos (Intervalo de Confiança que na ferramenta utilizada é para 95% de nível da confiança); c) incerteza da correção do HEV com ímãs padrões considerando as incertezas dos coeficientes de ajuste e do Valor Verdadeiro Convencional do B_r . Após simplificação dos termos, considerando distribuição normal baseada em observações independentes não correlacionadas este trabalho adota como incerteza final da densidade de fluxo remanente estimado:

$$u^2(B_{re}) = u^2(B_{g0}) + u^2(B_{rvvc}) \quad (8-13)$$

onde o primeiro termo é o valor proveniente do ajuste ponderado (Intervalo de Confiança) e o segundo é a variância da amostra padrão (considerando o pior caso dos quatro ímãs).

Considerando, então, a correção e o tipo de ajuste escolhido, inserindo os dados da Tabela 8-2 na ferramenta de ajuste obteve-se para o ímã NB1 a determinação do B_{re} e seu respectivo intervalo de confiança como mostra a Figura 8-4.

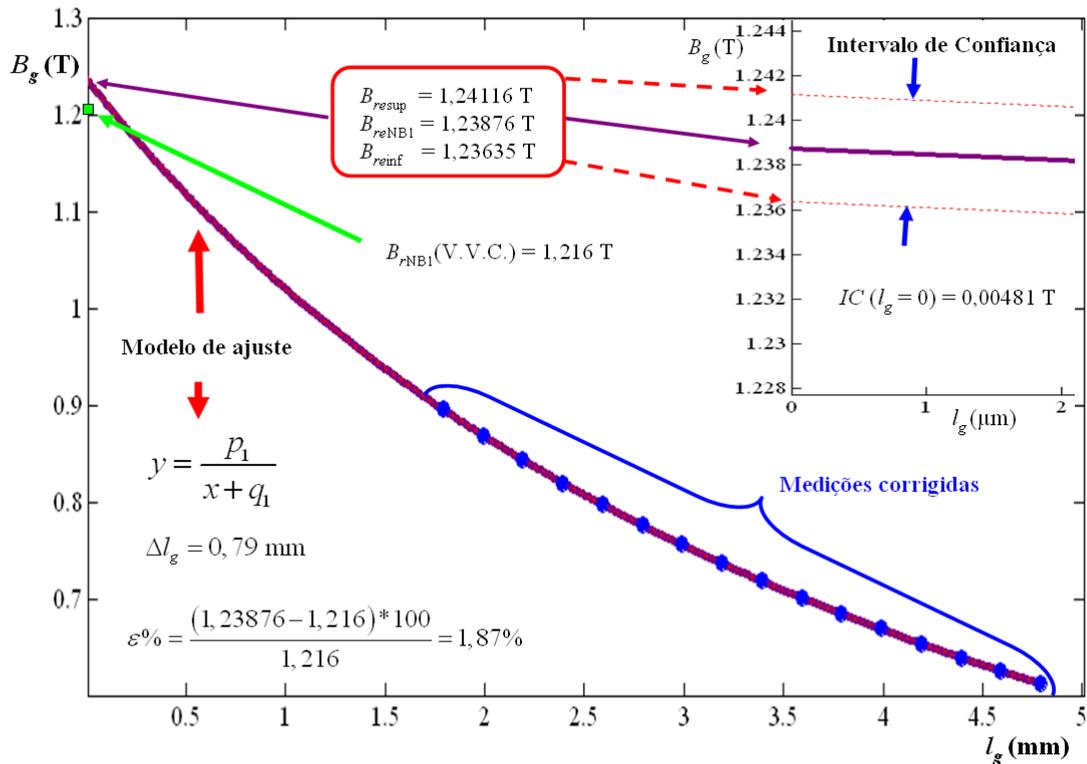


Figura 8-4. Ajuste não linear para o ímã NB1 na determinação do B_{re} .

A correspondente análise da Qualidade do Ajuste é apresentada na Figura 8-5:

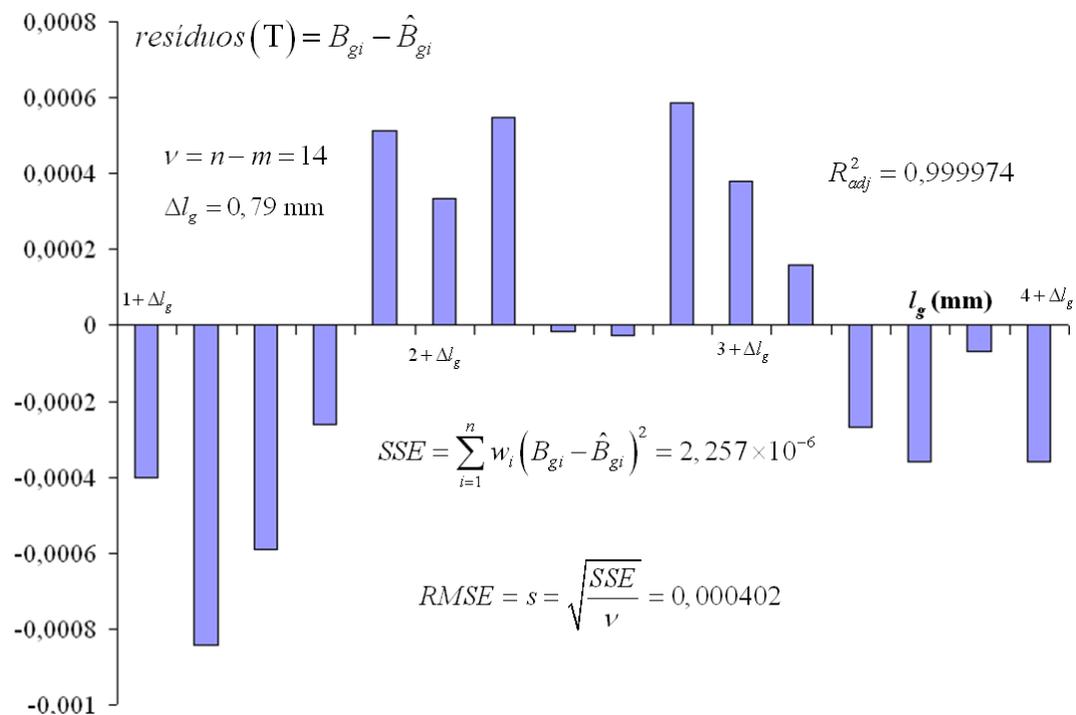


Figura 8-5. Qualidade do ajuste para o ímã NB1 na determinação do B_{re} .

Conforme indicado, o valor determinado de B_{re} considerando as incertezas já mencionadas poderá ser especificado como:

$$B_{re}(\text{NB1}) = (1,239 \pm 0,015)T \quad (8-14)$$

Este valor já arredondado se posiciona dentro da faixa dos 2% indicada pelas normas como apresentado no capítulo 7. Na Figura 8-5, por sua vez, pode-se apreciar um resumo da qualidade do ajuste para o ímã NB1, através de um gráfico de resíduos considerada randômica, um coeficiente R^2 ajustado perto de 1 e SSE e RMSE perto de zero indicando a qualidade do ajuste no que se refere a predição (Ver Apêndice 6).

8.2 Determinação do parâmetro μ_{re}

Esta etapa baseia-se na medição de quatro valores em dois momentos diferentes (ver Figura 4-13). Obtidas as variações de fluxo e de densidade de fluxo pelo software de aquisição, incorporam-se as magnitudes dimensionais, as constantes e com esses dados obtém-se a permeabilidade segundo a seguinte expressão:

$$\mu_{re} = \frac{\Delta B_m}{\mu_0 \Delta H_m} = \frac{1}{A_m} \left(\frac{\Delta u_o RC}{N_b \mu_0 H_m} - \Delta A \right) = \frac{\frac{\phi_b \times 10^{-2}}{A_m N_b}}{(\mu_0 H_m)} - \frac{A_b}{A_m} + 1 \quad (8-15)$$

Na determinação das incertezas da permeabilidade de retorno serão feitas as seguintes considerações: a temperatura e umidade são mantidas dentro dos valores estabelecidos pelas especificações das normas, dos instrumentos e das amostras; o número de voltas da bobina fluximétrica é assumido sem incerteza; a incerteza da área polar foi determinada e apresentada oportunamente; a incerteza da área polar da bobina foi determinada com idêntico procedimento ao da área polar da amostra, portanto não será incluída; o valor do μ_0 considera-se exato (CODATA, 2006); e considera-se a incerteza da conversão dos instrumentos para o computador como desprezível. A estimação da variância da permeabilidade pode ser representada como:

$$u_c^2(\mu_{re}) = \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial \phi_b} \right]^2 u^2(\bar{\phi}_b) + \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial \delta \phi_b} \right]^2 u^2(\delta \bar{\phi}_b) + \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial (\mu_0 \bar{H}_m)} \right]^2 u^2(\mu_0 \bar{H}_m) + \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial (\mu_0 \delta \bar{H}_m)} \right]^2 u^2(\mu_0 \delta \bar{H}_m) + \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial A_m} \right]^2 u_c^2(\bar{A}_m) + \left[\frac{\partial \mu_{re}}{\partial A_b} \right]^2 u_c^2(\bar{A}_b) \quad (8-16)$$

A determinação atual das incertezas está baseada em observações independentes de variáveis não correlacionadas, considerando uma distribuição normal.

Em (8-16), o primeiro termo e o segundo consideram as incertezas em relação ao fluxímetro, tanto nas medições com avaliação de Tipo A como nas especificações com avaliação de Tipo B, respectivamente; o terceiro e quarto termo considera as incertezas em relação ao gaussímetro e os dois últimos termos são incertezas já determinadas para as áreas da amostra e da bobina.

Na Tabela 8-3 são apresentados os dados em relação ao tratamento estatístico (avaliação de Tipo A) das medições de fluxo e densidade de fluxo, os parâmetros estatísticos s e u foram definidos no capítulo 3 nas expressões (3-73) e (3-74).

Tabela 8-3. Dados das medições em circuito magnético fechado na amostra NBI.

| | $\mu_0 H_m$ (T)* | ϕ_b (Maxwell-espiras)* |
|--|---------------------|--------------------------------|
| 1 | 0,2807421 | 0,305579 |
| 2 | 0,2802136 | 0,304868 |
| 3 | 0,2805546 | 0,3053302 |
| 4 | 0,2806012 | 0,3053366 |
| N | 4 | 4 |
| Média | 0,2805279 | 0,3052785 |
| Desvio Padrão s | 0,0002242 | 0,0002971 |
| Desvio Padrão da Média u | 0,0001121 | 0,0001486 |

* Os valores de 1 a 4 correspondentes às medições não são leituras de display, mas valores equivalentes de conversão das respectivas variáveis a tensões de CC. O fabricante afirma que as suas especificações continuam válidas.

Na Figura 8-6 se observam as contribuições na incerteza total na determinação da permeabilidade de retorno.

Os coeficientes de sensibilidade podem ser escritos como:

$$\frac{\partial \mu_{re}}{\partial \phi_b} = \frac{10^{-2}}{A_m N_b \mu_0 H_m}; \quad \frac{\partial \mu_{re}}{\partial (\mu_0 \bar{H}_m)} = -\frac{\phi_b \times 10^{-2}}{A_m N_b (\mu_0 H_m)^2} \quad (8-17)$$

$$\frac{\partial \mu_{re}}{\partial \bar{A}_m} = -\frac{\phi_b \times 10^{-2}}{A_m^2 N_b \mu_0 H_m} + \frac{A_b}{A_m^2}; \quad \frac{\partial \mu_{re}}{\partial \bar{A}_b} = -\frac{1}{A_m} \quad (8-18)$$

O fator 10^{-2} corresponde ao processo de adequação de unidades no fluxímetro junto com os ajustes de escala R e C do integrador analógico.

As incertezas Tipo B dos instrumentos utilizados são obtidas da Tabela 7-6 do capítulo 7. Do apêndice correspondente, observa-se da planilha de incertezas os resultados da análise:

$$\mu_{re}(\text{NB1}) = 1,052 \pm 0,006 \quad (8-19)$$

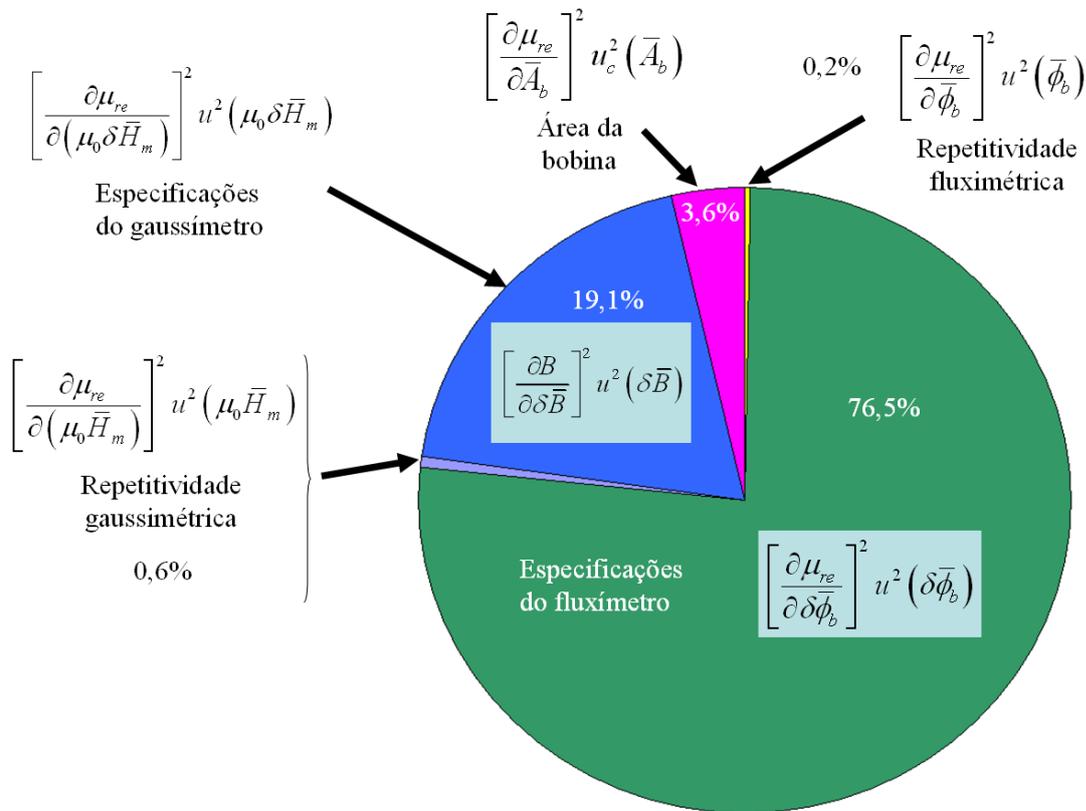


Figura 8-6. Distribuição das incertezas na (8-16) na determinação de B_{re} .

8.3 Determinação dos parâmetros H_{ce} e $(BH)_{maxe}$

Partindo-se da premissa já estabelecida de que os ímãs a serem caracterizados precisam ter característica de segundo quadrante linear, é possível estimar os outros dois parâmetros.

A coercitividade é dada por

$$H_{ce} = \frac{B_{re}}{\mu_0 \mu_{re}} \quad (8-20)$$

e o máximo produto energético por

$$(BH)_{maxe} = \frac{B_{re}}{2} \frac{H_{ce}}{2} \quad (8-21)$$

As incertezas respectivas são:

$$u_c^2(H_{ce}) = \left[\frac{\partial H_{ce}}{\partial B_{re}} \right]^2 u^2(B_{re}) + \left[\frac{\partial H_{ce}}{\partial \mu_{re}} \right]^2 u^2(\mu_{re}) \quad (8-22)$$

$$u_c^2 \left[(BH)_{\max e} \right] = \left[\frac{\partial (BH)_{\max e}}{\partial B_{re}} \right]^2 u_c^2 (B_{re}) + \left[\frac{\partial (BH)_{\max e}}{\partial H_{ce}} \right]^2 u_c^2 (H_{ce}) \quad (8-23)$$

Na Tabela 8-4 são comparados os parâmetros estimados e suas respectivas incertezas com as especificações da amostra, enquanto na Tabela 8-5 somente é comparado o erro porcentual entre o parâmetro estimado e o V.V.C. informado pelo IPT.

Tabela 8-4. Comparação das medições na amostra NB1.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| B_r | (1,216 \pm 0,014) T | (1,239 \pm 0,015) T |
| | 1,216 T \pm 1,1% | 1,239 T \pm 1,2% |
| μ_r^* | 1,038 \pm 0,012 | 1,052 \pm 0,006 |
| | 1,038 \pm 1,2% | 1,052 \pm 0,6% |
| H_c | (929 \pm 16) kA/m | (937 \pm 12) kA/m |
| | 929 kA/m \pm 1,7% | 937 kA/m \pm 1,2% |
| $\mu_0 H_c$ | (1,167 \pm 0,020) T | (1,178 \pm 0,015) T |
| | 1,167 T \pm 1,7% | 1,178 T \pm 1,2% |
| $(BH)_{\max}$ | (283,6 \pm 6,2) kJ/m ³ | (290 \pm 6) kJ/m ³ |
| | 283,6 kJ/m ³ \pm 2,2% | 290 kJ/m ³ \pm 2% |
| | (35,6 \pm 0,8) MGOe | (36,5 \pm 0,7) MGOe |
| | 35,6 MGOe \pm 2,2% | 36,5 MGOe \pm 2% |

* Frente à carência da informação da permeabilidade de retorno do Histerisímetro AMH-300, neste trabalho é adotada como sendo a inclinação da característica de desmagnetização entre o B_r e o B_a (ponto de máximo produto energético) obtida dos pontos medidos pelo citado instrumento.

Tabela 8-5. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NB1.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\epsilon\%$ |
|------------------------------------|-------|-------|--------------|
| B_r (T) | 1,216 | 1,239 | 1,9 |
| μ_r | 1,038 | 1,052 | 1,3 |
| H_c (kA/m) | 929 | 937 | 0,9 |
| $(BH)_{\max}$ (kJ/m ³) | 283,6 | 290 | 2,4 |

8.4 Resultados das medições das outras amostras

A seguir são apresentados os resultados das medições realizadas nas demais amostras de teste num formato simplificado de gráficos e tabelas como as apresentadas para a amostra NB1. Os comentários referentes aos resultados serão proporcionados ao final do capítulo.

8.4.1 Resultados para as amostras de volume entre 2,5 e 6 cm³

As amostras que cumprem com este requisito são a NB3, a NC1 e a SC2. Nessa ordem serão apresentados os resultados.

8.4.1.1 Caracterização do ímã NB3

Na Figura 8-7 e na Figura 8-8 observa-se a determinação do B_{re} da amostra NB3, na Tabela 8-6 e Tabela 8-7 os resultados totais dela.

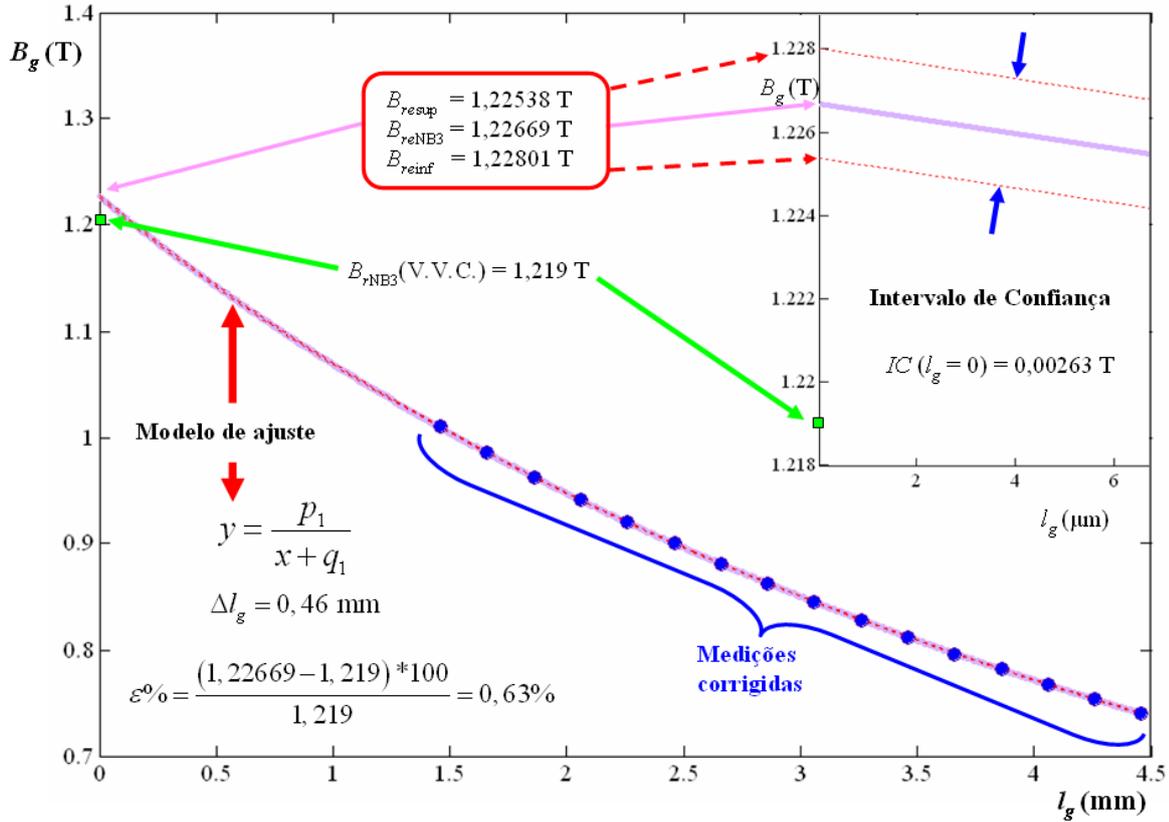


Figura 8-7. Ajuste não linear ponderado para o ímã NB3 na determinação do B_{re} .

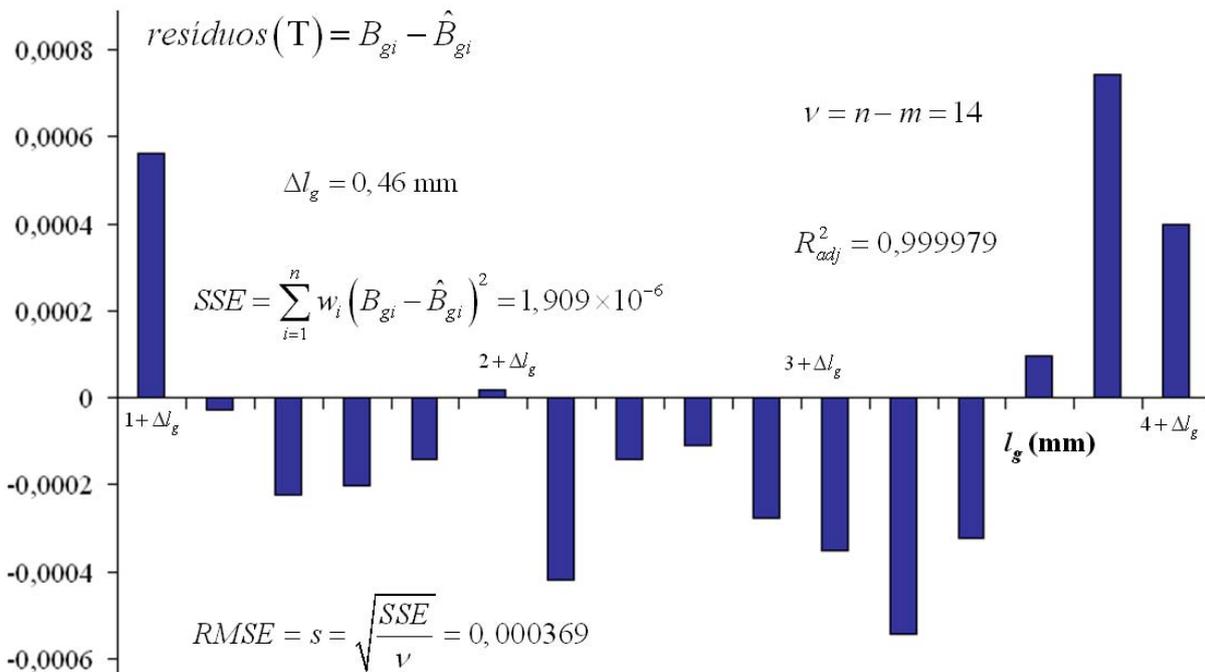


Figura 8-8. Qualidade do ajuste para o ímã NB3 na determinação do B_{re} .

Tabela 8-6. Comparação das medições na amostra NB3.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|--------------|---|---|
| B_r | (1,219 \pm 0,014) T 1,219 T \pm 1,1% | (1,227 \pm 0,014) T 1,227 T \pm 1,1% |
| μ_r^* | 1,070 \pm 0,012 1,070 \pm 1,2% | 1,059 \pm 0,007 1,059 \pm 0,7% |
| H_c | (911 \pm 16) kA/m 911 kA/m \pm 1,8% | (922 \pm 11) kA/m 922 kA/m \pm 1,2% |
| $\mu_0 H_c$ | (1,145 \pm 0,020) T 1,145 T \pm 1,8% | (1,159 \pm 0,014) T 1,159 T \pm 1,2% |
| $(BH)_{max}$ | (276,3 \pm 6,4) kJ/m ³ 276,3 kJ/m ³ \pm 2,3% | (283 \pm 5) kJ/m ³ 283 kJ/m ³ \pm 1,8% |
| | (34,7 \pm 0,8) MGOe 34,7 MGOe \pm 2,3% | (35,5 \pm 0,6) MGOe 35,5 MGOe \pm 1,8% |

* Ver comentário na Tabela 8-4.

Tabela 8-7. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NB3.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\varepsilon\%$ |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------------|
| B_r (T) | 1,219 | 1,227 | 0,7 |
| μ_r | 1,070 | 1,059 | -1,0 |
| H_c (kA/m) | 911 | 922 | 1,2 |
| $(BH)_{max}$ (kJ/m ³) | 276,3 | 283 | 2,4 |

8.4.1.2 Caracterização do ímã NC1

Na Tabela 8-8 e Tabela 8-9 são apresentados os resultados de todos os parâmetros da amostra NC1 e nas Figura 8-9 e Figura 8-10 são expostos os resultados em relação à determinação do B_{re} .

Tabela 8-8. Comparação das medições na amostra NC1.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|--------------|---|---|
| B_r | (1,257 \pm 0,014) T 1,257 T \pm 1,1% | (1,278 \pm 0,015) T 1,278 T \pm 1,2% |
| μ_r^* | 1,065 \pm 0,012 1,065 \pm 1,1% | 1,074 \pm 0,008 1,074 \pm 0,7% |
| H_{cB} | (934 \pm 16) kA/m 934 kA/m \pm 1,7% | (947 \pm 12) kA/m 947 kA/m \pm 1,3% |
| $\mu_0 H_c$ | (1,174 \pm 0,020) T 1,174 T \pm 1,7% | (1,190 \pm 0,015) T 1,190 T \pm 1,3% |
| $(BH)_{max}$ | (295,2 \pm 6,4) kJ/m ³ 295,2 kJ/m ³ \pm 2,2% | (303 \pm 3) kJ/m ³ 303 kJ/m ³ \pm 1,1% |
| | (37,1 \pm 0,8) MGOe 37,1 MGOe \pm 2,2% | (38,0 \pm 0,4) MGOe 38,0 MGOe \pm 1,1% |

* Ver comentário na Tabela 8-4.

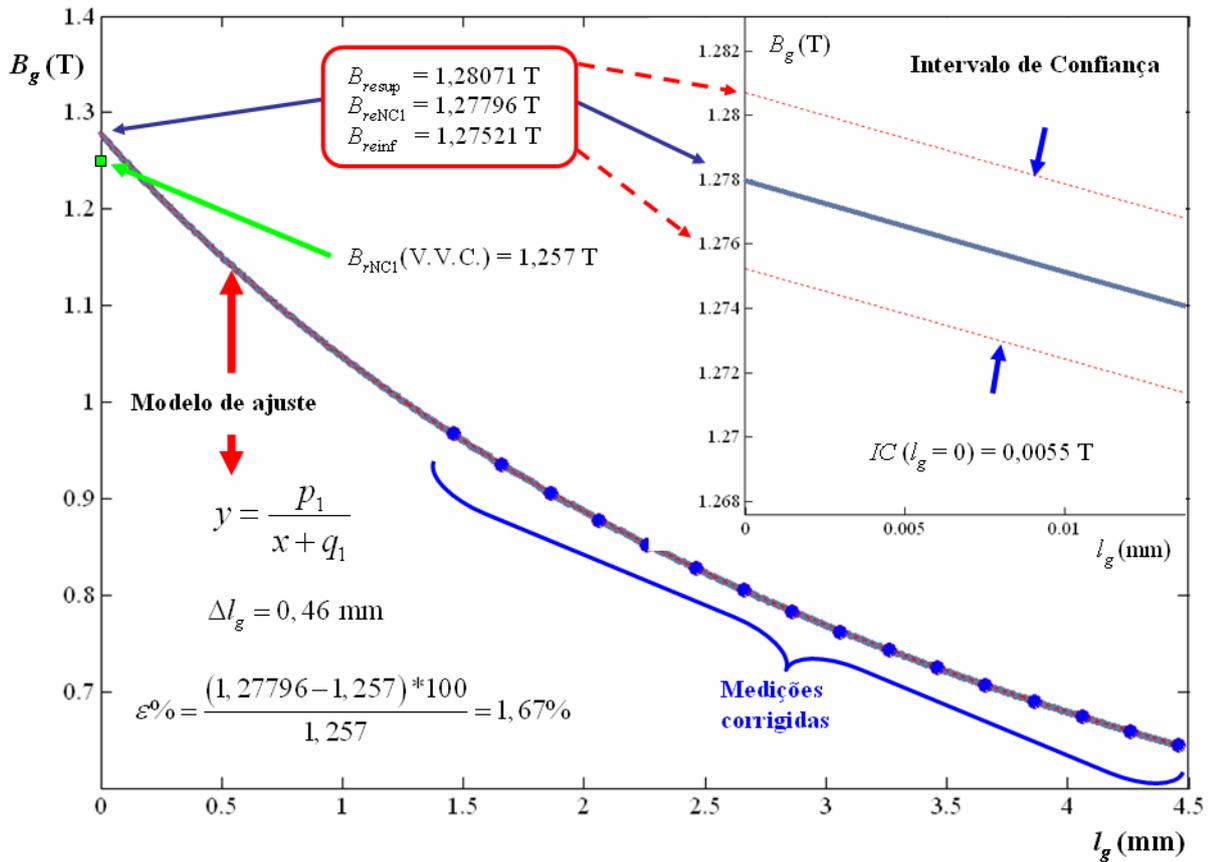


Figura 8-9. Ajuste não linear para o ímã NC1 na determinação do B_{re} .

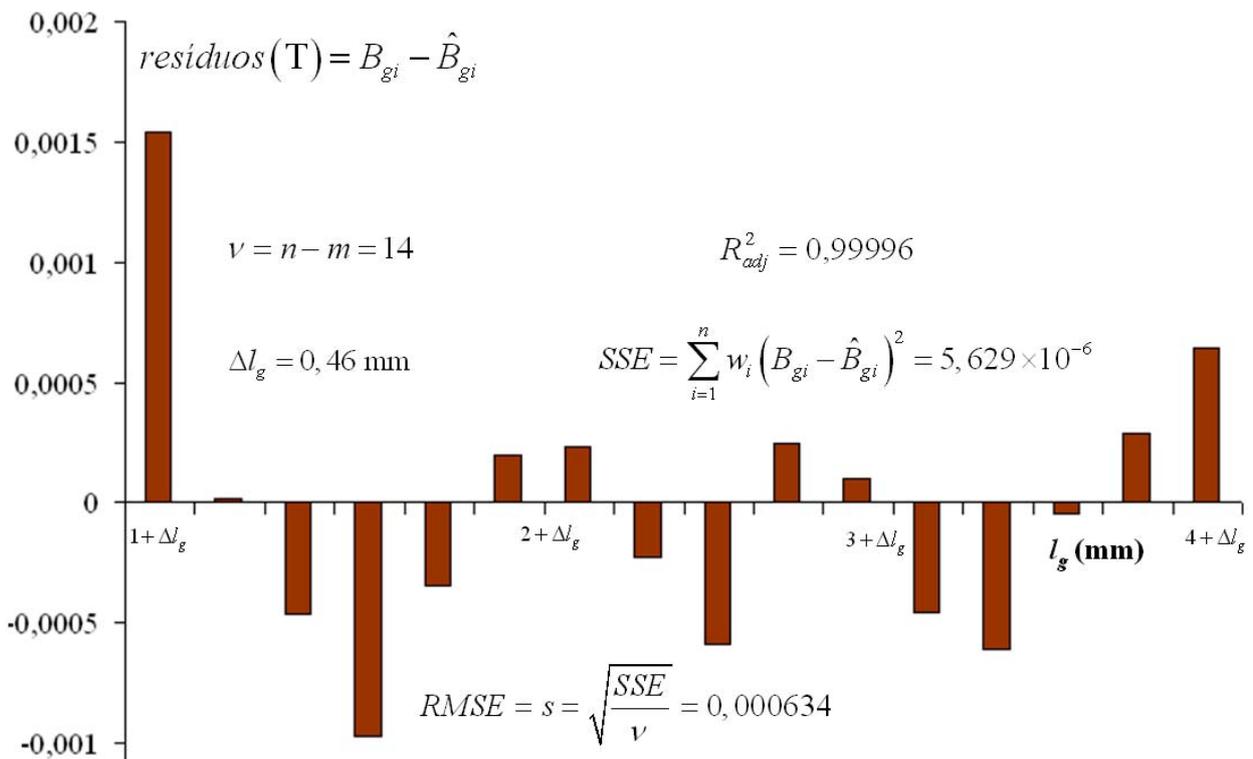


Figura 8-10. Qualidade do ajuste para o ímã NC1 na determinação do B_{re} .

Tabela 8-9. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra NC1.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\varepsilon\%$ |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------------|
| B_r (T) | 1,257 | 1,278 | 1,7 |
| μ_r | 1,065 | 1,074 | 0,9 |
| H_c (kA/m) | 934 | 948 | 1,4 |
| $(BH)_{max}$ (kJ/m ³) | 295,2 | 303 | 2,6 |

8.4.1.3 Caracterização do ímã SC2

Os detalhes da determinação da densidade de fluxo magnético remanente são vistos nas Figura 8-11 e Figura 8-12, entanto nas Tabela 8-10 e Tabela 8-11 são apresentados todos os parâmetros resumidamente.

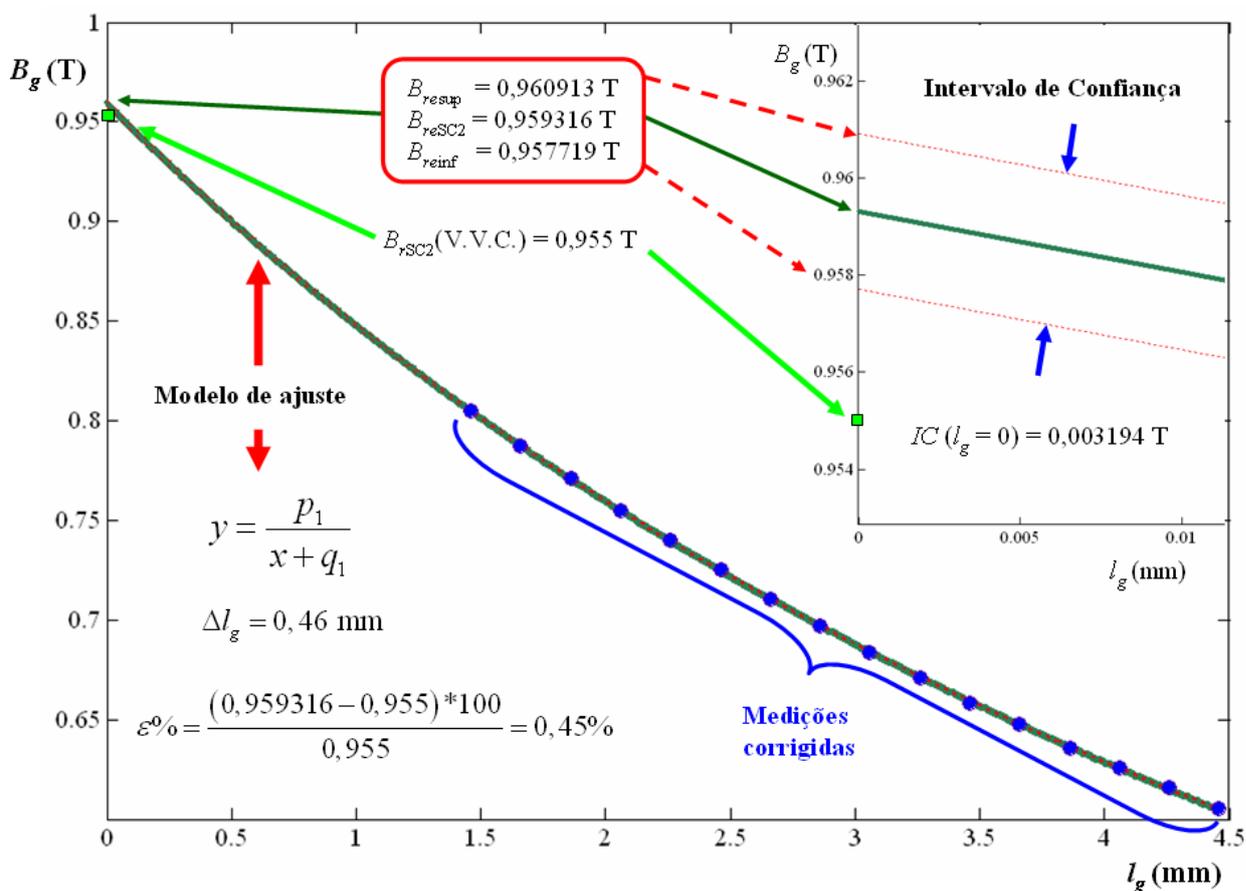
Figura 8-11. Ajuste não linear para o ímã SC2 na determinação do B_{re} .

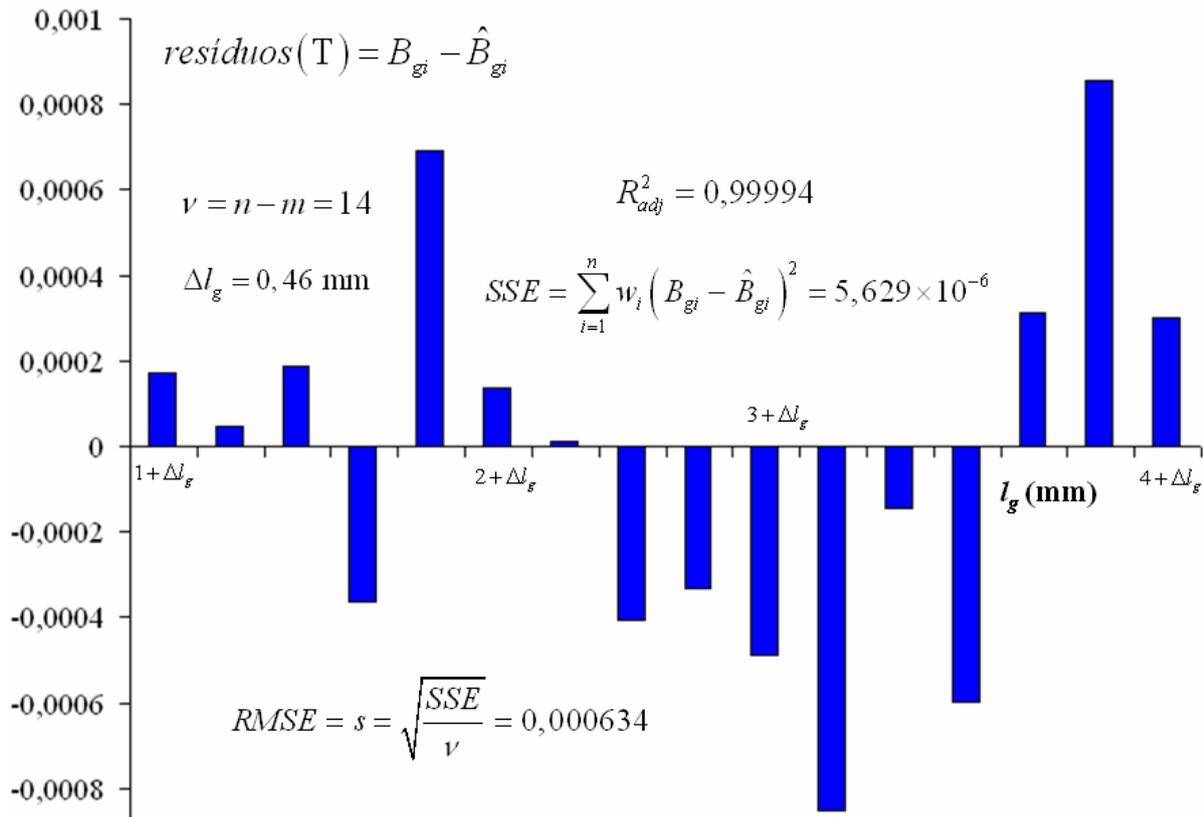
Tabela 8-10. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra SC2.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\varepsilon\%$ |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------------|
| B_r (T) | 0,955 | 0,959 | 0,4 |
| μ_r | 1,027 | 1,026 | -0,1 |
| H_c (kA/m) | 741 | 744 | 0,4 |
| $(BH)_{max}$ (kJ/m ³) | 176,8 | 178 | 0,9 |

Tabela 8-11. Comparação das medições na amostra SC2.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|--------------|--|--|
| B_r | (0,955 \pm 0,012) T 0,955 T \pm 1,3% | (0,959 \pm 0,015) T 0,959 T \pm 1,6% |
| μ_r^* | 1,027 \pm 0,012 1,027 \pm 1,2% | 1,026 \pm 0,008 1,026 \pm 0,8% |
| H_{cB} | (741 \pm 11) kA/m 741 kA/m \pm 1,5% | (744 \pm 12) kA/m 744 kA/m \pm 2% |
| $\mu_0 H_c$ | (0,931 \pm 0,014) T 0,931 T \pm 1,5% | (0,935 \pm 0,015) T 0,935 T \pm 2% |
| $(BH)_{max}$ | (176,8 \pm 3,5) kJ/m ³ 176,8 kJ/m ³ \pm 2,0% (22,2 \pm 0,4) MGOe 22,2 MGOe \pm 2,0% | (178 \pm 3) kJ/m ³ 178 kJ/m ³ \pm 1,4% (22,4 \pm 0,3) MGOe 22,4 MGOe \pm 1,4% |

* Ver comentário na Tabela 8-4.

Figura 8-12. Qualidade do ajuste para o ímã SC2 na determinação do B_r .

8.4.2 Resultados para as amostras de volume entre 8 e 16 cm³

As amostras que cumprem com este requisito são a NB1, a SB1 e a FB2. Os resultados do ensaio da amostra NB1 já foram apresentados, a seguir serão providenciados os resultados dos testes em as amostras SB1 e FB2.

8.4.2.1 Caracterização do ímã SB1

Nas Figura 8-13; Figura 8-14; e na Tabela 8-12 e Tabela 8-13 são apresentados os resultados desta amostra de Samário-Cobalto.

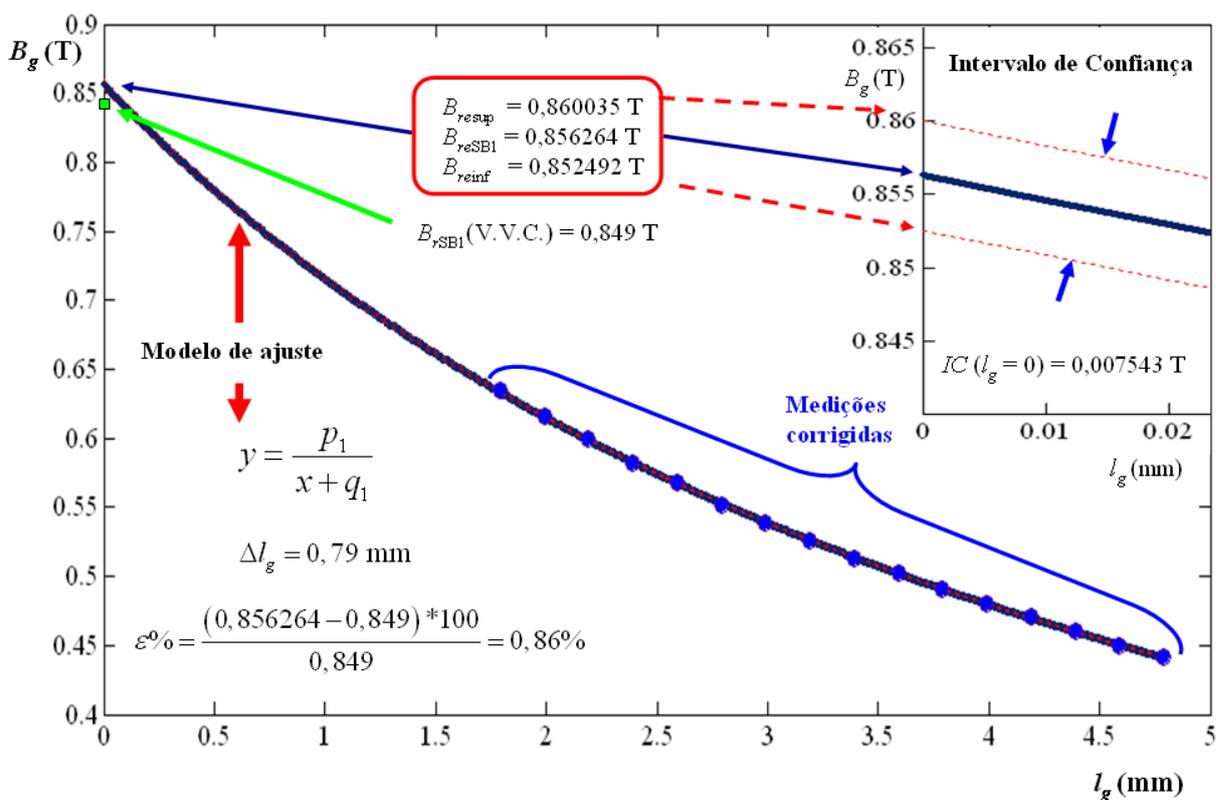


Figura 8-13. Ajuste não linear para o ímã SB1 na determinação do B_{re} .

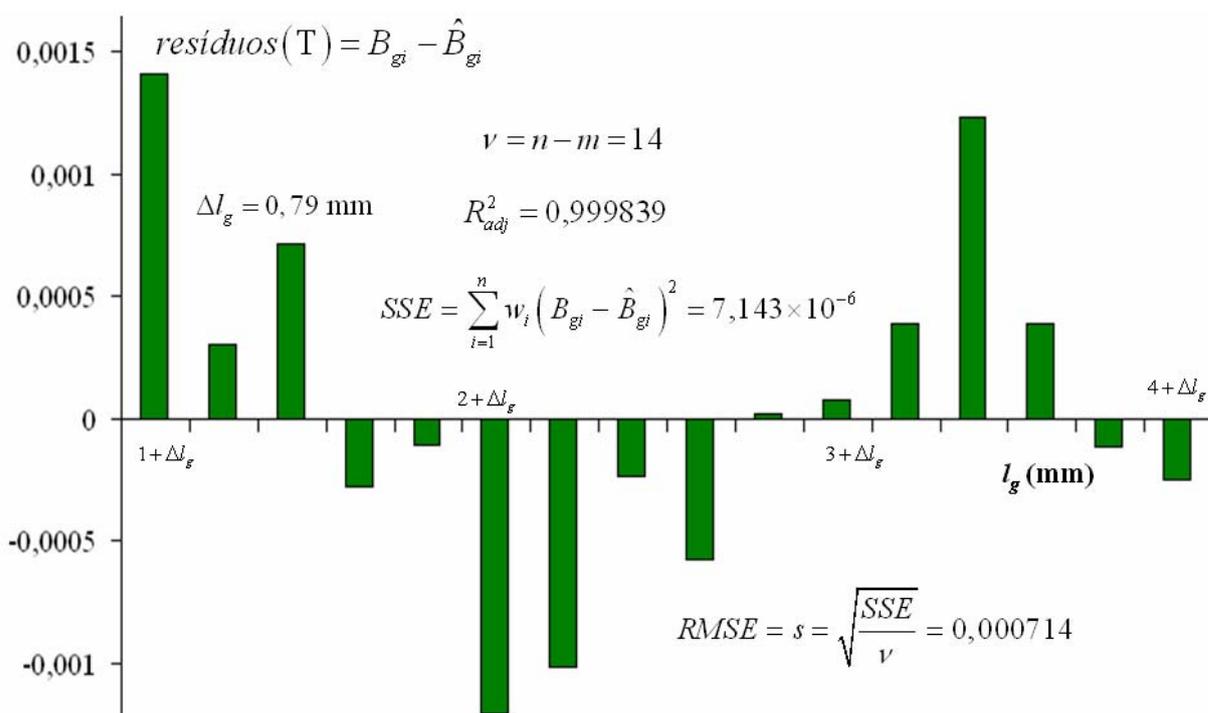


Figura 8-14. Qualidade do ajuste para o ímã SB1 na determinação do B_{re} .

Tabela 8-12. Comparação das medições na amostra SB1.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| B_r | $(0,849 \pm 0,009)$ T | $(0,856 \pm 0,016)$ T |
| | $0,849$ T $\pm 1,1\%$ | $0,856$ T $\pm 1,9\%$ |
| μ_r^* | $1,019 \pm 0,012$ | $1,039 \pm 0,009$ |
| | $1,019 \pm 1,2\%$ | $1,039 \pm 0,9\%$ |
| H_c | (666 ± 9) kA/m | (656 ± 13) kA/m |
| | 666 kA/m $\pm 1,3\%$ | 656 kA/m $\pm 1,9\%$ |
| $\mu_0 H_c$ | $(0,836 \pm 0,011)$ T | $(0,824 \pm 0,016)$ T |
| | $0,836$ T $\pm 1,3\%$ | $0,824$ T $\pm 1,9\%$ |
| $(BH)_{max}$ | $(140,8 \pm 2,7)$ kJ/m ³ | (140 ± 2) kJ/m ³ |
| | $140,8$ kJ/m ³ $\pm 2,0\%$ | 140 kJ/m ³ $\pm 1,7\%$ |
| | $(17,7 \pm 0,3)$ MGOe | $(17,6 \pm 0,3)$ MGOe |
| | $17,7$ MGOe $\pm 2,0\%$ | $17,6$ MGOe $\pm 1,7\%$ |

* Ver comentário na Tabela 8-4.

Tabela 8-13. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra SB1.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\varepsilon\%$ |
|-----------------------------------|-------|-------|-----------------|
| B_r (T) | 0,849 | 0,856 | 0,8 |
| μ_r | 1,019 | 1,039 | 2,0 |
| H_c (kA/m) | 666 | 656 | -1,5 |
| $(BH)_{max}$ (kJ/m ³) | 140,8 | 140 | -0,3 |

8.4.2.2 Caracterização do ímã FB2

Na Figura 8-15; e Figura 8-16; na Tabela 8-14 e na Tabela 8-15 são apresentados os dados deste ímã de ferrite.

Tabela 8-14. Comparação das medições na amostra FB2.

| Parâmetro | V.V.C. $\pm U$ IPT | Estimação $\pm U$ HEV |
|--------------|---------------------------------------|--------------------------------------|
| B_r | $(0,383 \pm 0,004)$ T | $(0,382 \pm 0,014)$ T |
| | $0,383$ T $\pm 1,0\%$ | $0,382$ T $\pm 3,7\%$ |
| μ_r^* | $1,033 \pm 0,012$ | $1,043 \pm 0,006$ |
| | $1,033 \pm 1,2\%$ | $1,043 \pm 0,6\%$ |
| H_c | $(260,5 \pm 3,5)$ kA/m | (291 ± 10) kA/m |
| | $260,5$ kA/m $\pm 1,4\%$ | 291 kA/m $\pm 3,4\%$ |
| $\mu_0 H_c$ | $(0,327 \pm 0,004)$ T | $(0,366 \pm 0,012)$ T |
| | $0,327$ T $\pm 1,3\%$ | $0,366$ T $\pm 3,4\%$ |
| $(BH)_{max}$ | $(28,25 \pm 0,56)$ kJ/m ³ | $(27,8 \pm 1,6)$ kJ/m ³ |
| | $28,25$ kJ/m ³ $\pm 2,0\%$ | $27,8$ kJ/m ³ $\pm 5,8\%$ |
| | $(3,5 \pm 0,1)$ MGOe | $(3,5 \pm 0,2)$ MGOe |
| | $3,5$ MGOe $\pm 2,0\%$ | $3,5$ MGOe $\pm 5,8\%$ |

* Ver comentário na Tabela 8-4.

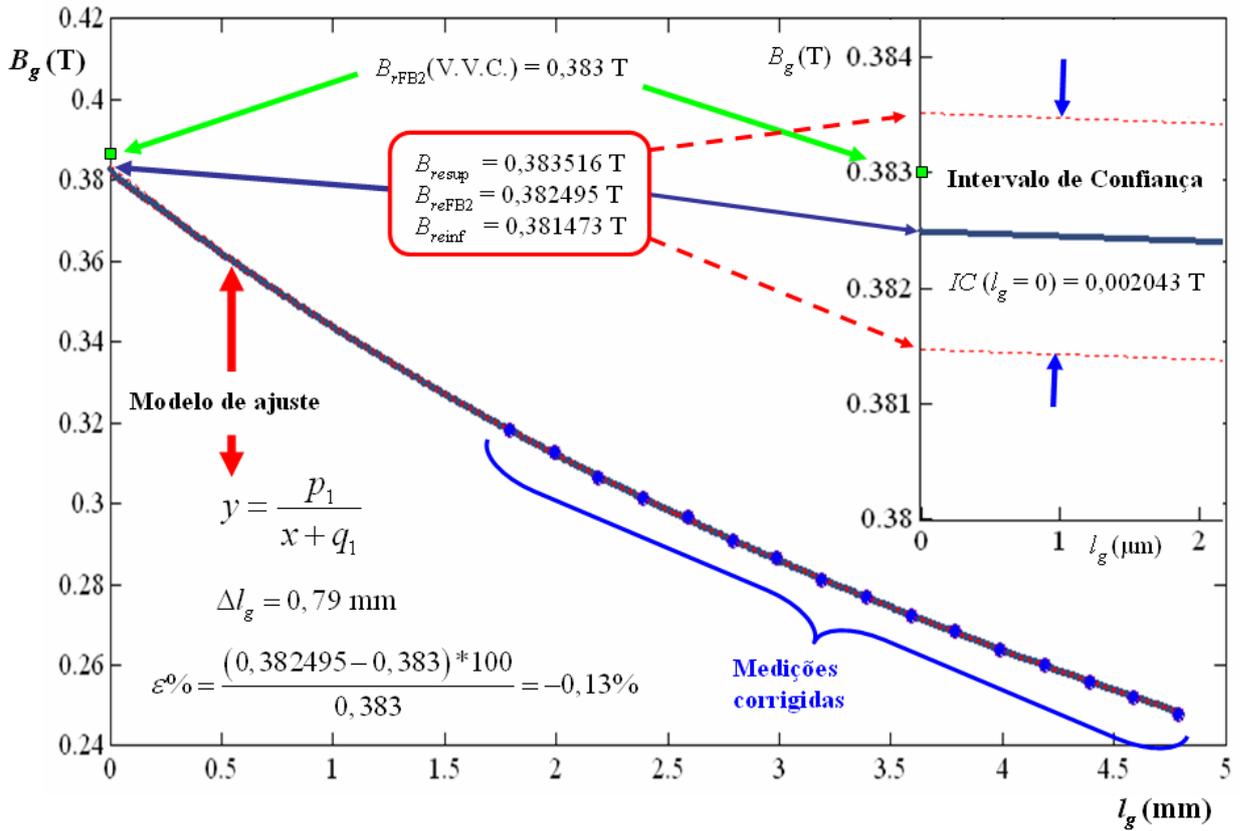


Figura 8-15. Ajuste não linear para o ímã FB2 na determinação do B_{re} .

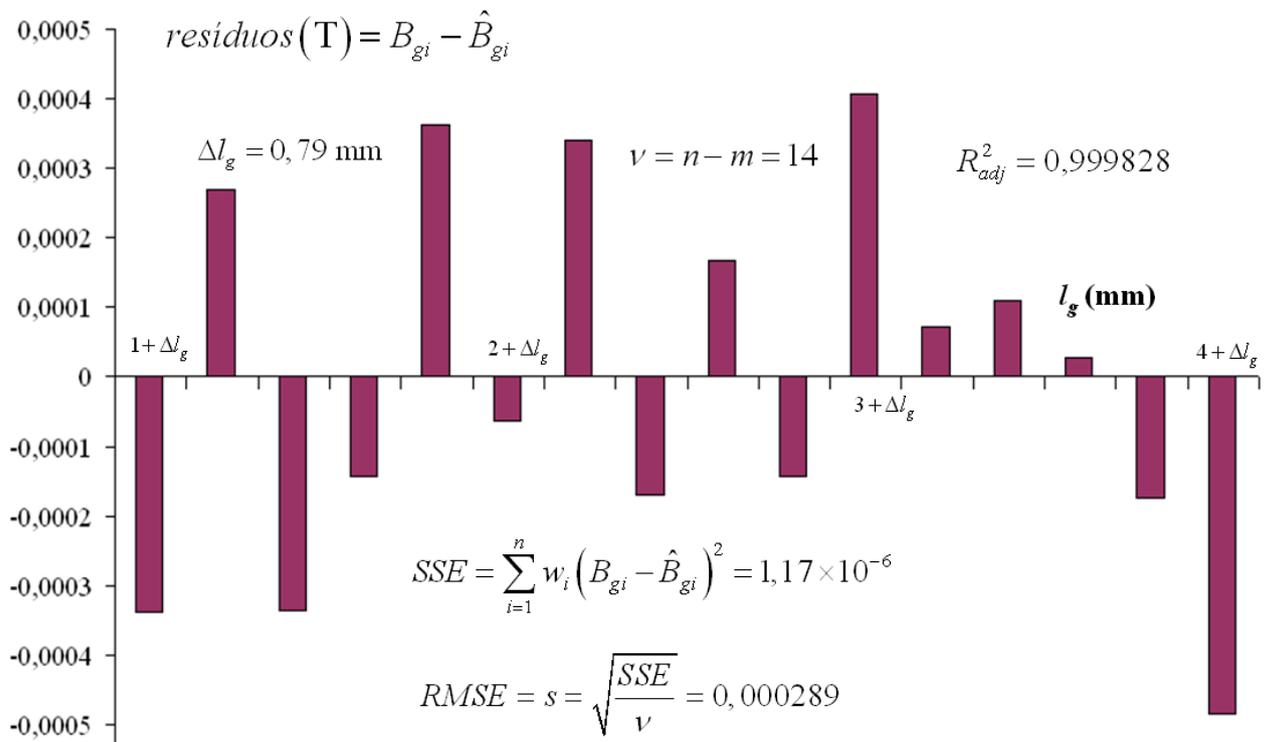


Figura 8-16. Qualidade do ajuste para o ímã FB2 na determinação do B_{re} .

Tabela 8-15. Diferença entre o valor estimado e o V.V.C. na amostra FB2.

| Parâmetro | IPT | HEV | $\epsilon\%$ |
|-----------------------------------|-------|-------|--------------|
| B_r (T) | 0,383 | 0,382 | -0,3 |
| μ_r | 1,033 | 1,043 | 1,0 |
| H_c (kA/m) | 260,5 | 291 | 11,9 |
| $(BH)_{max}$ (kJ/m ³) | 28,25 | 27,8 | -1,5 |

A amostra FB2 apresenta joelho no segundo quadrante como indica a Figura 8-17 obtida com dados proporcionados pelo IPT; portanto, a metodologia do HEV reporta uma coercitividade aparente quase 12% acima do valor V.V.C. No entanto, se observa também que a não linearidade não consegue modificar apreciavelmente o valor do máximo produto energético $(BH)_{max}$ reportando-se um erro dentro da norma ($-1,5\% < 3\%$ da norma). Embora as discrepâncias entre os parâmetros B_r , μ_r e $(BH)_{max}$ se posicionam dentro do estabelecido, as incertezas excedem os valores indicados pelas normas. A principal causa disto é a incerteza da correção ΔI_g efetuada com ímãs permanentes padrões de incerteza 3,5 vezes maior que incerteza do ímã padrão de ferrite.

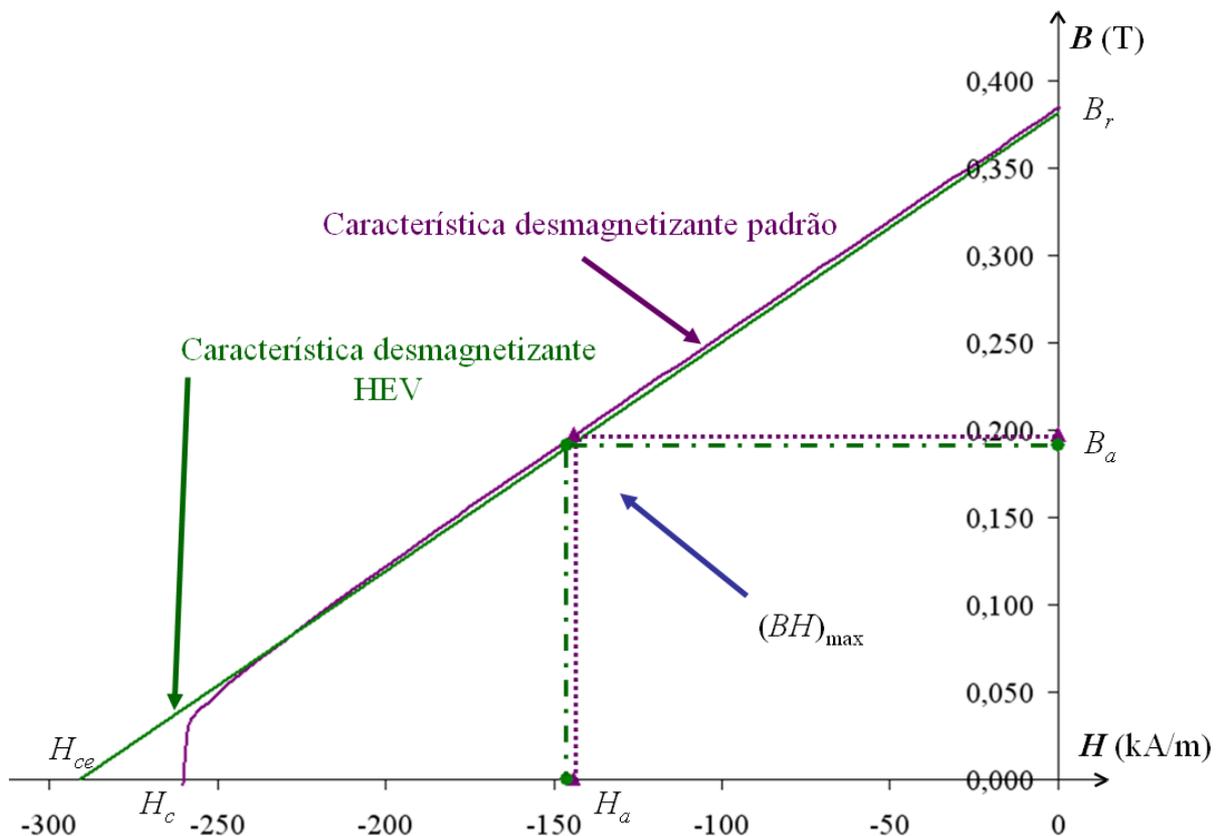


Figura 8-17. Segundo quadrante ou característica desmagnetizante do ímã FB2.

Dada a linearidade das características desmagnetizantes das demais amostras e do erro pequeno existente entre os parâmetros, se considerou desnecessário incluir as correspondentes figuras.

8.5 Comentários das medições

Nos ímãs de SmCo e NdFeB os parâmetros B_r , μ_r , H_c e $(BH)_{\max}$ (com suas respectivas incertezas) foram determinados dentro das especificações estabelecidas pelas normas IEC 404-5 e ASTM A977 (2% para B_r e H_c ; e 3% para $(BH)_{\max}$). No caso do ímã de ferrite, o único parâmetro que apresentou resultado dentro da norma (erro e incerteza) foi o μ_r . A densidade de fluxo magnético remanente e o máximo produto energético foram determinados com incerteza acima da indicada pelas normas (devido principalmente à incerteza da correção do HEV com ímãs padrões de Terras Raras).

Página intencionalmente deixada em branco.

9 COMPARAÇÕES, CONCLUSÕES, SUGESTÕES, RECOMENDAÇÕES E CONTRIBUIÇÕES

Considerando os resultados obtidos dos capítulos 5, 6 e 8 quanto à análise teórica, numérica e experimental, é possível fazer comparações com gráficos e com tabelas.

9.1 Resultados em relação ao B_r

No capítulo 6 obteve-se uma expressão da densidade de fluxo magnético no entreferro que pode ser comparado os seus valores numéricos para uma determinada amostra com os obtidos na simulação e nos ensaios experimentais. Assim, considerando a amostra de ferrite FB2 é possível obter a comparação da Figura 9-1.

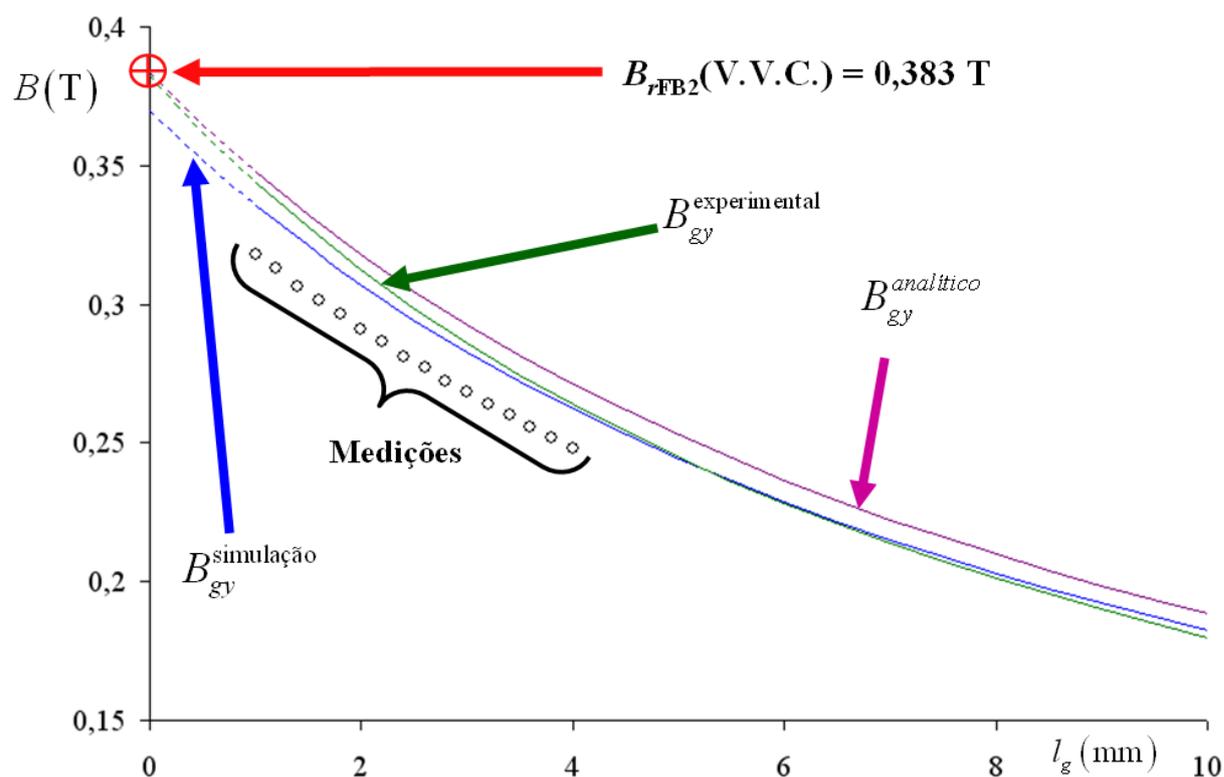


Figura 9-1. Comparação de determinação de B_r mediante simulação, analítico e experimental na amostra FB2.

Dos ímãs de Samário Cobalto escolheu-se o espécime SB2 e de Neodímio Ferro Boro o NB2 e obtiveram-se os dados da Figura 9-2 e da Figura 9-3.

Nos gráficos observa-se similitude tanto na tendência (forma) como na extrapolação das curvas ajustadas (o mesmo padrão manteve-se em todas as amostras). A diferença com que se apresentam as curvas da simulação se deve à consideração de peças separadas (independen-

tes) no braço central superior móvel, no pólo superior e no pólo inferior, cada um deles com um entreferro de $l_{gmin}/1000$ e a curva do aço utilizado na culatra do HEV.

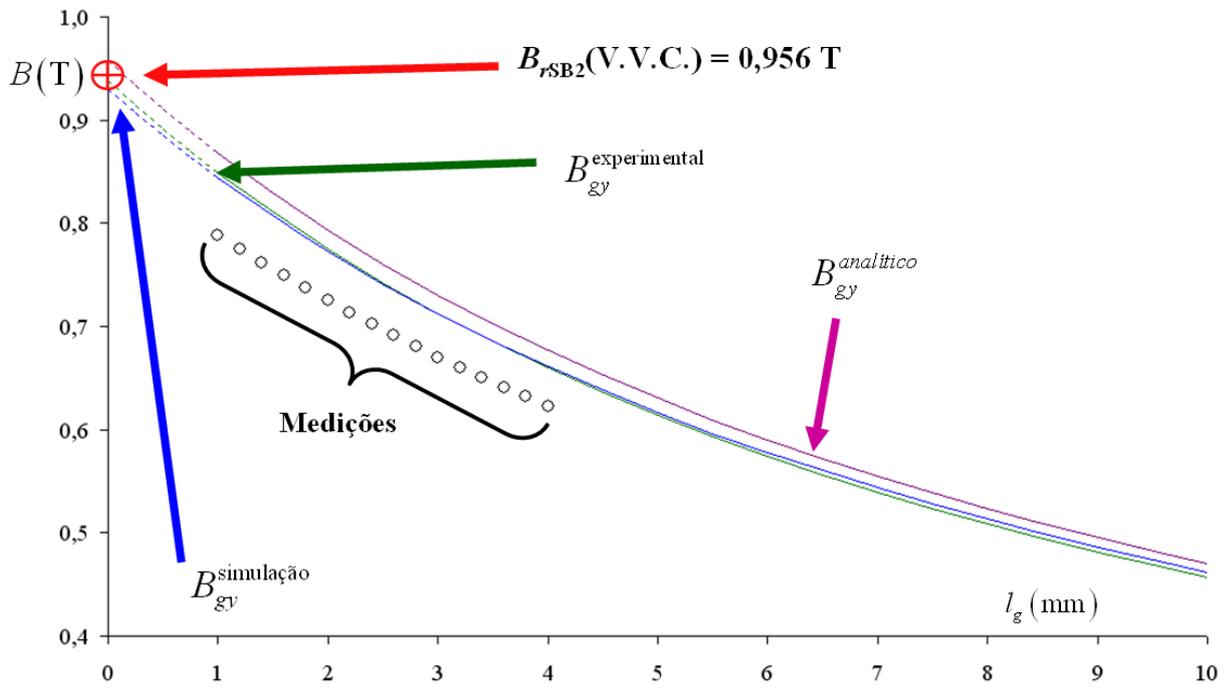


Figura 9-2. Comparação de determinação de B , mediante simulação, analítico e experimental na amostra SB2.

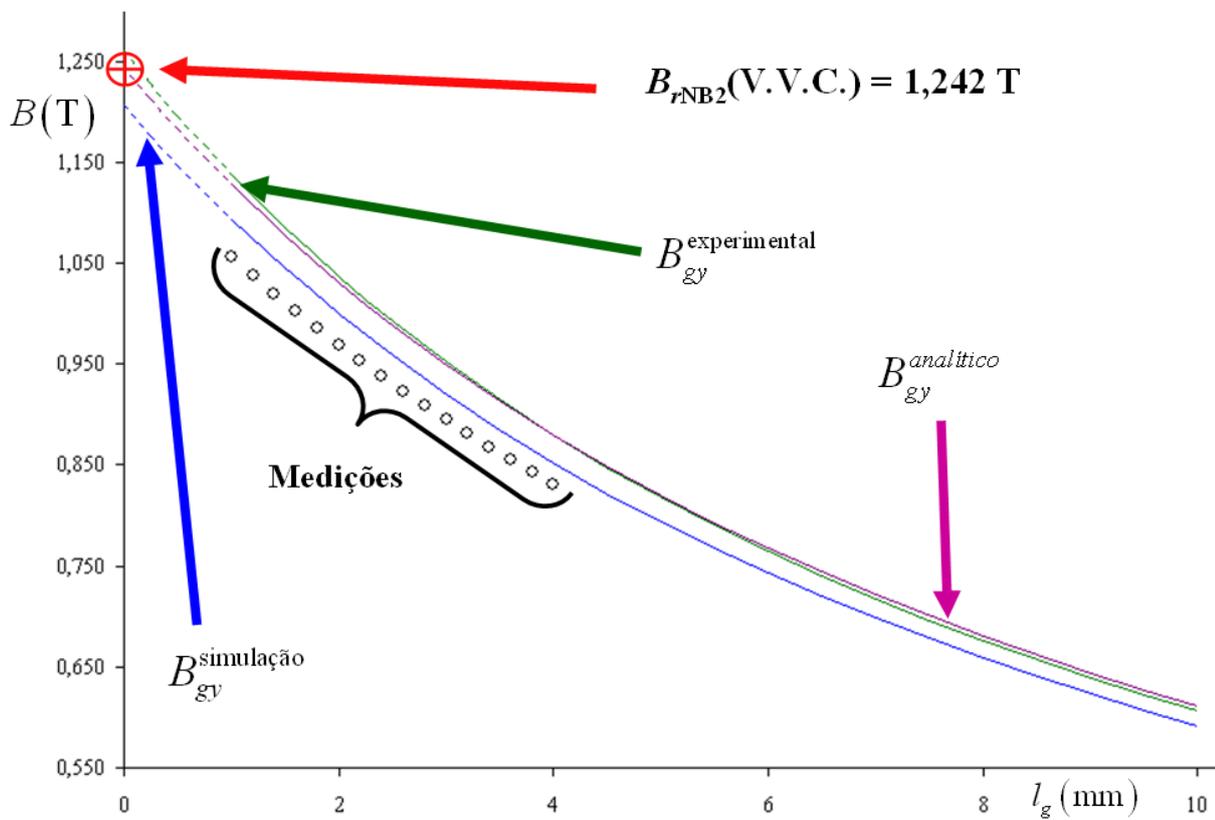


Figura 9-3. Comparação de determinação de B , mediante simulação, analítico e experimental na amostra NB2.

A exatidão (valores dentro do estabelecido pelas normas) apresentada na extrapolação das curvas experimental e analítica se deve ao ajuste aplicado e ao modelo utilizado respectivamente. Conforme indicado no capítulo 8, o ajuste do HEV foi feito considerando dois pares de ímãs padrões, classificados pelo volume da amostra.

Uma comparação de todas as amostras quanto à determinação da densidade de fluxo magnético remanente considerando resultados analíticos, experimentais e de simulação pode ser vista na Tabela 9-1.

Tabela 9-1. Comparação numérica das amostras na determinação do B_r .

| ID Amostra | B_r | | | | | | | |
|---------------|--------|-------|--------------|-------|--------------|-------|--------------|--|
| | V.V.C. | | Analítico | | Experimental | | Simulação | |
| | T | T | $\epsilon\%$ | T | $\epsilon\%$ | T | $\epsilon\%$ | |
| FB2 | 0,383 | 0,383 | 0,0 | 0,382 | -0,3 | 0,370 | -3,4 | |
| NB1 | 1,216 | 1,211 | -0,4 | 1,239 | 1,9 | 1,143 | -6,0 | |
| NB3 | 1,219 | 1,202 | -1,4 | 1,227 | 0,7 | 1,180 | -3,2 | |
| NC1 | 1,257 | 1,228 | -2,3 | 1,278 | 1,7 | 1,193 | -5,1 | |
| SB1 | 0,849 | 0,845 | -0,5 | 0,856 | 0,8 | 0,797 | -6,1 | |
| SC2 | 0,955 | 0,945 | -1,0 | 0,959 | 0,4 | 0,932 | -2,4 | |

Erro experimental < 2% das normas

Os resultados apresentados nos gráficos e na tabela expressam que é possível utilizar a simulação por elementos finitos como ferramenta inicial de aproximação antes da implementação efetiva do protótipo de ensaio.

Por sua vez, os resultados analíticos indicam que as condições de contorno e simplificações assumidas não afetaram significativamente os resultados (todos dentro do $\pm 2\%$ estabelecido pelas normas). Pode-se dizer que o modelo analítico permite estimar a densidade de fluxo magnético no centro geométrico do entreferro com a confiabilidade requerida prévia a uma implementação prática de um protótipo.

Os ajustes aplicados ao HEV, tanto nas medições corrigidas como nas curvas, possibilitaram que os resultados para os ímãs permanentes de Terras Raras (tanto as discrepâncias como as respectivas incertezas) fiquem dentro do estabelecido pelas normas ($\pm 2\%$ de exatidão).

As incertezas de algumas das amostras podem ser avaliadas graficamente na Figura 9-4, Figura 9-5 e Figura 9-6.

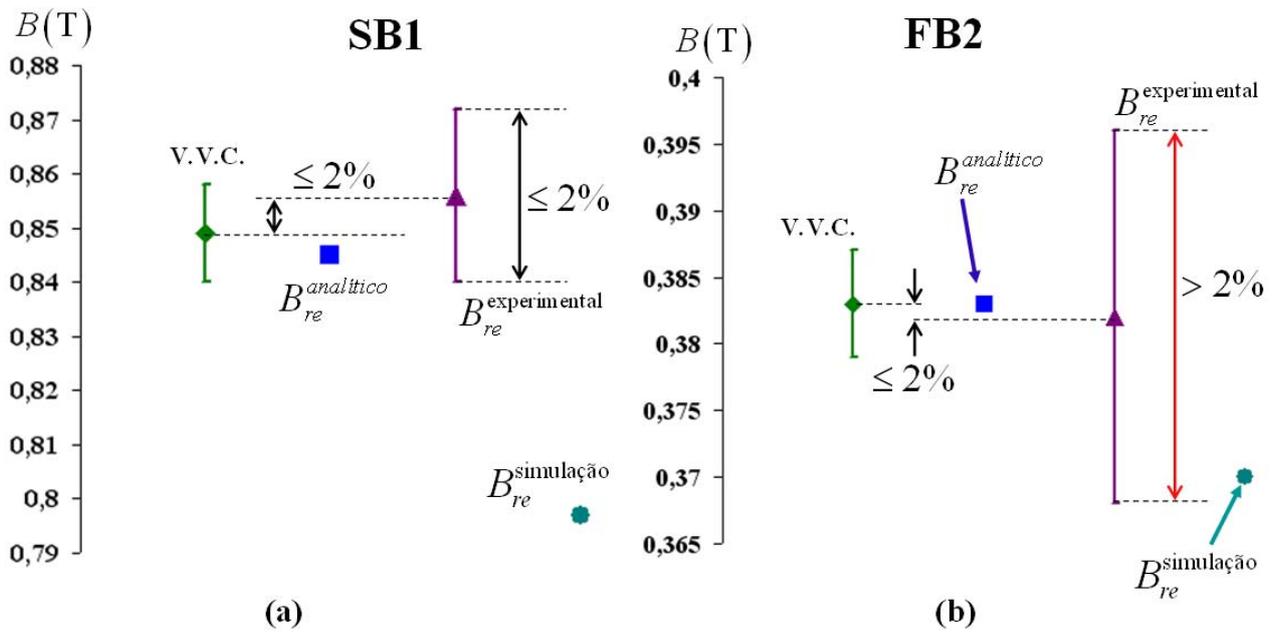


Figura 9-4. Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) SB1 e (b) FB2.

Observa-se que, embora a discrepância entre os valores V.V.C. e o experimental é da ordem do erro indicado pelas normas, as incertezas podem ser maiores, como o caso do ímã permanente de ferrite FB2.

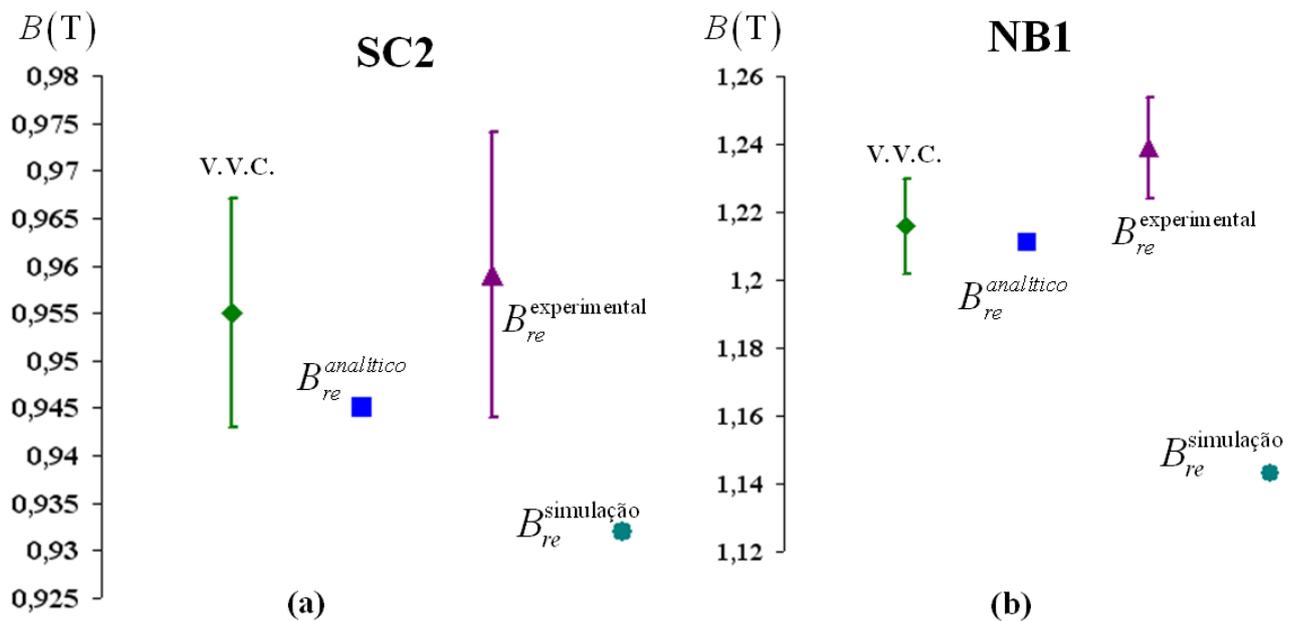


Figura 9-5. Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) SC2 e (b) NB1.

Para os ímãs permanentes de Samário Cobalto SC2 e de Neodímio Ferro Boro NB1, tanto as discrepâncias como as incertezas foram determinadas dentro dos valores indicados pelas normas em vigência ($\leq 2\%$).

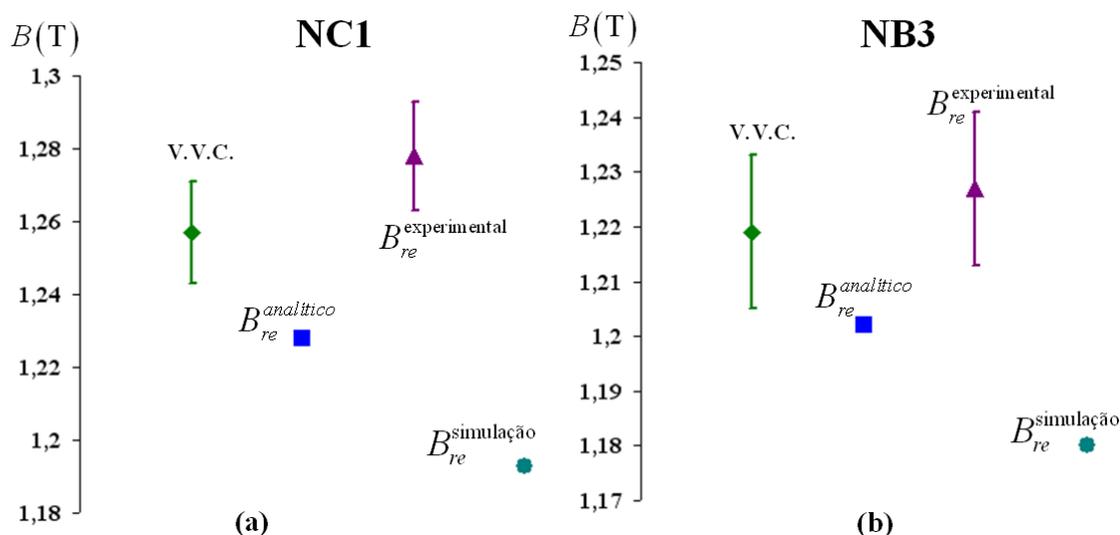


Figura 9-6. Comparação das incertezas na determinação de B_r para (a) NC1 e (b) NB3.

A conclusão obtida para as amostras SC2 e NB1 aplica-se também aos ímãs NC1; NB3 e as restantes amostras ensaiadas.

9.2 Resultados em relação ao μ_r

Na Tabela 9-2 encontram-se os resultados das determinações experimentais e de simulação relativos quanto ao parâmetro permeabilidade magnética de retorno μ_r .

Tabela 9-2. Comparação numérica das amostras na determinação do μ_r .

| ID Amostra | μ_r | | | |
|---------------|---------|--------------|--------------|--------------|
| | V.V.C. | Experimental | Simulação | |
| | | $\epsilon\%$ | $\epsilon\%$ | $\epsilon\%$ |
| FB2 | 1,033 | 1,043 | 1,0 | 1,031 -0,2 |
| NB1 | 1,038 | 1,052 | 1,3 | 1,034 -0,4 |
| NB3 | 1,070 | 1,059 | -1,0 | 1,062 -0,7 |
| NC1 | 1,065 | 1,074 | 0,9 | 1,058 -0,7 |
| SB1 | 1,019 | 1,039 | 2,0 | 1,016 -0,3 |
| SC2 | 1,027 | 1,026 | -0,1 | 1,013 -1,4 |

Não se incluem resultados da modelagem analítica porquanto nela a permeabilidade do ímã foi considerada igual ao μ_0 .

Observa-se que todas elas ficam dentro da faixa de $\pm 3\%$ considerado como aceitável pelas normas como descrito no capítulo 7.

As incertezas na determinação da permeabilidade magnética de retorno podem ser comparadas na Figura 9-7, Figura 9-8 e Figura 9-9.

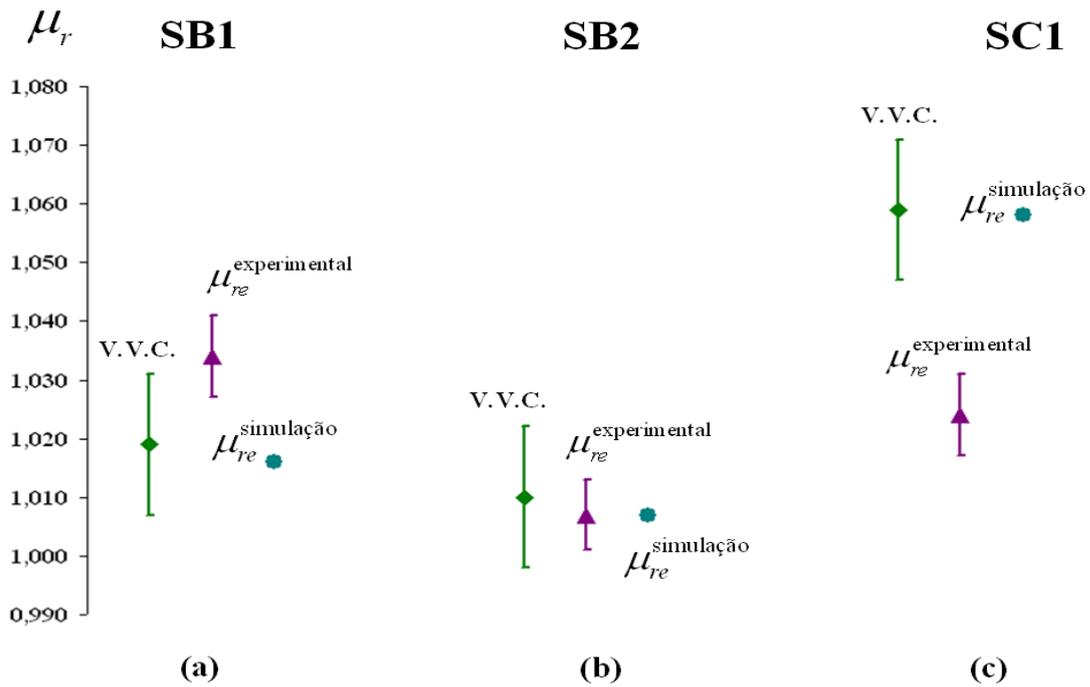


Figura 9-7. Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) SB1; (b) SB2 e (c) SC1.

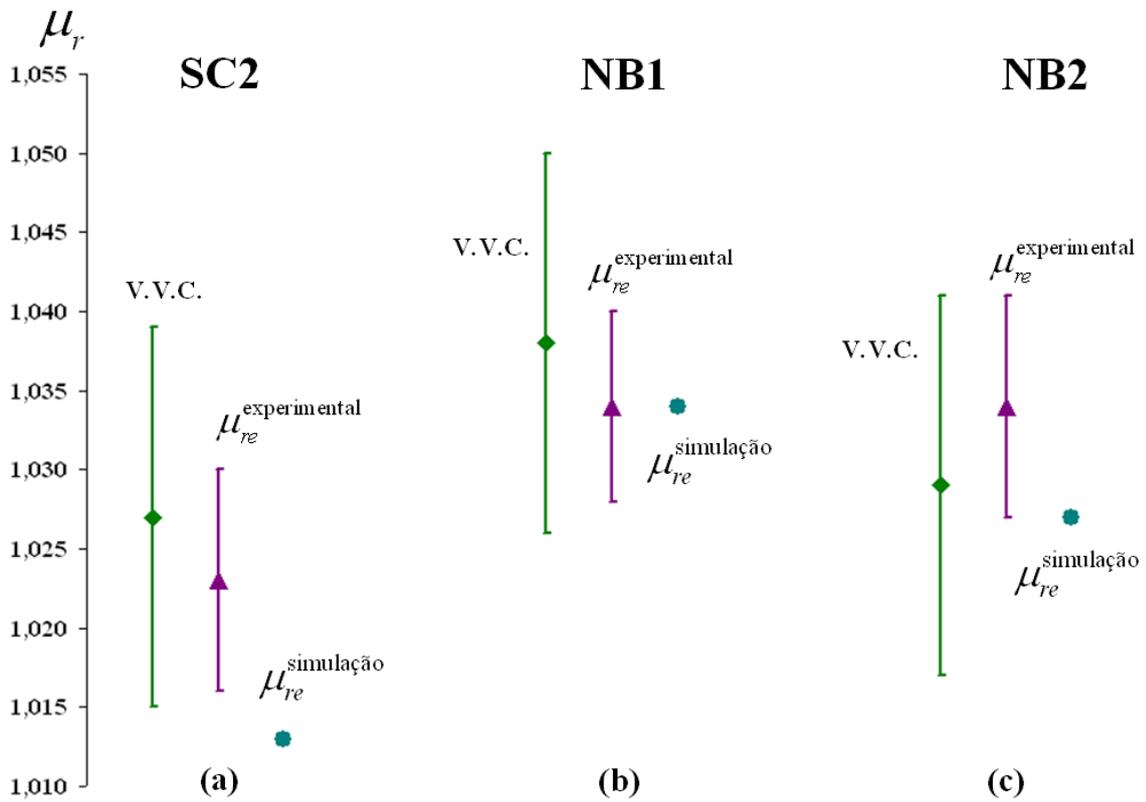


Figura 9-8. Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) SC2; (b) NB1 e (c) NB2.

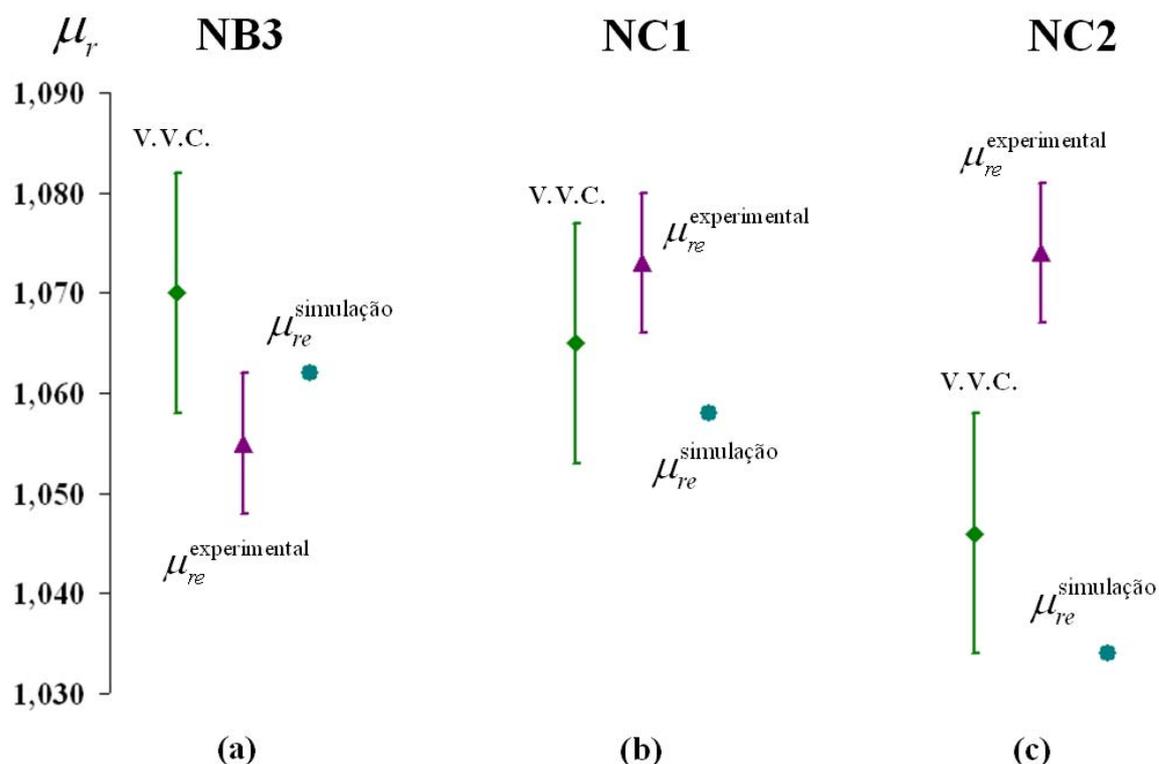


Figura 9-9. Comparação das incertezas na determinação de μ_r para (a) NB3; (b) NC1 e (c) NC2.

Pode observar-se que as incertezas na determinação experimental da permeabilidade de retorno de todas as amostras são mantidas dentro do indicado pelas normas (3%).

9.3 Resultados em relação ao H_c

Os resultados na determinação da coercitividade H_c podem ser vistos na Tabela 9-3.

Tabela 9-3. Comparação numérica das amostras na determinação do H_c .

Joelho no segundo quadrante

| ID Amostra | H_c | | | | |
|------------|----------------|----------------------|--------------|-------------------|--------------|
| | V.V.C. kA/m | Experimental kA/m | $\epsilon\%$ | Simulação kA/m | $\epsilon\%$ |
| FB2 | 260,5 | 291 | 12 | 285,6 | 9,6 |
| NB1 | 929 | 937 | 0,9 | 880 | -5,3 |
| NB3 | 911 | 922 | 1,2 | 884 | -2,9 |
| NC1 | 934 | 948 | 1,5 | 897 | -4,0 |
| SB1 | 666 | 656 | -1,5 | 624 | -6,2 |
| SC2 | 741 | 744 | 0,4 | 732 | -1,2 |

Erro experimental < 2% das normas

Como mencionado em 4.5.2 a determinação da intensidade de campo magnético coercitivo H_c dentro do estabelecido pelas normas depende da total linearidade da desmagnetização do ímã permanente no segundo quadrante. Se acontecer alguma não linearidade na faixa de

temperaturas definida pelas normas (o caso dos ímãs de ferrite), o valor determinado pelo HEV é informado como aparente. No caso atual, o ímã cerâmico FB2 apresenta erro de estimação em mais de 10%.

A comparação das incertezas na determinação da coercitividade magnética para algumas amostras pode ser apreciada na Figura 9-10.

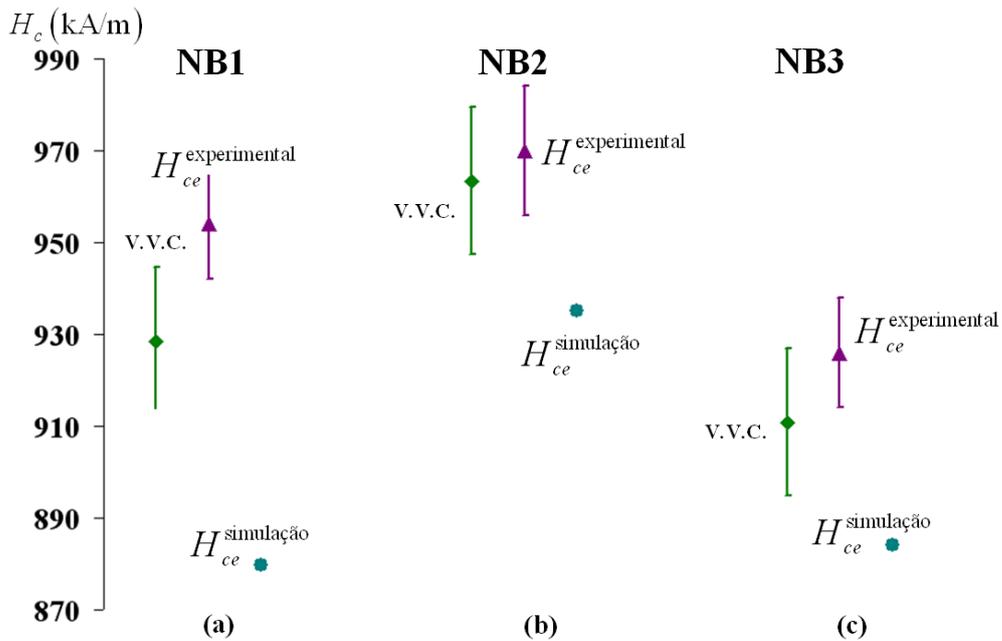


Figura 9-10. Comparação das incertezas na determinação de H_c para (a) NB1; (b) NB2 e (c) NB3.

As incertezas na determinação experimental da coercitividade mantiveram-se dentro do indicado pelas normas para os ímãs de Terras Raras (2%).

9.4 Resultados em relação ao $(BH)_{max}$

Uma comparação de todas as amostras relativa aos resultados do máximo produto energético $(BH)_{max}$ é apresentada na Tabela 9-4.

Tabela 9-4. Comparação numérica das amostras na determinação do $(BH)_{max}$.

| ID Amostra | $(BH)_{max}$ | | | | |
|------------|-----------------|-----------------|--------------|-----------------|--------------|
| | V.V.C. | Experimental | | Simulação | |
| | kJ/m^3 | kJ/m^3 | $\epsilon\%$ | kJ/m^3 | $\epsilon\%$ |
| FB2 | 28,25 | 27,8 | -1,6 | 26,42 | -6,5 |
| NB1 | 283,6 | 290 | 2,4 | 251,4 | -11,4 |
| NB3 | 276,3 | 283 | 2,4 | 260,8 | -5,6 |
| NC1 | 295,2 | 303 | 2,6 | 267,6 | -9,3 |
| SB1 | 140,8 | 141 | 0,1 | 124,4 | -11,7 |
| SC2 | 176,8 | 178 | 0,9 | 170,6 | -3,5 |

Erro experimental < 3% das normas

As incertezas na determinação do máximo produto energético de algumas amostras podem ser comparadas na Figura 9-11 e na Figura 9-12.

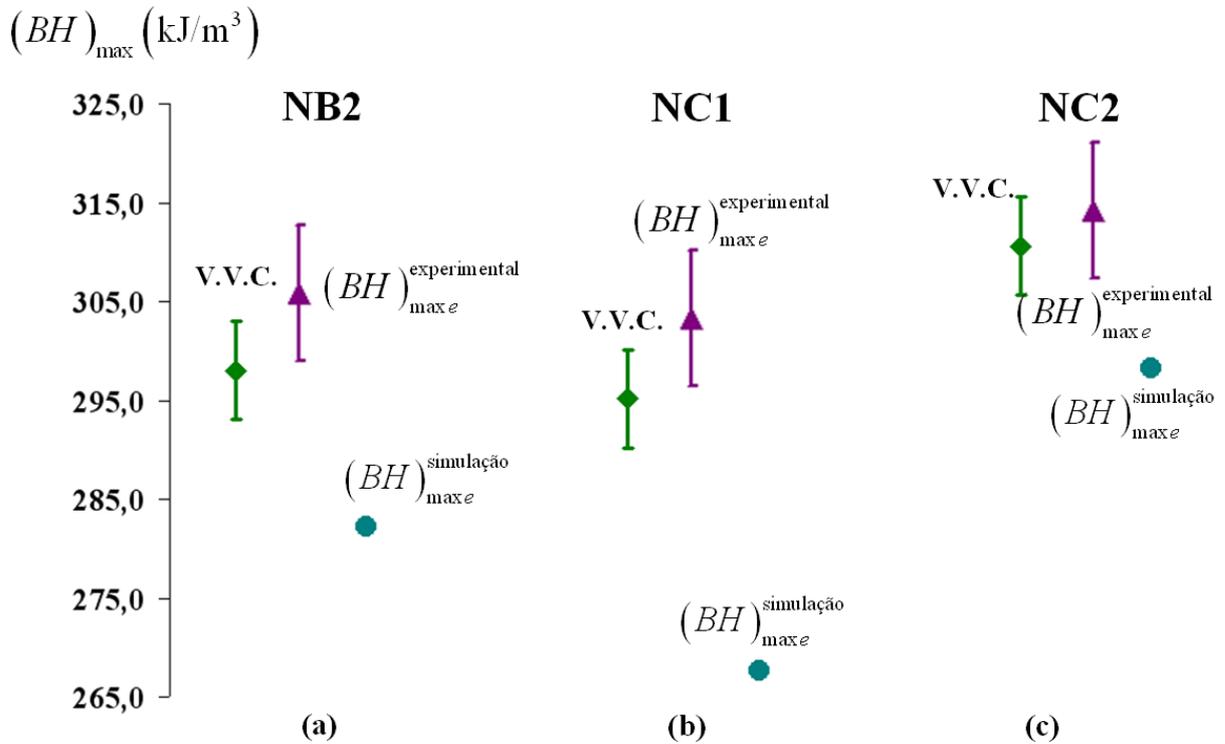


Figura 9-11. Comparação das incertezas na determinação de $(BH)_{\max}$ para (a) NB2, (b) NC1 e (c) NC2.

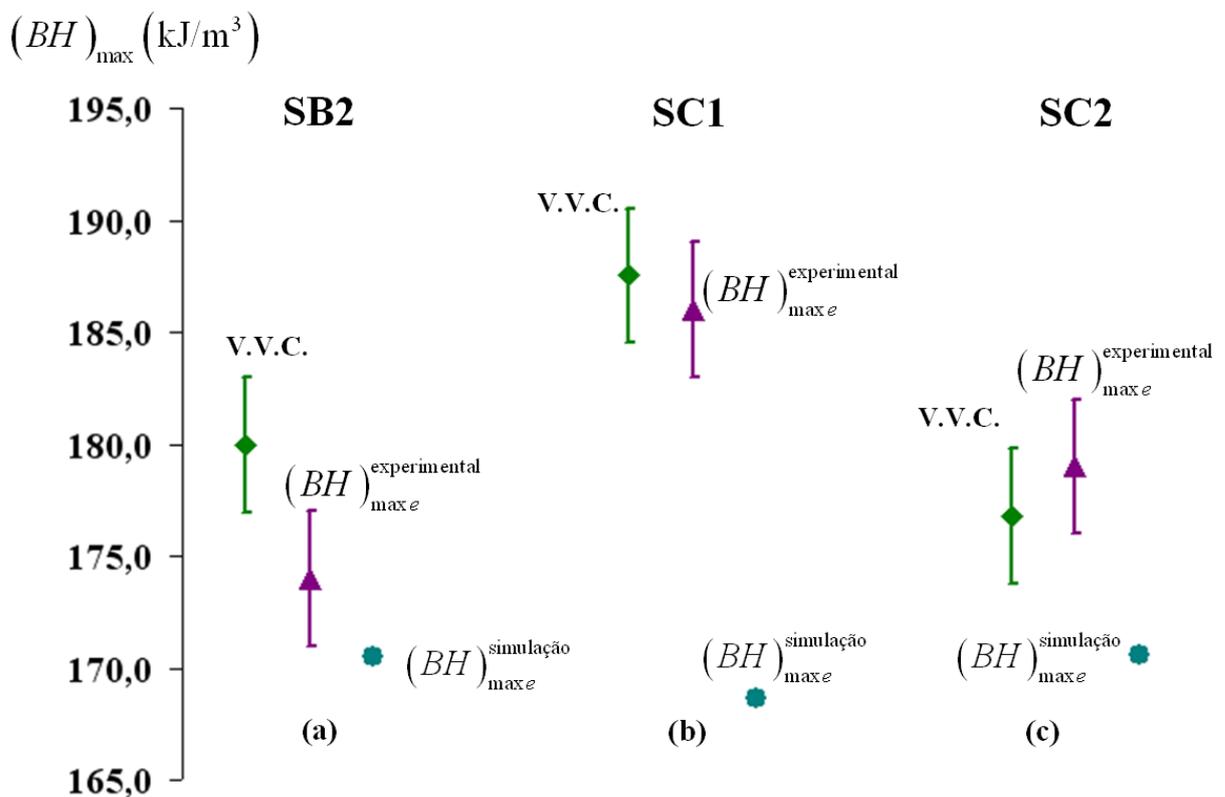


Figura 9-12. Comparação das incertezas na determinação de $(BH)_{\max}$ para (a) SB2, (b) SC1 e (c) SC2.

Em todas as amostras de Terras Raras os resultados experimentais (tanto discrepância como incerteza) foram obtidos dentro do indicado pelas normas. Como nas amostras de ferrite a incerteza da densidade de fluxo remanente foi superior ao valor da norma, isto afetou também à determinação do máximo produto energético.

9.5 Conclusões finais

Tanto na determinação numérica de simulação como na experimental observou-se semelhança nos resultados utilizando indistintamente polo específico à geometria ou polo quadrado Q80 (confirmação tanto na simulação por elementos finitos como experimental).

Em relação aos objetivos inicialmente estabelecidos é possível expressar que o estudo desta nova proposta de histerisímetro para ímãs permanentes com forte influência de anisotropia magneto-cristalina permitiu:

1. Gerar uma revisão dos métodos e instrumentos de caracterização magnética de materiais com forte ênfase nos histerisímetros de circuito magnético fechado.
2. Gerar uma revisão dos principais instrumentos de medição magnética que formam parte dos histerisímetros.
3. Comprovar que tanto o estudo analítico como a simulação por elementos finitos confirmaram as estimações de projeto do circuito magnético proposto como base para o HEV. Embora as dimensões fundamentais da estrutura do circuito magnético do HEV estejam fortemente influenciadas pela necessidade de caracterizar ímãs permanentes com geometrias que permitam a inclusão no entreferro da sonda Hall e bobina fluximétrica, os resultados das análises demonstraram coerência com estas estratégias iniciais.
4. Comprovar que tanto o estudo analítico como a simulação por elementos finitos permite estimar (dentro das condições estabelecidas pelas normas) a densidade de fluxo magnético no entreferro conhecendo o B_r do ímã permanente.
5. Caracterizar ímãs permanentes com desmagnetização linear dentro das especificações das normas para certas restrições de volume da amostra. Para ímãs de Terras Raras de Samário-Cobalto e Neodímio-Ferro-Boro à temperatura ambiente obtiveram-se todos os parâmetros procurados com discrepância e incerteza dentro do estabelecido pelas normas (2% para B_r e H_c e 3% para o $(BH)_{\max}$). Para o ímã cerâmico de 16 cm^3 obte-

ve-se a permeabilidade de retorno μ_r dentro das normas. Ímãs cerâmicos menores que 16 cm^3 foram testados, mas a determinação do B_r precisa de ajuste específico (para cada volume) fora dos determinados para os ímãs anteriores e não foram considerados neste trabalho. Para estes ímãs (FB1 e FC1) somente foram realizados estudos de simulação e determinação experimental de permeabilidade.

6. Efetuar uma análise das incertezas do método implementado no HEV, obtendo-se resultados dentro das especificações das normas.

9.6 Recomendações e sugestões de continuidade

A maior parte do trabalho de medição foi manual, portanto a automatização é uma necessidade para a realização de medidas e processamento das grandezas assim obtidas. São diferentes as áreas do HEV em que podem ser aplicadas técnicas de automatização:

1. Posicionamento do braço central superior móvel.
2. Posicionamento x ; y ; e z da sonda de efeito Hall.

No aspecto referente ao *software*, será necessário implementar detalhes da interface com a eletrônica de comutação da excitação das bobinas magnetizadoras, organizar a base de dados dos instrumentos, das amostras, e a apresentação dos resultados finais.

Dentro do desenvolvimento analítico deverá acrescentar-se um modelo com permeabilidade do ímã diferente da permeabilidade do ar e um modelo com corrente de magnetização e desmagnetização.

Em relação às possibilidades do HEV cabe incluir dentro dos testes amostras de maior volume que o máximo testado (16 cm^3).

Como alternativas na determinação dos parâmetros:

1. Utilizar uma modelagem que considere uma curva de excitação para o HEV de fluxo magnético vs. força magnetomotriz obtida experimentalmente.
2. Usando bobina compensada e fluxímetro para obter a variação de fluxo magnético durante o fechamento do entreferro.
3. Usando a (3-39) com modificações de L_f como função do entreferro, o C_f como função do fator desmagnetizante do ímã permanente e com os pontos medidos de B_g em fun-

ção de l_g , obter um sistema de equações compatível com o número de incógnitas que se quer calcular.

Em relação à determinação das incertezas, analisar o uso do método de Monte Carlo.

9.7 Contribuições deste trabalho

Este trabalho contribui científica e tecnologicamente em maneira inovadora nos seguintes aspectos:

1. A determinação da densidade de fluxo magnético remanente sem consumo de energia em processos de magnetização e desmagnetização para amostras de Terras Raras e Cerâmicos (de volume entre 2,5 e 16 cm³) com resultados dentro do estabelecido pelas normas vigentes.
2. A determinação da permeabilidade magnética de retorno de ímãs permanentes de Terras Raras e Cerâmicos (sem restrições de volume) com excitação reduzida com resultados dentro do estabelecido pelas normas vigentes.
3. A determinação da coercitividade e o máximo produto energético de ímãs permanentes de Terras Raras e Cerâmicos (com volume de 2,5 a 16 cm³) sem desmagnetizar as amostras, evitando assim a necessidade de uma nova re-magnetização e da determinação da incerteza correspondente.

Desta forma, apresenta-se uma solução original apoiada e validada pelos resultados apresentados, mas menos onerosa que as tradicionais, e sem que com isso haja perda maior de qualidade do processo de caracterização desses ímãs permanentes de acordo com as condições adotadas.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Guia para a expressão da incerteza de medição**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1998.

ANOCIBAR, H. R. **Histerisímetro de entreferro variável HEV**: uma proposta alternativa para a caracterização de ímãs permanentes. 2007. 138 f. Tese (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ANOCIBAR, H. R., FLORES FILHO, Á. F., HOMRICH, R. P. Variable air-gap hysteresimeter: an alternative method for the characterization of permanent magnets. **Journal of Microwaves and Optoelectronics**, [S. l.], v.8, n. 1, p.26S - 37S, June 2009. Disponível em: http://www.sel.eesc.usp.br/jmo/issues/vol_8/v8_n1_paper_pdf/Special_issue/v8n1a3S.pdf Acesso em: 8 fev. 2010.

ANOCIBAR, H. R., GARASSINO, S. A., KURTZ, V. H. Análisis didáctico de la utilización de programas de simulación en la enseñanza de electricidad y electrónica en carreras de ingeniería. **Revista Argentina de Enseñanza de la Ingeniería**, Río Cuarto, v. 05, n. 08, p. 7-17, jun. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A341**: Standard test method for direct current magnetic properties of materials using D-C permeameters and the ballistic test methods. West Conshohocken, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM A977**: Standard test method for magnetic properties of high-coercivity permanent magnet materials using hysteresigraphs. West Conshohocken, 2007.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E29**: Standard practice for using significant digits in test data to determine conformance with specifications. West Conshohocken, 2002.

BALBINOT, A., BRUSAMARELLO, V. J. **Instrumentação e fundamentos de medidas**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010. 385 p.

BOZORTH, R. M. **Ferromagnetism**. New York: IEEE Press, 1993. 968 p.

COMMITTEE ON DATA FOR SCIENCE AND TECHNOLOGY (CODATA). **Databases and database issues**. Disponível em: <http://www.codata.org/resources/databases/index.html>. Acesso em: 15 jan. 2011.

CULLITY, B. D. **Introduction to magnetic materials**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1972. 666 p.

DOEBELIN, E. O. **Measurement systems: application and design**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2004. 876 p.

DRAFTS, B. **Understanding Hall Effect Devices**. Disponível em: <http://www.testequipmentdatasheets.com/index_cards/F/FW_Bell/Hall.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2009.

EAMAGNETICS. Disponível em: <<http://www.eamagnetics.com>>. Acesso em: 2 mar. 2007.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao magnetismo dos materiais**. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 192 p.

FIDLER, J. **Magnetic bulk materials**. Disponível em: <<http://magnet.atp.tuwien.ac.at>>. Acesso em: 9 nov. 2009.

FIORILLO, F. **Measurement and characterization of magnetic materials**. Amsterdam: Elsevier, 2004. 647 p.

FIORILLO, F., et al. Measuring the hysteresis loop of permanent magnets with the pulsed field magnetometer. **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 29, n. 6. p. 2980-2982, nov. 1993.

FLORES FILHO, A. F.; ANOCIBAR, H. R. Histerisímetro de entreferro variável HEV: uma alternativa para caracterização de ímãs permanentes. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ELETROMAGNETISMO, 8., 2008, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: UFSC, PUC Rio, 2008. p. 310-314.

FLORES FILHO, A. F.; ANOCIBAR, H. R. Histerisímetro de entreferro variável HEV: alternativa para a caracterização de ímãs permanentes sem desmagnetização irreversível. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: UNESP, UFMS, 2010. p. 629-634.

FLORES FILHO, A. F. **Investigation of a double armature homopolar brushless D.C. linear motor**. 1996. 192 f. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, University of Wales College of Cardiff, Cardiff, 1996.

FURLANI, E. P. **Permanent magnet and electromechanical devices: materials, analysis, and applications**. San Diego: Academic Press, 2001. 519 p.

GRÖSSINGER, R. Pulsed field magnetometry. **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 29, n. 6. p. 2980-2982, nov. 1993.

GUIDE to the expression of uncertainty in measurement (Gum). Disponível em: <http://www.bipm.org/utis/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf>. Acesso: em 25 maio 2010.

HAUS, H. A., MELCHER, J. R. **Electromagnetic fields and energy**. Hypermedia teaching facility, MIT. Disponível em: <http://web.mit.edu/6.013_book/www/book.html>. Acesso: em 17 mar. 2008.

IDA, N., Bastos, J. **Electromagnetics and calculation of fields**. New York, Springer-Verlag, 1997. 565 p.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC404-5: Magnetic materials – Part 5: permanent magnet (magnetically hard) materials: methods of measurement of magnetic properties**, Geneva, 1993.

JACKSON, J. D. **Classical electrodynamics**. Berkeley: John Wiley & Sons, 1998.

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. London: Chapman & Hall, 1991. 397 p.

KEITHLEY, J. F. **The story of electrical and magnetic measurements**. New York: IEEE Press, 1999. 240 p.

LONDON, I. Where are all those needed rare earths coming from? **Magnetics Business & Technology**, [S.l.], p.40-41, jan. 2009. Disponível em: <www.magneticsmagazine.com>. Acesso em: 9 jun. 2010.

MAGNAWORKS. Disponível em: <<http://www.magnaworkstechnology.com/>>. Acesso em: 12 nov. 2010.

MAGNET-PHYSIK. Disponível em: <www.magnet-physik.de>. Acesso em: 5 out. 2010.

MANDEL, J. **The statistical analysis of experimental Data**. New York: Dover Publications, INC., 1964. 410 p.

MATHWORKS Curve Fitting Tool. Disponível em: <http://hug.phys.huji.ac.il/PHYS_HUG/MAABADA/Mabada_b/curve%20fitting%20in%20Matlab.pdf>. Acesso em: 23 jan. 2011.

MILLER, T. J. E. **Brushless permanent-magnet and reluctance motor drives**. Oxford: Clarendon Press, 1993. 207 p.

NIST/SEMATECH e-Handbook of statistical methods. Disponível em: <<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>. Acesso em: 25 jan. 2011.

PARKER, R. J. **Advances in permanent magnet**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 337 p.

PHYSICS.KENYON.EDU. Disponível em: <http://physics.kenyon.edu/EarlyApparatus/Electricity/Rowlands_Ring/Rowlands_Ring.html>. Acesso em: 2 jun. 2011.

SADIKU, M. N. O. **Numerical techniques in electromagnetics with MatLab**. Boca Raton: CRC Press, 2009. 710 p.

SALON, S. J., **Finite element analysis of electrical machines**. Dordrecht: Kluwer, 1995, p. 247.

SANFORD, R. L., WINTER, P. H. A permeameter for magnetic testing at magnetizing forces up to 300 Oersteds, **Journal of Research of the National Bureau of Standards**, Washington, v. 45, p.17-21, July 1950.

SANFORD, R. L., Basic magnetic quantities and the measurement of the magnetic properties of materials. **National Bureau of Standards Monograph**. Washington: U.S. Government Printing Office, n. 47, 44 p., May 1962.

SCHOESSOW, P.; et al. Toroid magnetic measurements. NUMI-L-347, 1998. Disponível em: <<http://minos-docdb.fnal.gov/0003/000347/001/numi0347.ps.gz>>. Acesso em 5 out. 2006.

SILVEIRA, M. A. da. **Estudo de um atuador planar**. 2003. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

STEINGROEVER, E., GUNNAR, R. **Magnetic measuring techniques**. Magnet-Physik, Köln: [s.n.], 2008, 68 p.

TAYLOR, J. R. **An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements**. Sausalito: University Science Books, 1997, 349 p.

UFRGS. Laboratório de Máquinas Elétricas Acionamento e Energia (Porto Alegre, RS). Ály Ferreira Flores Filho; Héctor Rolando Anocibar. **Equipamento e método para a caracterização de ímãs permanentes**. BR n. PI 0903083-2, 22 jan. 2009.

UNITED KINGDOM ACCESS SERVICE (UKAS) **M3003 The expression of uncertainty and confidence in measurement**. Disponível em: <<http://www.ukas.com/library/Technical-Information/Pubs-Technical-Articles/Pubs-List/M3003.pdf>>. Acesso em: 23 jan. 2011.

VACUUMSCHMELZE. Disponível em: <<http://www.vacuumschmelze.de/dynamic/en/home/researchampinnovation/publications.php>>. Acesso em: 19 maio 2009.

VOCABULÁRIO internacional de termos gerais e fundamentais de metrologia (VIM), Rio de Janeiro: Senai, 2007.

YODER, S., UHRAN, J. Engineering tools: an aid or menace to engineering education. **Frontiers in Education Conference**, 1993. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=405376&tag=1>. Acesso em: 3 set. 2009.

APÊNDICE 1. Expressões do subsistema de medição de H , B e J pelo método fluximétrico.

O integrador Miller básico usado nas medições fluximétricas pode verse na Figura A1-1.

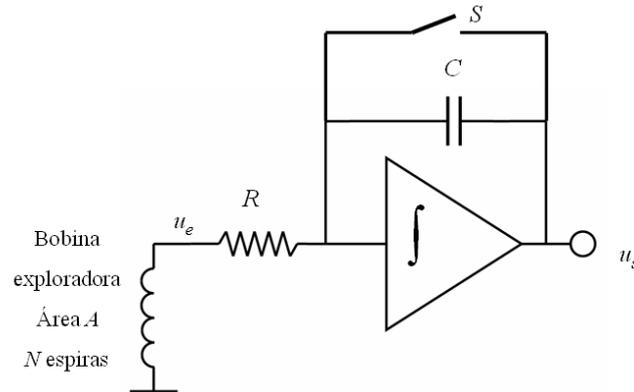


Figura A1-1. Circuito eletrônico integrador Miller.

A variação de fluxo medido com bobina fluximétrica e circuito integrador Miller é:

$$\Delta\phi = \frac{RCu_s}{N} \quad (\text{A1-1})$$

onde R e C são os valores do resistor e do capacitor que determinam a constante de tempo do integrador, u_s a tensão de saída do circuito e N o número de espiras da bobina exploradora.

Para o caso específico da determinação de J com duas bobinas compensadas existem as seguintes possibilidades, para todas elas, a medição de B é feita com a mesma bobina rodeando a amostra:

Caso 1. Bobina H ao redor da amostra sem encerrá-la, produto área espiras das bobinas iguais, cada bobina com seu próprio fluxímetro, Figura A1-2.

Analisando primeiro a bobina B que encerra a amostra, é possível escrever um termo de fluxo magnético no ímã permanente:

$$\phi_m = B_m A_m = \frac{u_{Bm} R_B C_B}{N_B} \quad (\text{A1-2})$$

E outro fluxo externo ao ímã:

$$\phi_{ar} = \mu_0 H (A_B - A_m) = \frac{u_{Bar} R_B C_B}{N_B} \quad (\text{A1-3})$$

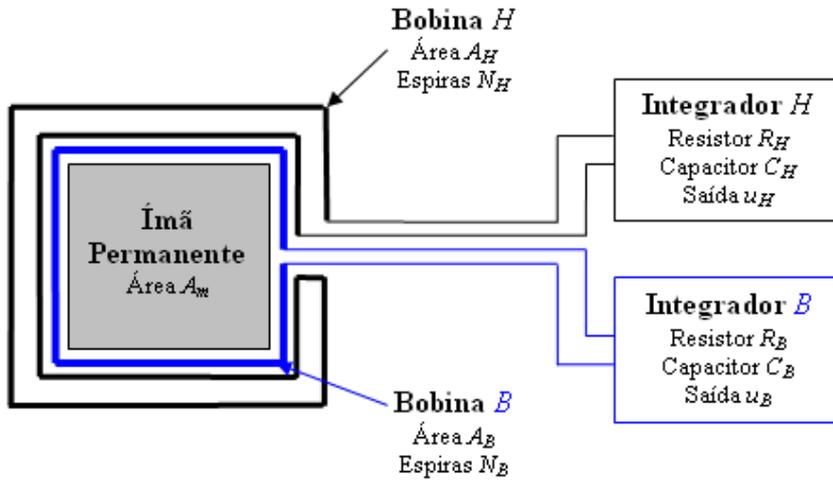


Figura A1-2. Configuração de duas bobinas de igual produto área espiras e dois fluxímetros.

O fluxo total da bobina exploradora B será então:

$$\phi_B = \frac{u_B R_B C_B}{N_B} = B_m A_m + \mu_0 H (A_B - A_m) = B_m A_m + \mu_0 H A_B - \mu_0 H A_m \quad (\text{A1-4})$$

$$\frac{u_B R_B C_B}{N_B} = (B_m - \mu_0 H) A_m + \mu_0 H A_B = J A_m + \mu_0 H A_B$$

Sendo que o campo magnético em que as bobinas estão inseridas pode ser considerado uniforme, o H deve ser tomado como H_m , e lembrando que $J = B_m - \mu_0 H_m$ se terá:

$$\frac{u_B R_B C_B}{N_B} = (B_m - \mu_0 H_m) A_m + \mu_0 H_m A_B = J A_m + \mu_0 H_m A_B \quad (\text{A1-5})$$

$$J = \frac{\frac{u_B R_B C_B}{N_B} - \mu_0 H_m A_B}{A_m} = \frac{u_B R_B C_B - \mu_0 H_m N_B A_B}{N_B A_m}$$

A (A1-4) também se pode escrever

$$B_m = \frac{u_B R_B C_B}{N_B A_m} - \frac{\mu_0 H}{A_m} (A_B - A_m) \quad (\text{A1-6})$$

que é a expressão fluximétrica de B com a correção por fluxo no ar. Observando que a bobina exploradora H não encerra totalmente o espécime:

$$\phi_H = \frac{u_H R_H C_H}{N_H} = \mu_0 H_m A_H \Rightarrow \mu_0 H_m = \frac{u_H R_H C_H}{N_H A_H} \quad (\text{A1-7})$$

Inserindo (A1-7) em (A1-5) têm-se:

$$J = \frac{u_B R_B C_B - \frac{u_H R_H C_H}{N_H A_H} N_B A_B}{N_B A_m} = \frac{u_B R_B C_B N_H A_H - u_H R_H C_H N_B A_B}{N_B A_m N_H A_H} \quad (\text{A1-8})$$

Construindo as bobinas para que os produtos área espiras sejam iguais:

$$N_B A_B = N_H A_H = NA \quad (\text{A1-9})$$

A (A1-8) poderá ser escrita como:

$$J = \frac{u_B R_B C_B NA - u_H R_H C_H NA}{N_B A_m NA} = \frac{u_B R_B C_B - u_H R_H C_H}{N_B A_m} \quad (\text{A1-10})$$

Caso 2. Bobina H ao redor da amostra sem encerrá-la, as duas bobinas requerem condições construtivas específicas e rigorosas (produto área voltas iguais), são conectadas em série oposição a um único fluxímetro, Figura A1-3.

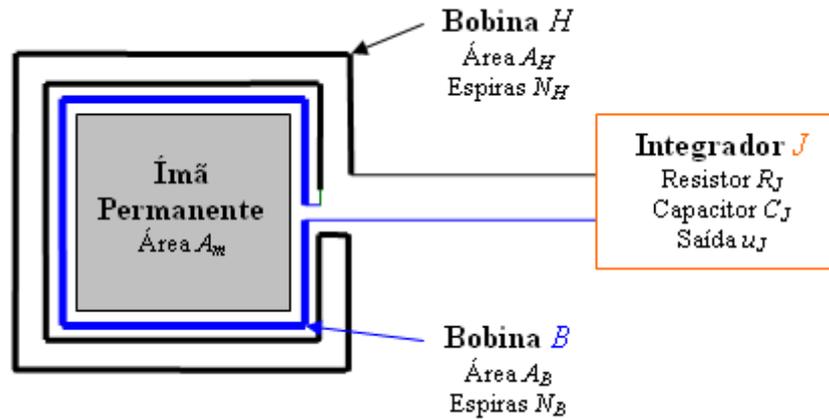


Figura A1-3. Configuração das bobinas em série oposição, igual produto área espiras com único fluxímetro.

Aplicando superposição, primeiro com o sinal da bobina B obtendo o aporte do ímã:

$$B_m A_m N_B = u_{Jm} R_J C_J \quad (\text{A1-11})$$

Agora com o aporte do ar:

$$\mu_0 H_m (A_B - A_m) N_B = u_{Jar} R_J C_J \quad (\text{A1-12})$$

Finalmente com a bobina H :

$$\mu_0 H_m A_H N_H = u_{JH} R_J C_J \quad (\text{A1-13})$$

Os termos da bobina B se somam e logo se restam os da bobina H :

$$\begin{aligned} B_m A_m N_B + \mu_0 H_m (A_B - A_m) N_B - \mu_0 H_m A_H N_H &= u_J R_J C_J \\ B_m A_m N_B + \mu_0 H_m A_B N_B - \mu_0 H_m A_m N_B - \mu_0 H_m A_H N_H &= u_J R_J C_J \\ B_m A_m N_B + \mu_0 H_m (A_B N_B - A_H N_H) - \mu_0 H_m A_m N_B &= u_J R_J C_J \\ (B_m - \mu_0 H_m) A_m N_B + \mu_0 H_m (A_B N_B - A_H N_H) &= u_J R_J C_J \end{aligned} \quad (\text{A1-14})$$

Sendo os produtos área espiras das bobinas iguais $N_B A_B = N_H A_H = NA$:

$$\begin{aligned} (B_m - \mu_0 H_m) A_m N_B &= u_J R_J C_J \\ J A_m N_B = u_J R_J C_J &\Rightarrow J = \frac{u_J R_J C_J}{A_m N_B} \end{aligned} \quad (\text{A1-15})$$

Caso 3. Bobina B e H concêntricas encerrando o espécime, cada uma com seu fluxímetro.

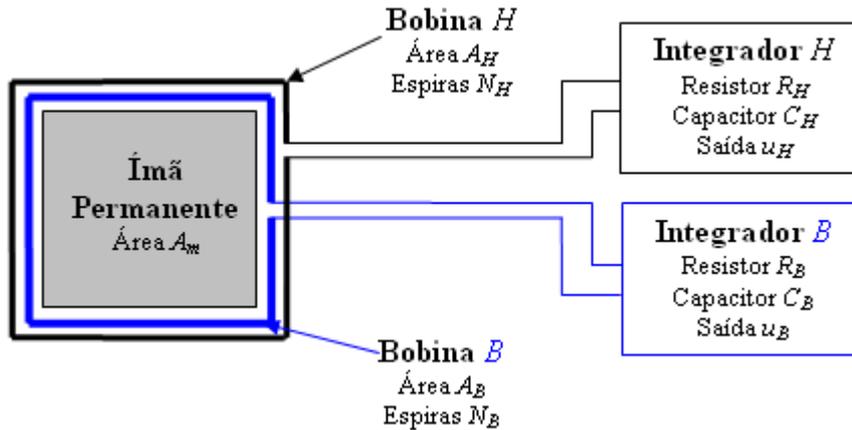


Figura A1-4. Configuração duas bobinas ao redor do ímã com dois fluxímetros.

Novamente a bobina B proporcionará o seguinte sinal:

$$\phi_B = B_m A_m + \mu_0 H_m (A_B - A_m) = \frac{u_B R_B C_B}{N_B} \quad (\text{A1-16})$$

E a bobina H por sua vez:

$$\phi_H = B_m A_m + \mu_0 H_m (A_H - A_m) = \frac{u_H R_H C_H}{N_H} \quad (\text{A1-17})$$

Fazendo (A1-17) menos (A1-16):

$$\phi_H - \phi_J = \frac{u_H R_H C_H}{N_H} - \frac{u_B R_B C_B}{N_B} = B_m A_m + \mu_0 H_m A_H - \mu_0 H_m A_m - B_m A_m -$$

$$\mu_0 H_m A_B + \mu_0 H_m A_m = \mu_0 H_m (A_H - A_B) \Rightarrow \mu_0 H_m = \frac{\frac{u_H R_H C_H}{N_H} - \frac{u_B R_B C_B}{N_B}}{(A_H - A_B)} \quad (\text{A1-18})$$

Inserindo (A1-18) na (A1-16):

$$\frac{u_B R_B C_B}{N_B} - B_m A_m = \frac{\frac{u_H R_H C_H}{N_H} - \frac{u_B R_B C_B}{N_B}}{(A_H - A_B)} (A_B - A_m) \Rightarrow$$

$$B_m = \frac{u_B R_B C_B}{A_m N_B} - \frac{u_H R_H C_H N_B - u_B R_B C_B N_H}{A_m N_B N_H} \frac{(A_B - A_m)}{(A_H - A_B)} \quad (\text{A1-19})$$

$$\phi_m = B_m A_m = \phi_B - \frac{(\phi_H - \phi_B)(A_B - A_m)}{(A_H - A_B)}$$

Página intencionalmente deixada em branco.

APÊNDICE 2. Procedimento de desmagnetização do HEV.

Antes e depois de cada determinação de B_r de uma amostra e que implica a medição de densidade de fluxo com entreferro variável é necessário desmagnetizar a culatra de aço. Para esta operação é possível utilizar o mesmo sistema utilizado para magnetizar e desmagnetizar o circuito magnético fechado na etapa de medição da permeabilidade de retorno. O sistema de magnetização e desmagnetização do HEV pode descrever-se nas seguintes figuras, Figura A2-1, Figura A2-2.

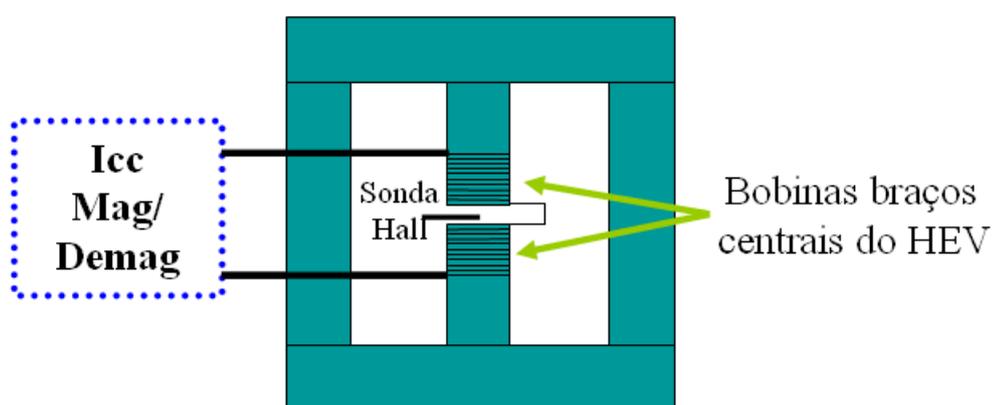


Figura A2-1. Sistema de magnetização e desmagnetização do HEV.

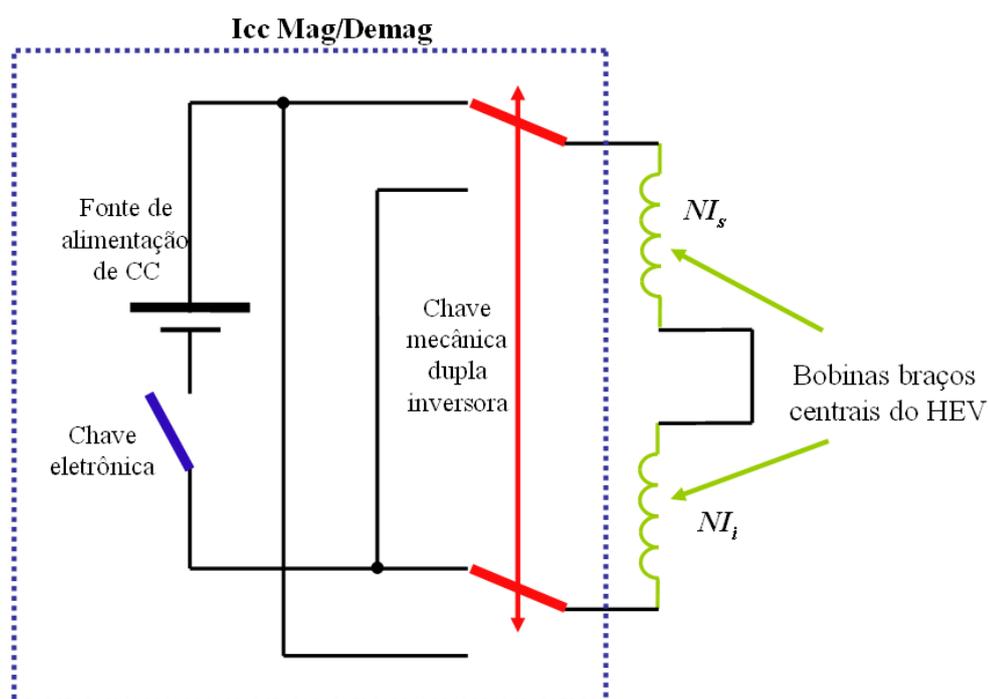


Figura A2-2. Circuito elétrico de magnetização e desmagnetização do HEV.

A estratégia utilizada para desmagnetizar o HEV consiste em aplicar uma excitação alternante com amplitude decrescente (Figura A2-3) e desmagnetizar a culatra de aço antes da medição de densidade de fluxo magnético com entreferro variável.

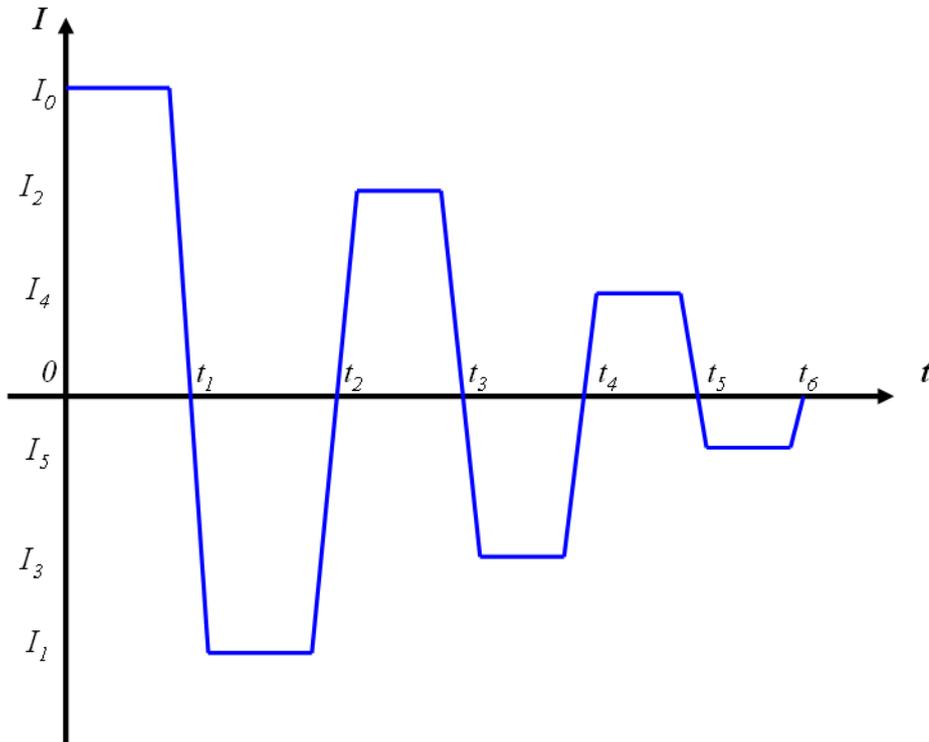


Figura A2-3. Corrente alternante decrescente de desmagnetização do HEV.

Ativando ciclicamente a chave mecânica de inversão e mudando a tensão de saída da fonte de alimentação de CC é possível injetar uma corrente alternante de amplitude decrescente que desmagnetize a culatra do HEV. Utilizando a fonte descrita no capítulo 7, a máxima corrente I_0 é de aproximadamente 20 A, a forma de onda da figura anterior têm cruzamentos por zero cada segundo aproximadamente.

APÊNDICE 3. Arquivos m do modelo analítico da densidade de fluxo magnético no entreferro do HEV.

Código m (Matlab) para obter gráfico em 2D da densidade de fluxo no entreferro.

```
% HEV_HRA_2D_02.m
% Equação analítica da densidade de fluxo magnético no entreferro do HEV
% Gráfico 2D usando cosh.
clc; clf; clear all;
p = 50; % Número de termos da dupla serie de Fourier.
Delta_x = 0.01e-3; % Discretização do eixo x.
x = 0:Delta_x:80e-3; % A variável x numa janela do tamanho da culatra.
z = 40e-3; % Aproveitando a simetria, z fica fixado no centro do ímã.
Br = 1.219; % Densidade de fluxo remanente de um ímã de NdFeB padrão.
mi0 = 4*pi*1e-7; % Permeabilidade do vácuo.
Ms = Br/mi0; % Magnetização de saturação do ímã permanente.
y = 8.5e-3; % Posição da medição analítica, 0,5 mm por cima do ímã.
lmx = 25.4e-3; % Comprimento em x igual ao comprimento em z.
lmy = 8e-3; % Comprimento na direção da magnetização.
lc = 80e-3; % Comprimento da culatra.
lc1 = (lc - lmx)/2; % Extremo esquerdo do ímã.
lg = 1e-3; % Comprimento do entreferro.
Bg = 0; % Zera a variável de cálculo.
    for n = 1:p; % Índice n.
        ns = 2*n-1; % Índice impar do n.
        for m = 1:p % Índice m.
            ms = 2*m-1; % Índice impar do m.
            k = pi*sqrt(ns^2 + ms^2)/lc; % Coeficiente k
% Declaração da função
            Bg = Bg + ((cosh(k*(y+lmy))-cosh(k*(y-lmy-2*lg)))+...
                cosh(k*(y-3*lmy-2*lg))-cosh(k*(y-lmy)))*...
                cos(ms*pi*lc1/lc)*cos(ns*pi*lc1/lc)*sin(ms*pi*x/lc)*...
                sin(ns*pi*z/lc))/(ms*ns*(cosh(2*k*(lmy+lg))-1));
            end
        end
    end
    Bg = Bg*8*Ms*mi0/pi^2; % Cálculo final.
plot(x,Bg) % Gráfico da variável.
title('Densidade de Fluxo Magnético no entreferro')
text(0.013,0.4,'y = 8.5 mm; lg = 1 mm ')
text(0.013,0.3,'z = 20 mm; p = 50 ')
xlabel('x(m)'); ylabel('B(T)');
```

Foram testados diferentes valores de discretização do eixo x e a partir de 1 mm já não apresenta mudança do resultado. Na Figura A3-1 são comparados resultados para um entreferro de 1 mm e tomando 5 termos da dupla série de Fourier. Foi necessário aplicar uma polarização de -0,02 T para poder deslocar os traços e observar o efeito de mudar a quantidade de pontos em x .

Uma vez determinado um valor conveniente de discretização ($\Delta x = 0,01$ mm), procedeu-se a mudar os valores de p (quantidade de termos da dupla série de Fourier). Na Figura A3-2 é possível ver que a partir de $p = 25$ a forma e o valor de B no centro geométrico não

mudam significativamente. Para observar melhor o efeito será apresentada uma tabela com valores de B no lugar de interesse para valores de p desde 10 até 100 e logo visualizado o efeito num gráfico.

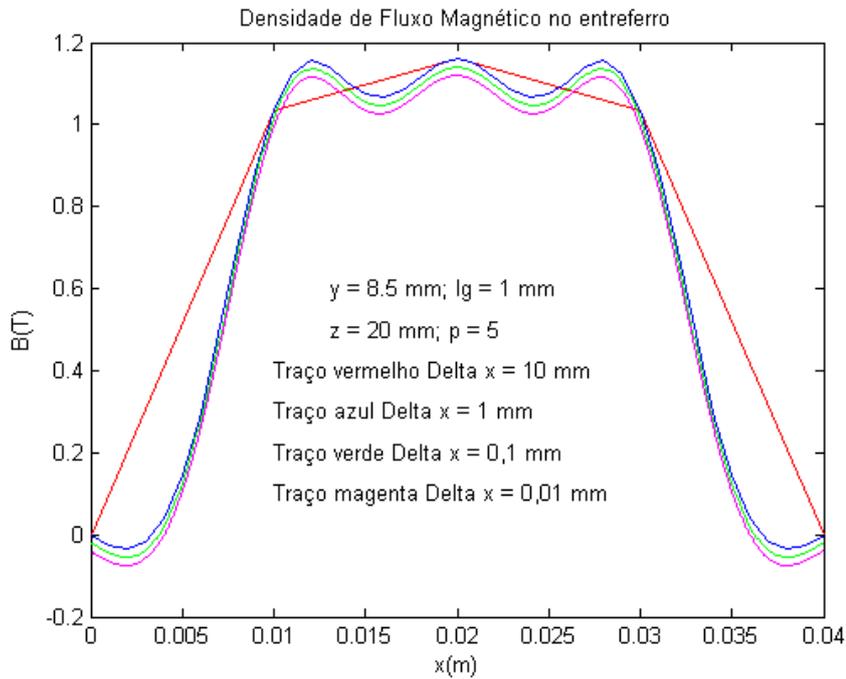


Figura A3-1. Comparação dos efeitos no gráfico com a discretização do eixo x . A partir de $\Delta x = 1 \text{ mm}$ não muda a curva obtida, foi preciso deslocar artificialmente as últimas três curvas em $-0,02 \text{ T}$ para poder apreciar o efeito.

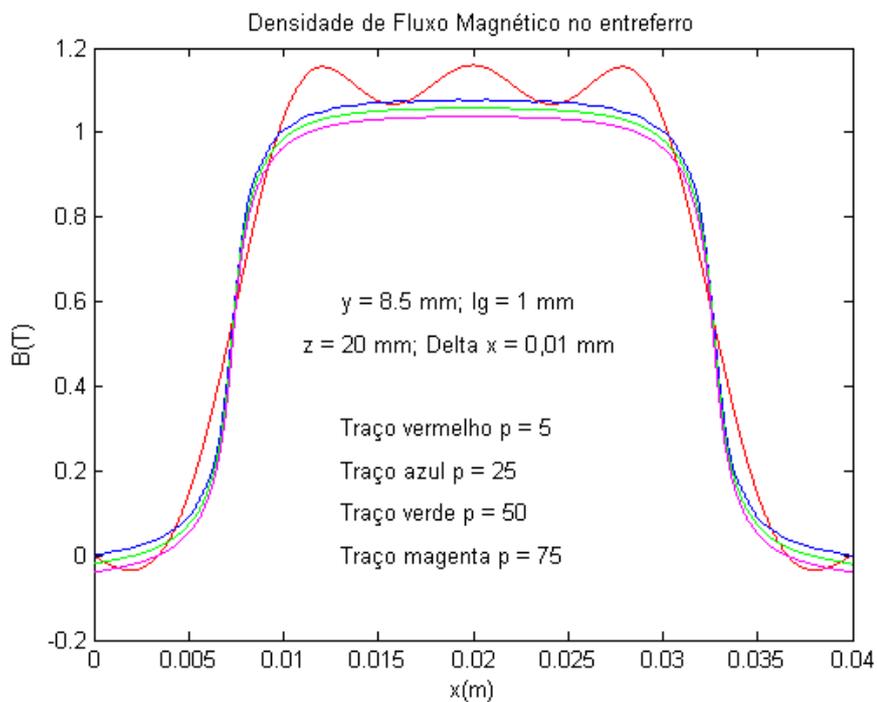


Figura A3-2. Comparação dos efeitos no gráfico com diferentes quantidades de termos na dupla série de Fourier. A partir de $p = 25$ não se observa mudança na forma da curva, porém a partir de $p = 50$ os valores no centro geométrico não mudam de valor.

Observa-se da Tabela A3-1 e do gráfico na Figura A3-3 que o valor de B atinge um valor estável a partir de $p = 50$, portanto esse será o valor adotado nas diferentes curvas para diferentes entreferros.

Tabela A3-1. Densidade de fluxo magnético no entreferro para diferentes números de termos da dupla série de Fourier.

| p (número de termos da série dupla de Fourier) | B_{gy}^a Densidade de fluxo magnético no entreferro (centro geométrico e $l_g = 1$ mm) |
|---|---|
| 10 | 1,0768 |
| 20 | 1,0803 |
| 30 | 1,0790 |
| 40 | 1,0777 |
| 50 | 1,0775 |
| 60 | 1,0775 |
| 70 | 1,0775 |
| 80 | 1,0775 |
| 90 | 1,0775 |
| 100 | 1,0775 |

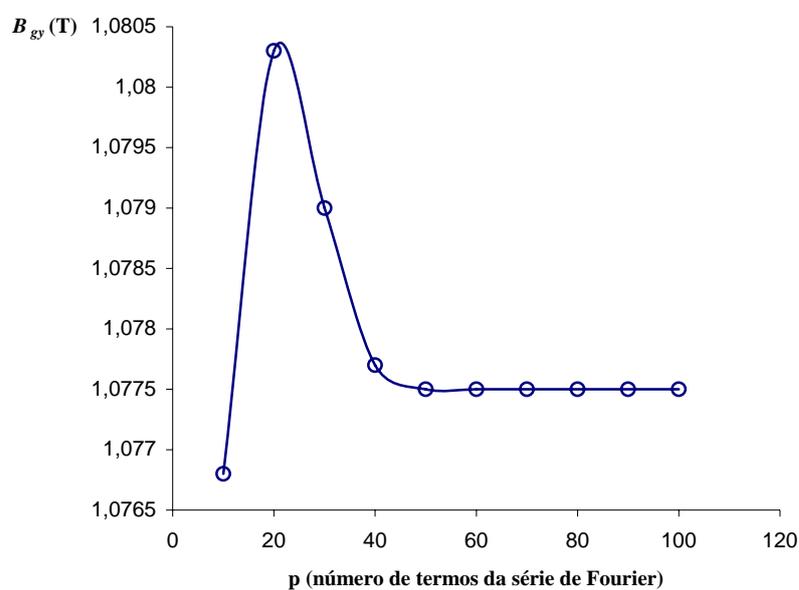


Figura A3-3. Efeito do número de termos na dupla série de Fourier no valor do B no centro geométrico do entreferro.

Código m (Matlab) para obter gráfico em 3D da densidade de fluxo no entreferro.

```

% HEV_HRA_3D_02.m
% Equação analítica da densidade de fluxo magnético no entreferro do HEV
% Gráfico 3D usando cosh
clc;clf;clear all;
a = 80e-3; b = 80e-3; na = 80; nb = 80; % Grade de geração do gráfico.
x = linspace(0,a,na);
z = linspace(0,b,nb);
[X,Z] = meshgrid(x,z);
p = 50; % Número de termos da dupla serie de Fourier.
Br = 1.219; % Densidade de fluxo remanente dum ímã de NdFeB padrão.
mi0 = 4*pi*1e-7; % Permeabilidade do vácuo.
Ms = Br/mi0; % Magnetização de saturação do ímã permanente.
lmx = 25.4e-3; % Comprimento do ímã em x igual ao comprimento em z.
lg = 1e-3; % Comprimento do entreferro.
lmy = 8e-3; % Comprimento na direção da magnetização.
y = 8.5e-3; % Posição da medição analítica, 0,5 mm por cima do ímã.
lc = 80e-3; % Comprimento da culatra.
lcl = (lc - lmx)/2; % Extremo esquerdo do ímã.
for i = 1:nb; % Índice i para gerar a grade.
    for j = 1:na; % Índice j para gerar a grade.
        Bg(i,j) = 0; % Zera a variável de cálculo.
        for n = 1:p % Índice n.
            ns = 2*n-1; % Índice ímpar do n.
            for m = 1:p; % Índice m.
                ms = 2*m-1; % Índice ímpar do m.
                k = pi*sqrt(ns^2 + ms^2)/lc; % Coeficiente k.
% Declaração da função.
                Bg(i,j) = Bg(i,j) + ((cosh(k*(y+lmy))-cosh(k*(y-lmy-2*lg)))+...
                    cosh(k*(y-3*lmy-2*lg))-cosh(k*(y-lmy)))*...
                    cos(ms*pi*lcl/lc)*cos(ns*pi*lcl/lc)*sin(ms*pi*X(i,j)/lc)*...
                    sin(ns*pi*Z(i,j)/lc))/(ms*ns*(cosh(2*k*(lmy+lg))-1));
            end
        end
        Bg(i,j) = Bg(i,j)*8*Ms*mi0/pi^2; % Cálculo final.
    end
end
end
mesh(X, Z, Bg) % Gráfico da variável.
%colormap(gray);
%surfl(X, Z, Bg),shading interp;
%set(gcf,'color',[1 1 1])
title('Densidade de Fluxo Magnético no entreferro')
text(0.015,0.038,1.4,'y = 8,5 mm; lg = 1 mm e p = 50 ')
xlabel('x(m)'); ylabel('z(m)'); zlabel('B(T)')
max(Bg)

```

APÊNDICE 4. Parâmetros e incertezas dimensionais de uma amostra.

Exemplo de determinação das dimensões do ímã NB1

Embora o ímã NB1 usado no presente trabalho seja de tipo bloco quadrado, aos efeitos de apresentar um exemplo de cálculo genérico serão considerados dois lados diferentes l_a e l_b de área polar e l_m de comprimento de magnetização. As medições dimensionais desta amostra realizados com o paquímetro digital não metálico são as apresentadas pela Tabela A4-1.

Tabela A4-1. Dimensões da amostra NB1.

| | l_a (mm) | l_b (mm) | l_m (mm) |
|-------------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 | 40,00 | 40,01 | 5,00 |
| 2 | 40,01 | 40,01 | 5,01 |
| 3 | 40,01 | 40,00 | 5,00 |
| 4 | 40,01 | 40,00 | 5,00 |
| 5 | 40,00 | 40,00 | 5,00 |
| 6 | 40,00 | 40,01 | 5,00 |
| 7 | 40,01 | 40,00 | 5,01 |
| 8 | 40,00 | 40,00 | 5,00 |
| 9 | 40,00 | 40,00 | 5,00 |
| 10 | 40,00 | 40,00 | 5,00 |
| N | 10 | 10 | 10 |
| Média | 40,004 | 40,003 | 5,002 |
| Desvio Padrão $s(l)$ | $5,164 \times 10^{-3}$ | $4,830 \times 10^{-3}$ | $4,216 \times 10^{-3}$ |
| Desvio Padrão da Média $u(\bar{l})$ | $1,633 \times 10^{-3}$ | $1,528 \times 10^{-3}$ | $1,333 \times 10^{-3}$ |

As leituras de comprimento feitas de acordo com a resolução do paquímetro apresentam duas casas decimais e, portanto corresponde considerar para l_a e l_b quatro dígitos significativos e três para l_m .

Conforme a Norma ASTM E 29-02 (ASTM E29, 2002), no resultado da somatória das leituras deve ser considerado o mesmo número de casas decimais que possua a leitura com menor quantidade de casas decimais (igual consideração para a média, que embora seja um quociente, o denominador está formado por uma constante que possui infinitas cifras significativas).

A mesma norma também aconselha que, tratando-se de cálculos intermediários, é melhor utilizar todos os dígitos, e, no final, quando o resultado deve ser apresentado, aplicar as

regras correspondentes de arredondamento. No caso atual, o resultado da média é apresentado com um dígito a mais até a determinação da incerteza combinada.

O passo seguinte é determinar a incerteza combinada para cada comprimento, e para isto é preciso considerar o tratamento estatístico das medições e as especificações do instrumento. Estritamente falando, deveriam ser consideradas outras variáveis (temperatura ambiente, coeficiente de dilatação, etc.) que serão consideradas nesta instância como desprezíveis. Considerando, então, distribuição Gaussiana nas medições, as variáveis como sendo estatisticamente independentes e as avaliações como sendo não correlacionadas:

$$\begin{aligned}
 l_a &= \bar{l}_a + \delta\bar{l} & u_c^2(l_a) &= \left[\frac{\partial l_a}{\partial \bar{l}_a} \right]^2 u^2(\bar{l}_a) + \left[\frac{\partial l_a}{\partial \delta\bar{l}} \right]^2 u^2(\delta\bar{l}) \\
 l_b &= \bar{l}_b + \delta\bar{l} & u_c^2(l_b) &= \left[\frac{\partial l_b}{\partial \bar{l}_b} \right]^2 u^2(\bar{l}_b) + \left[\frac{\partial l_b}{\partial \delta\bar{l}} \right]^2 u^2(\delta\bar{l})
 \end{aligned} \tag{A4-1}$$

\bar{l}_a (\bar{l}_b) é a média aritmética de dez observações repetidas independentes de l_a (l_b) com desvio padrão $s(l_a)$ [$s(l_b)$] e incerteza padrão de Tipo A $u(\bar{l}_a)$ [$u(\bar{l}_b)$]; $\delta\bar{l}$ surge de uma avaliação de Tipo B (não estatística), considerando as especificações do fabricante e que aporta uma adição corretiva com esperança zero e fronteiras simétricas com igual probabilidade de estar em qualquer parte dentro de essa faixa.

Considerando então da Tabela A4-1 as incertezas da média nas medições de l_a e l_b como sendo $u(\bar{l}_a) = 1,633 \times 10^{-3}$ mm e $u(\bar{l}_b) = 1,528 \times 10^{-3}$ mm respectivamente; os coeficientes de

sensibilidade $\frac{\partial l_a}{\partial \bar{l}_a} = \frac{\partial l_b}{\partial \bar{l}_b} = \frac{\partial l_a}{\partial \delta\bar{l}} = \frac{\partial l_b}{\partial \delta\bar{l}} = 1$; as especificações do paquímetro digital Tabela

7-8 do capítulo 7:

$$u_{\text{exatidão}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,02}{\sqrt{3}}; \quad u_{\text{resolução}} = \frac{a}{\sqrt{3}} = \frac{0,005}{\sqrt{3}}; \quad u^2(\delta\bar{l}) = u_{\text{exatidão}}^2 + u_{\text{resolução}}^2 = 0,000142 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned}
 u_c^2(l_a) &= u^2(\bar{l}_a) + u^2(\delta\bar{l}) \Rightarrow u_c(l_a) = 0,01 \text{ mm} \\
 u_c^2(l_b) &= u^2(\bar{l}_b) + u^2(\delta\bar{l}) \Rightarrow u_c(l_b) = 0,01 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{A4-2}$$

A expressão final para os comprimentos dos lados da área polar pode ser escrita como:

$$l_a = l_b = 40,00(0,01) \text{ mm} \quad (\text{A4-3})$$

O número entre parênteses é o valor numérico de u_c (incerteza padrão combinada) expresso na unidade correspondente. Evita-se nesta instância o uso de \pm para não confundir com um intervalo de confiança relacionado com um determinado fator de abrangência.

Na maioria das situações de medição é possível avaliar as incertezas de Tipo B com grande confiabilidade. Além disto, se o procedimento das medições está bem estabelecido e as avaliações de Tipo A são obtidas com um número suficientemente grande de observações, então o uso de um fator $k = 2$ implica que a incerteza expandida U providenciará um intervalo com probabilidade de cobertura perto de 95%.

Isto se deve a que a distribuição tende à normalidade na medida em que o número de observações incrementa-se, lembrando que o fator $k = 2$ corresponde a 95% de confiança para uma distribuição normal.

No entanto, em algumas circunstâncias pode não ser prático basear as avaliações de Tipo A em um grande número de observações, o qual pode resultar numa probabilidade de cobertura significativamente menor que 95% se continua usando-se o fator $k = 2$.

Nessas situações o valor de k , ou mais corretamente k_p onde p é a probabilidade de confiança, deveria basear-se na distribuição t (Student distribution). Este valor de k_p proporcionará uma incerteza expandida U_p que conservara a probabilidade de cobertura em aproximadamente o nível requerido p .

A fim de obter o valor de k_p é necessário obter uma estimativa dos graus efetivos de liberdade ν_{eff} da incerteza padrão combinada $u_c(y)$. O GUM recomenda o uso da fórmula de Welch-Satterthwaite para calcular o valor de ν_{eff} baseada nos graus de liberdade ν_i das incertezas padrões individuais $u_i(y)$:

$$\nu_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{\nu_i}} \quad (\text{A4-4})$$

Mas antes de calcular os graus efetivos de liberdade deve verificar-se que as incertezas são predominantemente com distribuição normal. Observando a planilha de cálculo de incertezas pode-se verificar que o item em relação à incerteza devido à exatidão do paquímetro representa uma porcentagem muito significativa em relação às outras incertezas.

Como orientação, o documento da UKAS M3003 sugere fazer um teste mediante um quociente entre a porção dominante (usualmente retangular) e as restantes, se o resultado é maior que 1,4 deverá fazer-se um quociente com os valores anteriores invertidos e ingressar a uma tabela a fim de obter o correspondente valor do k_p para 95% de probabilidade de confiança (UKAS M3003, 2007).

No caso atual da determinação da incerteza na medição do comprimento l_a seguindo este procedimento sugerido obteve-se um fator $k_p = 1,75$. Multiplicado este fator pela incerteza padrão de 0,01 mm e arredondando para manter a regra dos dígitos significativos:

$$l_a = l_b = (40,00 \pm 0,02) \text{ mm com nível da confiança de 95\%} \quad (\text{A4-5})$$

Exemplo de determinação das incertezas para o cálculo da área polar para o ímã NB1

Para determinar a área polar da amostra é preciso multiplicar os respectivos lados: $A_m = \bar{l}_a \times \bar{l}_b$. O resultado da multiplicação conforme a norma não pode ter mais cifras significativas que qualquer dos números participantes, neste caso o resultado também deverá ter quatro dígitos significativos, ou seja, 1600 mm².

Mas como o objetivo agora é determinar a permeabilidade remanente da amostra, pode-se considerar provisoriamente que o resultado é 1600,3 mm² (resultado de multiplicar as médias provisórias da Tabela A4-1 e arredondamento no quinto dígito significativo). Sendo a área polar do ímã NB1 expressada como:

$$A_m = \bar{l}_a \times \bar{l}_b \quad (\text{A4-6})$$

A incerteza na determinação desta área pode ser expressa considerando distribuição normal e correlação entre as medições de cada lado usando o mesmo instrumento como:

$$u_c^2(A_m) = \left[\frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_a} \right]^2 u_c^2(l_a) + \left[\frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_b} \right]^2 u_c^2(l_b) + 2 \frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_a} \frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_b} u(l_a, l_b) \quad (\text{A4-7})$$

onde $\left[\frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_a} \right]^2 u_c^2(l_a)$ e $\left[\frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_b} \right]^2 u_c^2(l_b)$ são os termos em relação à determinação da incerteza

combinada das medições de comprimento de cada lado; e $2 \frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_a} \frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_b} u(l_a, l_b)$ é o termo em re-

lação à correlação existente devida à utilização do mesmo paquímetro na medição dos dois lados [GUM, 1998]. A covariância estimada entre o lado l_a e o lado l_b será:

$$u(l_a, l_b) = \frac{\partial \bar{l}_a}{\partial \delta \bar{l}} \frac{\partial \bar{l}_b}{\partial \delta \bar{l}} u^2(\delta \bar{l}) \quad (\text{A4-8})$$

Sabendo que:

$$\frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_a} = \bar{l}_b \quad \frac{\partial A_m}{\partial \bar{l}_b} = \bar{l}_a \quad \frac{\partial A_m}{\partial \delta \bar{l}} = \frac{\partial \bar{l}_a}{\partial \delta \bar{l}} = \frac{\partial \bar{l}_b}{\partial \delta \bar{l}} = 1 \quad (\text{A4-9})$$

Substituindo na (A4-7):

$$u_c^2(A_m) = (\bar{l}_b)^2 u_c^2(l_a) + (\bar{l}_a)^2 u_c^2(l_b) + 2u^2(\delta \bar{l}) \quad (\text{A4-10})$$

A expressão final para a área polar pode ser escrita como:

$$A_m = 1600(1) \text{ mm}^2 \quad (\text{A4-11})$$

Considerando um intervalo de confiança baseado nas mesmas considerações feitas para a incerteza na medição dos lados:

$$A_m = (1600 \pm 2) \text{ mm}^2 \text{ com nível da confiança de 95\%} \quad (\text{A4-12})$$

Página intencionalmente deixada em branco.

APÊNDICE 5. Correção dos pontos medidos.

1. Sejam os dados das medições, Figura A5-1:

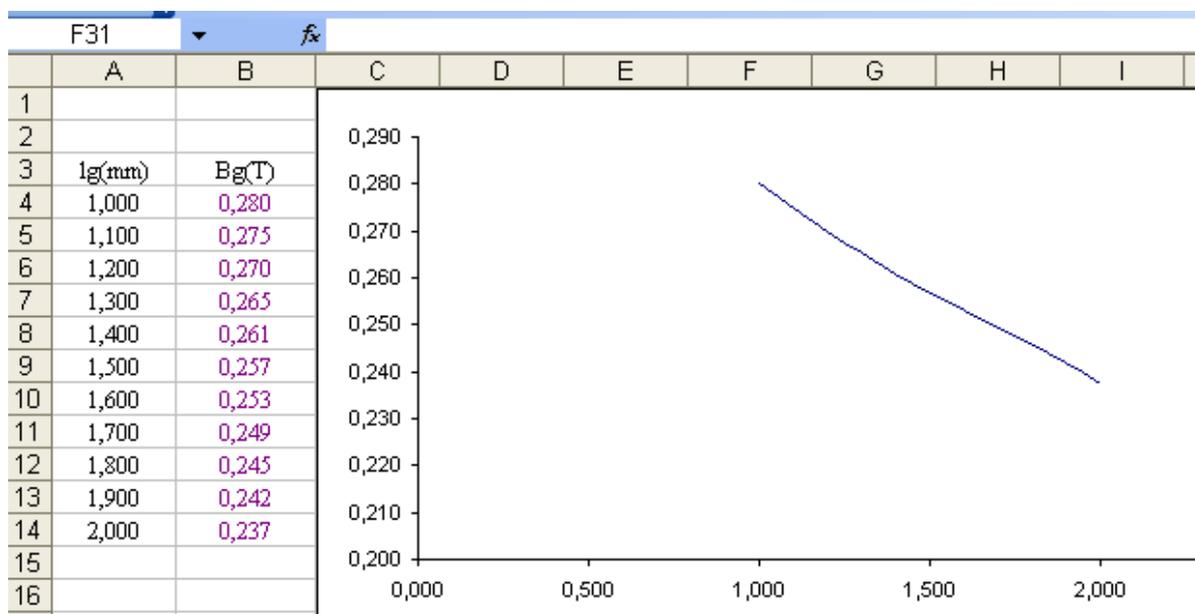


Figura A5-1. Análise por inspeção de uma curva.

Havendo já considerado no capítulo correspondente que o ajuste adequado é de tipo racional constante/linear:

$$B_g(l_g) = \frac{a_1}{b_2 l_g + b_1} = \frac{1}{\frac{b_2}{a_1} l_g + \frac{b_1}{a_1}} = \frac{a_1/b_2}{(l_g + b_1/b_2)} = \frac{p_1}{l_g + q_1} \quad (\text{A5-1})$$

Desta expressão sabe-se que:

$$\lim_{l_g \rightarrow 0} B_g(l_g) = \frac{p_1}{q_1} = B_{re} \quad \text{e} \quad \lim_{l_g \rightarrow \infty} B_g(l_g) = 0 \quad (\text{A5-2})$$

Portanto o modelo será inicialmente: $\hat{y} = \frac{a}{b+x}$ indicando com \hat{y} o valor estimado da variável dependente, neste caso a densidade de fluxo no entreferro.

Na Figura A5-2 incorpora-se a expressão do modelo, calcula-se o erro e o erro quadrático com parâmetros iniciais tentativos unitários. Também se inclui a soma dos erros quadráticos (SSresid) e o gráfico da variável dependente e de seu modelo. Os valores calculados do modelo são conservados um dígito a mais do que das medições conforme norma ASTM E29,

para recém no resultado final realizar o arredondamento final conforme a incerteza determinada:

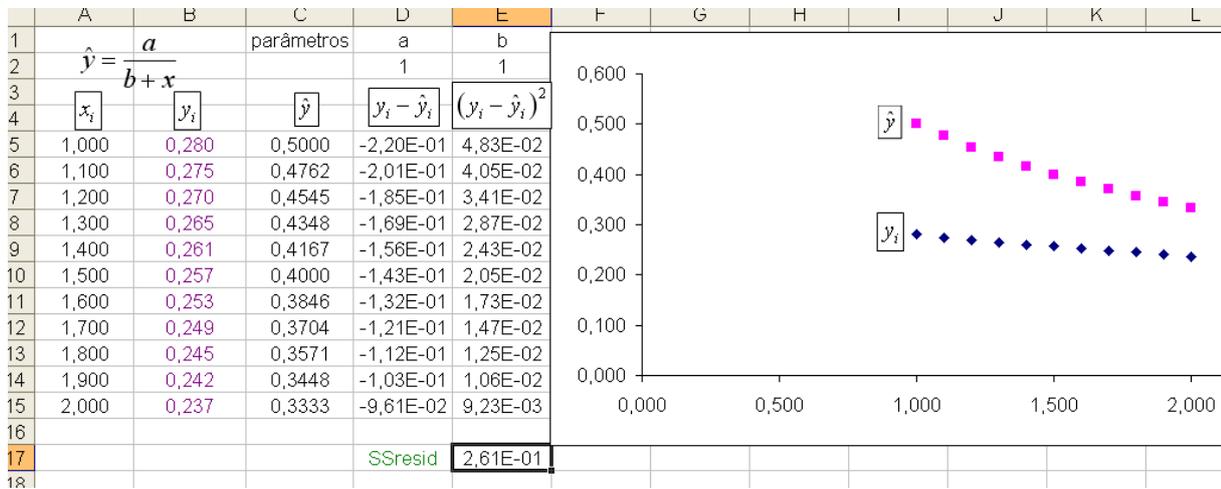


Figura A5-2. Incorporação do modelo.

A seguir é aplicado a essa soma o solver a fim de otimizar os parâmetros a e b de maneira de obter mínimos quadrados,

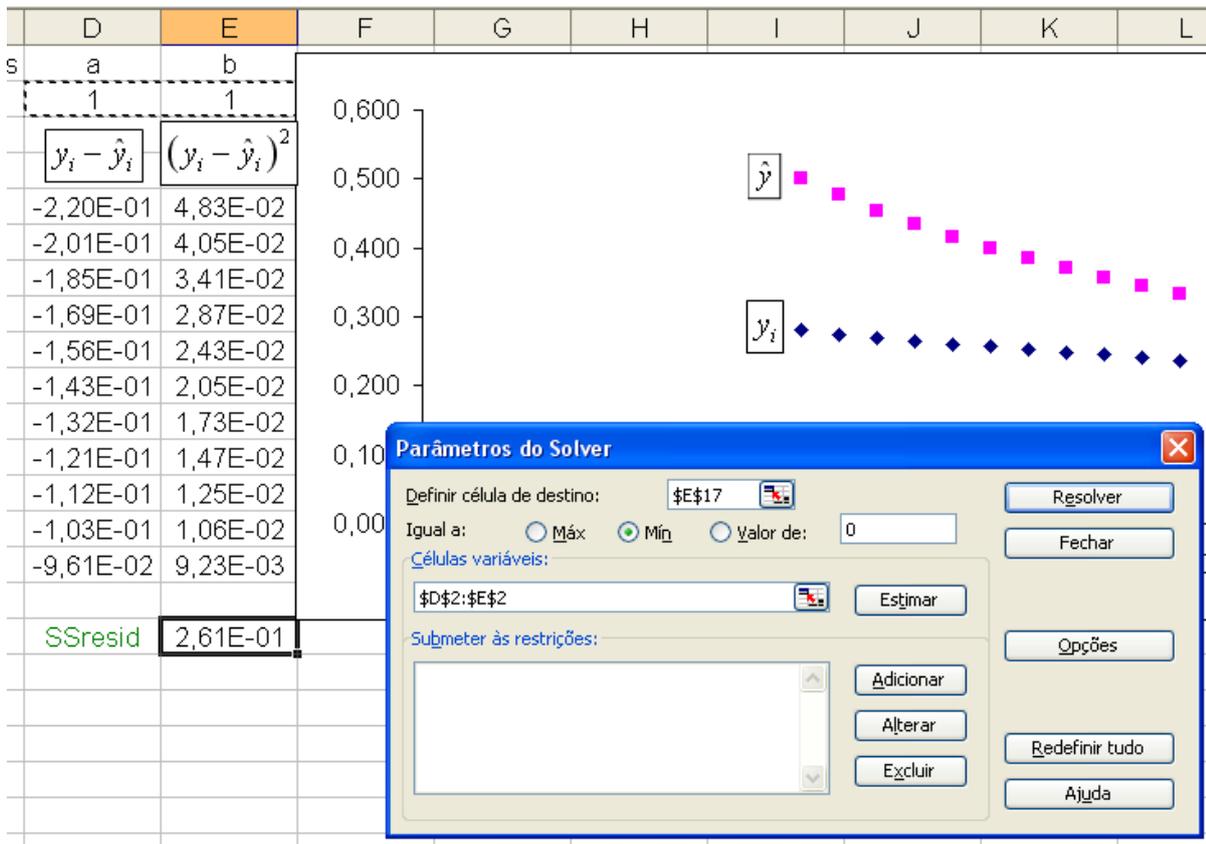


Figura A5-3. Utilização do solver para otimizar a soma dos quadrados.

No momento de dar o comando de Resolver o resultado deve manifestar-se no ajuste das tabelas e do gráfico:

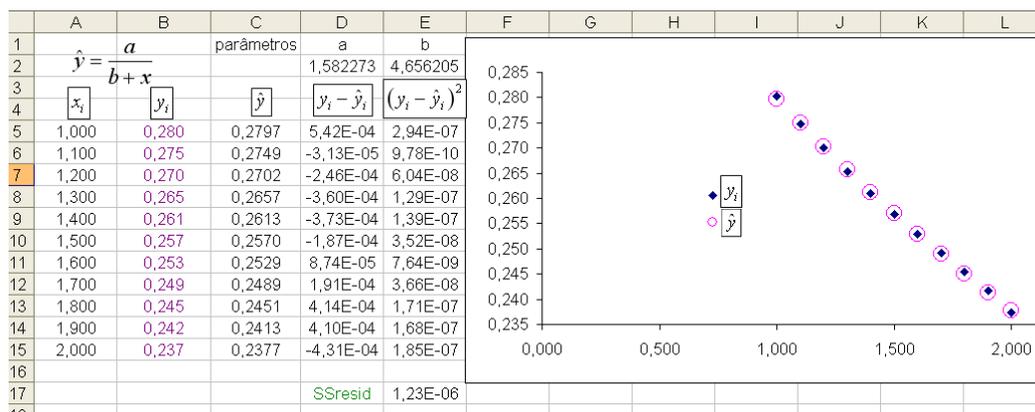


Figura A5-4. Ajuste da curva com modelo racional e mínimos quadrados.

Do processo anterior surge que o parâmetro $a = 1,5823 \text{ T} \cdot \text{mm}$ e o parâmetro $b = 4,6562 \text{ mm}$. O cruzamento no eixo vai se produzir em $x = 0$ e o valor da função $y = a/b$ será de $0,339826$. Sabe-se que o verdadeiro cruzamento deveria acontecer em $y_v = 0,387$. Para esse valor da função existirá um deslocamento:

$$\Delta x = \frac{a}{y_v} - b \quad (\text{A5-3})$$

Aplicando agora esse deslocamento a cada ponto da tabela inicial obtém-se um ajuste que corta o eixo y no valor esperado. Neste caso o valor absoluto da expressão anterior é $0,56757$, portanto a nova tabela com os mesmos valores de y_i terá $x_{I1} = 1,56757$ e $x_{I11} = 2,56757$.

Página intencionalmente deixada em branco.

APÊNDICE 6. Ajuste de curva com o CFTool do Matlab.

1. Sejam os dados das medições e o código m, Figura A6-1:

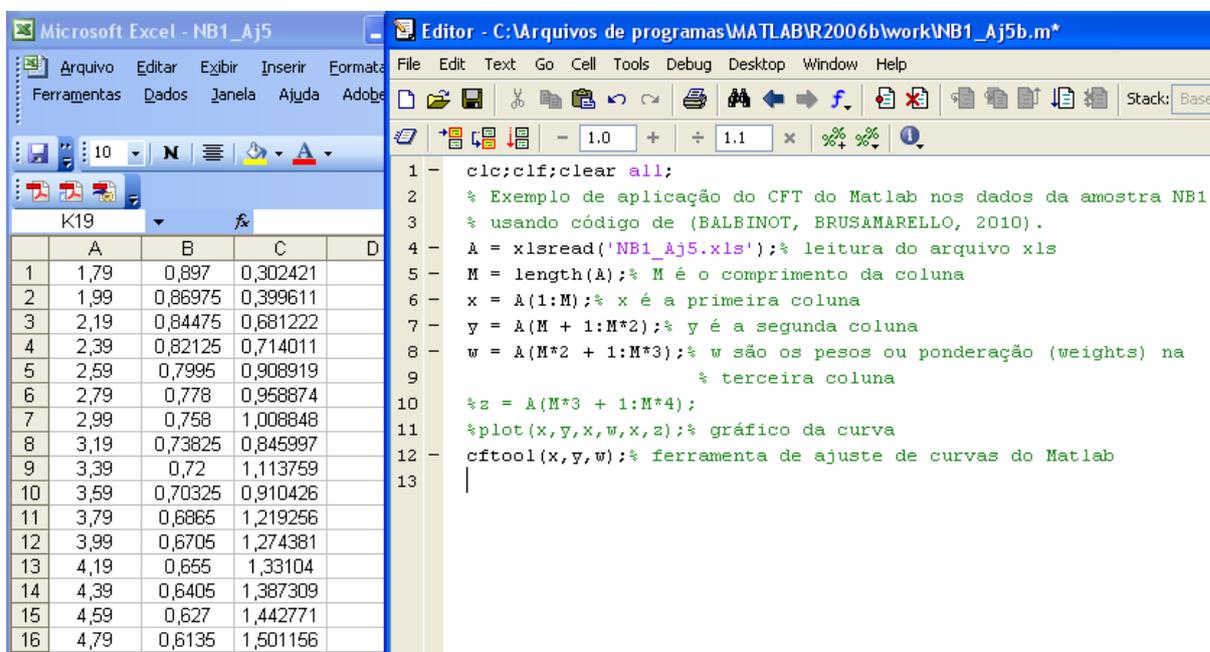


Figura A6-1. (a) Dados das medições e resultados das incertezas do ímã NB1, (b) Código m para a análise desses dados com a ferramenta CFTool do Matlab.

Executando o código com F5, obtem-se a Figura A6-2:

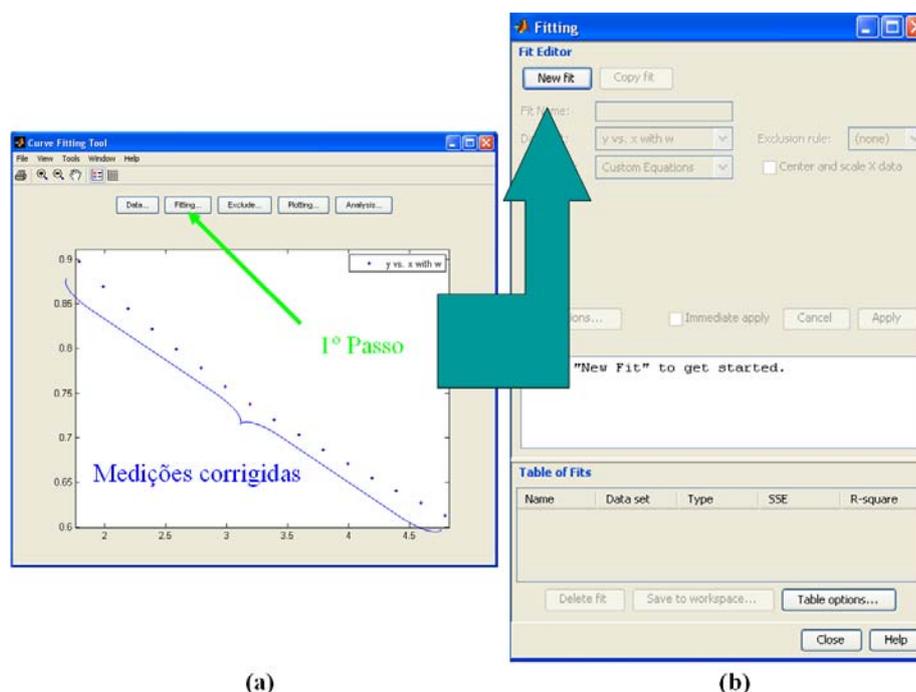


Figura A6-2. Primeira fase na utilização da ferramenta: (a) Click em fitting; (b) Click em New fit: Determinação do ajuste.

Como foi apresentado nos capítulos 7 e 8, o ajuste escolhido foi com função racional constante/linear. Como resultados obtêm-se dados numéricos e o gráfico como se observa na Figura A6-3:

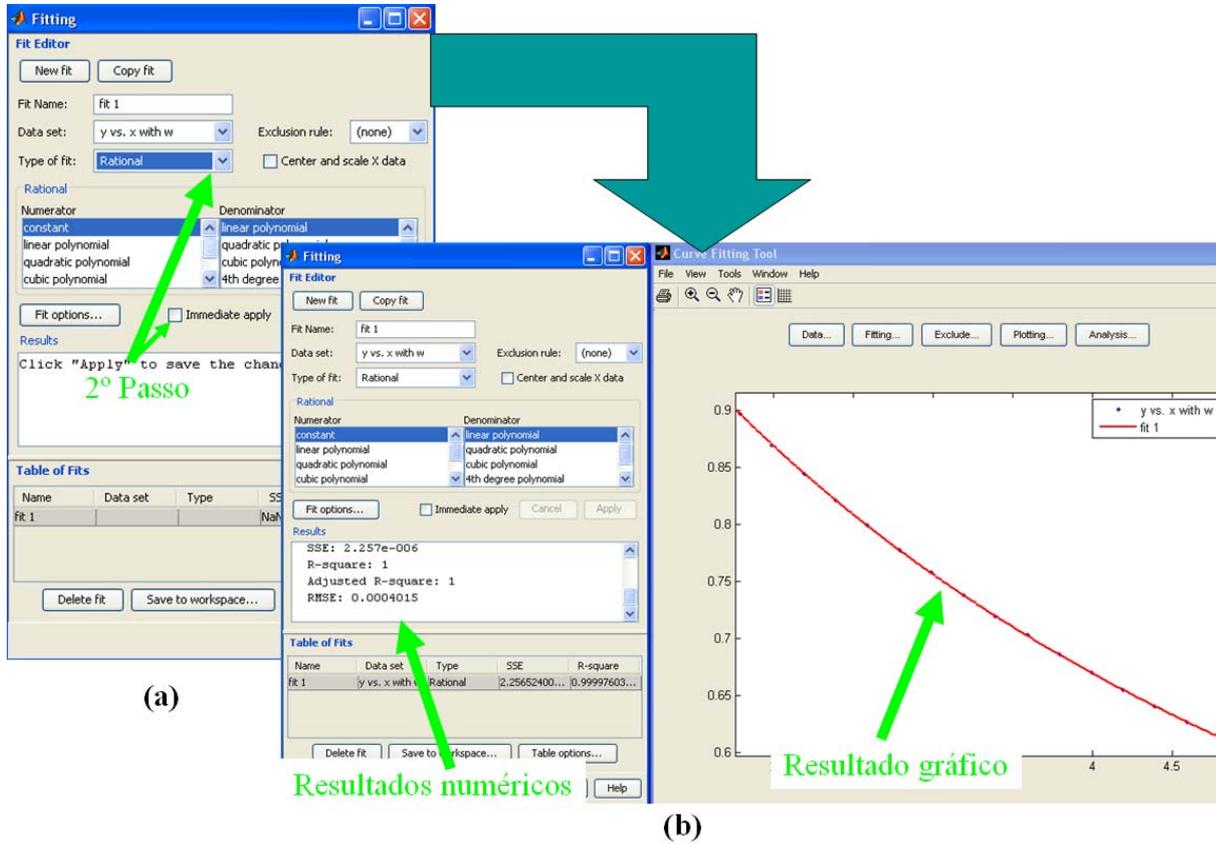


Figura A6-3. Segunda fase: (a) Click em Type of fit; (b) Resultados da ferramenta.

A seguinte etapa consiste em efetuar a análise de extrapolação, Figura A6-4

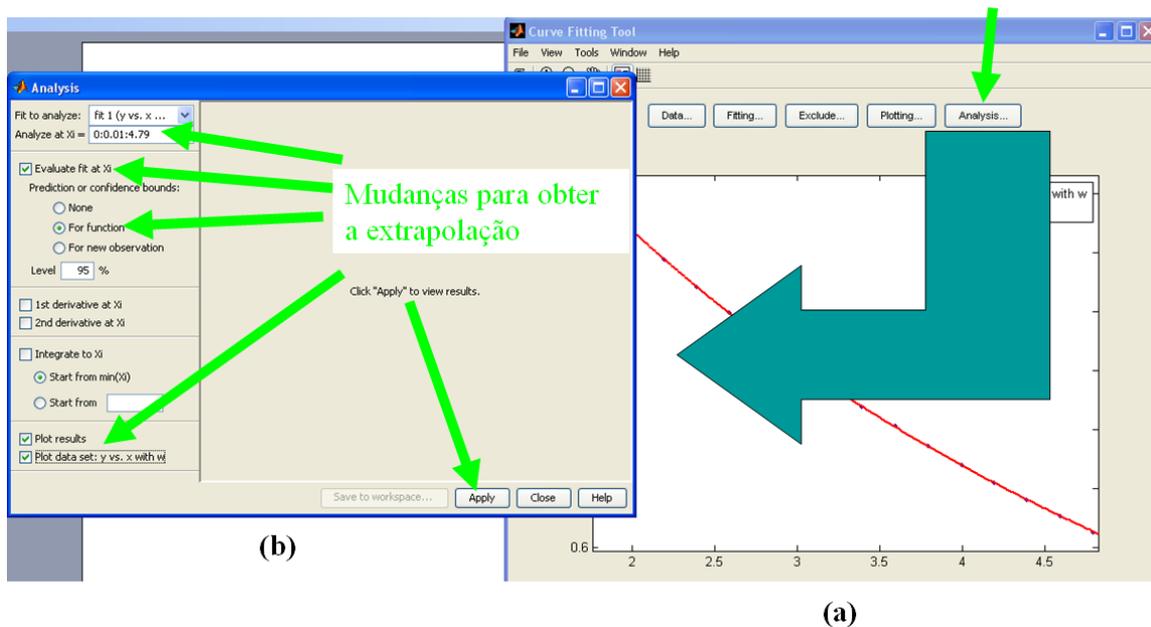


Figura A6-4. Terceira fase: (a) Click em Analysis; (b) Ajustes para obter a extrapolação.

Do resultado numérico da análise (Figura A6-5) é possível obter o B_{re} para $x = 0$, e o intervalo de confiança respectivo.

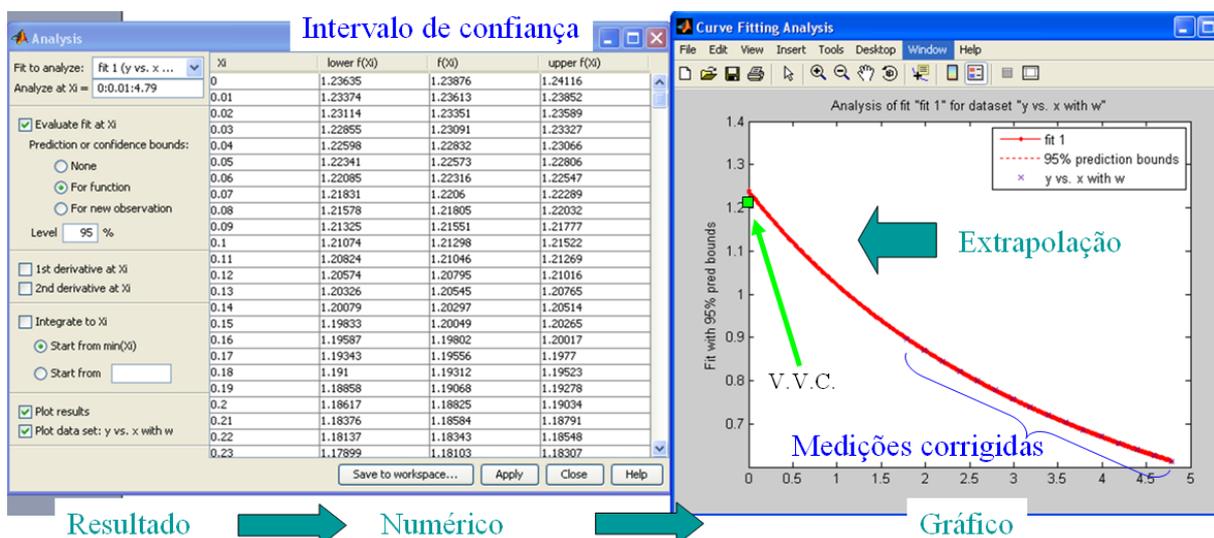


Figura A6-5. Quarta fase, resultados da análise.

Da janela (b) da Figura A6-3 (Curve fitting tool) do menu *View* → *Residuals* → *Scatter Plot* obtém-se o correspondente gráfico de resíduos, e do gráfico da Figura A6-5 fazendo zoom em $x = 0$ é possível apreciar o intervalo de confiança, Figura A6-6.

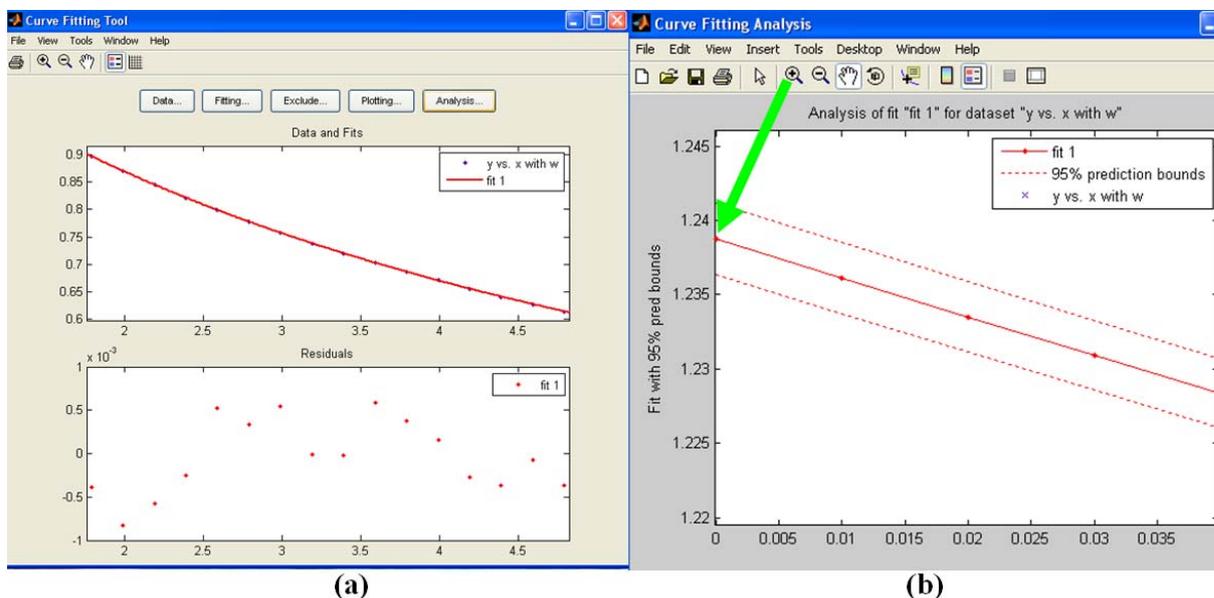


Figura A6-6. Quinta fase, resíduos e intervalo de confiança gráfico.

Página intencionalmente deixada em branco.

APÊNDICE 7a. Planilha de incertezas dimensionais de uma amostra.

Exemplo de implementação da planilha de incertezas para o ímã NB1

Tabela A4-2. Planilha de incertezas para a medição do lado l_a da amostra NB1.

| Fonte de incerteza | Grandeza X_i | Estimativa x_i | Incerteza padrão $u(x_i)$ | Distribuição de Probabilidade | Divisor | Coefficiente de Sensibilidade | Contribuição de incerteza | % | Graus de Liberdade |
|-----------------------|-------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|---------------------------|------|--------------------|
| Repetitividade | \bar{l}_a | 40,004 | 0,001633 | Normal | – | 1 | 0,001633 | 1,8 | 9 |
| Exatidão | $\delta l_{\text{exatidão}}$ | – | 0,011547 | Retangular | $\sqrt{3}$ | 1 | 0,011547 | 92,4 | ∞ |
| Resolução | $\delta l_{\text{resolução}}$ | – | 0,00288675 | Retangular | $\sqrt{3}$ | 1 | 0,00288675 | 5,8 | ∞ |
| Arredondamento | | 40,004 40,00 | | | | | 0,012014 0,01 | | |

Tabela A4-3. Planilha de incertezas para a determinação da área polar A_m da amostra NB1.

| Fonte de incerteza | Grandeza X_i | Estimativa x_i | Incerteza padrão $u(x_i)$ | Distribuição de Probabilidade | Divisor | Coefficiente de Sensibilidade | Contribuição de incerteza | % | Graus de Liberdade |
|-----------------------|------------------------------|------------------|---------------------------|-------------------------------|---------|-------------------------------|---------------------------|------|--------------------|
| A_m | $\bar{l}_a \times \bar{l}_b$ | 1600,3 | – | – | – | – | – | – | – |
| \bar{l}_a | $u_c(\bar{l}_a)$ | – | 0,012014 | – | – | 1600,24 | 0,480591 | 50,0 | – |
| \bar{l}_b | $u_c(\bar{l}_b)$ | – | 0,012 | – | – | 1600,32 | 0,480048 | 49,9 | – |
| Correlação | $u(l_a, l_b)$ | – | 0,000142 | – | – | 2 | 0,01683 | 0,1 | – |
| Arredondamento | | 1600,3 1600 | | | | | 0,67948 1 | | |

APÊNDICE 7b. Planilha de incertezas na determinação da permeabilidade de retorno de uma amostra.

Exemplo de implementação da planilha de incertezas para o ímã NB1

Tabela A7-1. Planilha de incertezas na determinação da permeabilidade de retorno da amostra NB1.

| Fonte de incerteza | Grandeza X_i | Estimativa x_i | Incerteza padrão $u(x_i)$ | Distribuição de Probabilidade | Divisor | Coefficiente de Sensibilidade | Contribuição de incerteza | % | Graus de Liberdade |
|----------------------------|------------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------------|------------|-------------------------------|---------------------------|------|--------------------|
| Permeabilidade | μ_{re} | 1,0341 | – | – | – | – | – | – | – |
| Repetitividade Fluxímetro | $\bar{\phi}_b$ | – | 0,000039 | Normal | – | 3,4177 | 0,000133 | 0,2 | 3 |
| Exatidão Fluxímetro | $\delta\bar{\phi}_b$ | – | 0,002885 | Retangular | $\sqrt{3}$ | 1 | 0,002885 | 76 | ∞ |
| Repetitividade Gaussímetro | $\mu_0\bar{H}_m$ | – | 0,00006768 | Normal | – | 3,6706 | 0,000248 | 0,6 | 3 |
| Exatidão Gaussímetro | $\mu_0\delta\bar{H}_m$ | – | 0,001443 | Retangular | $\sqrt{3}$ | 1 | 0,001443 | 19,2 | ∞ |
| Área polar | A_m | – | 0,000001 | Convolução | – | -20,534 | 0,00002 | 0 | ∞ |
| Área bobina | A_b | – | 0,000001 | Convolução | – | -625 | 0,000625 | 3,6 | ∞ |
| Arredondamento | | 1,0341 | | | | | 0,0033 | | |
| | | 1,034 | | | | | 0,003 | | |
| Final | | 1,034 | | Convolução $k_p = 1,85^*$ | | | 0,006 | | ∞ |

* A incerteza de Tipo B correspondente ao Fluxímetro apresenta-se como dominante, portanto não é possível aplicar a fórmula de Welch-Satterthwaite para obter os graus de liberdade efetivos. Aplicando o teste sugerido no apêndice correspondente ao cálculo da incerteza da área da amostra é possível encontrar que $k_p = 1,85$ para uma cobertura de 95,45% [UNITED KINGDOM ACCESS SERVICE M3003, 2006].

ANEXO 1. Características técnicas do histerisímetro AMH-300 do Laboratório Eletrofísico Walker LDJ Scientific

Na Figura An1-1 pode observar-se o histerisímetro usado na caracterização dos ímãs permanentes (tanto padrões como de teste) no IPT. As especificações podem ser encontradas em:

http://www.laboratorio.eletrofisico.com/pdf/Misura/mis_12_amh-300_hysteresisgraph.pdf.



Figura An1-1. Histerisímetro modelo AMH-300 do IPT.

As principais especificações deste instrumento são apresentadas na Figura An1-2.

| | |
|-----------------------|--|
| Measurable materias | Alnico, Ferrite, NdFeB, SmCo ₅ , Sm ₂ Co ₁₇ , bonded magnets <i>IMPORTANT NOTE: rare earth magnets need to be saturated externally (for example with a pulse magnetizer)</i> |
| Measurable quantities | Br, HcB, HcJ, BHmax, Hknee, HA, BA, μ recoil, Jsat, Hsat, temperature coefficients α_{Br} , α_{HcJ} , loading line, working point, squareness, etc. |
| Accuracy | Br $\pm 1\%$ HcB, HcJ $\pm 1.5\%$ BHmax $\pm 2\%$ |
| Sample shape | Cylinder, rectangular parallelepiped, ring, any rectus prism with parallel bases |
| Sample size | Diameter or diagonal between 3 mm to 82 mm, height between 1 to 50 mm Diameter bigger than 10 mm, height between 3 to 50 mm with embedded coils |
| Max H field | Up to 3 T (2400 kA/m) with 60 mm poles (see electromagnet diagrams) |
| Testing time | Less than 30 seconds |

Figura An1-2. Especificações técnicas principais do histerisímetro AMH-300.

Na Figura An1-3 são apresentados os dados da alimentação de energia do instrumento.

| | |
|------------|---|
| Voltage | 220 V ($\pm 10\%$) single-phase+ground, 50-60 Hz, 16 A max absorption |
| Power | 3 kVA |
| Dimensions | 535 x 950 x 750 (height) mm (21.06" x 37.40" x 29.52") |
| Weight | 90 kg (198 lb) |

Figura An1-3. Especificações técnicas da alimentação de energia elétrica do AMH-300.

Na Figura An1-4 são apresentados os dados dos fluxímetros do instrumento.

| | |
|-----------------|---|
| Ranges | (1, 2, 5, 10, 20, 50, 100) x 2000 μ Wb |
| Resolution | From 1 μ Wb (range 1) to 100 μ Wb (range 100) |
| Accuracy | $\pm 0.5\%$ |
| Drift | Less than 1digit/minute |
| Input impedance | 10 k Ω x range |

Figura An1-4. Especificações técnicas dos fluxímetros do AMH-300.

Na Figura An1-5 são apresentados os dados dos polos do instrumento.

| | |
|---------------------|--|
| Poles diameter | 100 mm (4") |
| Maximum air gap | 80mm (3.14") |
| Max field intensity | 3 tesla in 2 mm gap with LP-60 |
| Movement operating | Manual |
| Poles setting | Micrometric |
| Dimensions | 330 x 410 X 491 mm (12.9" x 16.1" x 19.3"), excluded upper poles adjustment |
| Weight | 350 kg (approx.) (780 lb) |

Figura An1-5. Especificações técnicas dos polos do AMH-300.

Na Figura An1-6 são apresentados os dados da excitação das bobinas de magnetização e desmagnetização.

| | |
|---------------------|-------------------------------|
| Max Volt-Amp | 60 V, 25 A |
| Power supply | 220 V single-phase, 50-60Hz |
| Average consumption | 1.5 kVA |
| Dimensions | Rack width 482 mm (19"), h 1U |
| Communication | RS232 |

Figura An1-6. Especificações técnicas da excitação das bobinas dos polos do AMH-300.

Na Figura An1-7 podem ser vistos as diferentes bobinas compensadas (para diferentes dimensões das amostras):

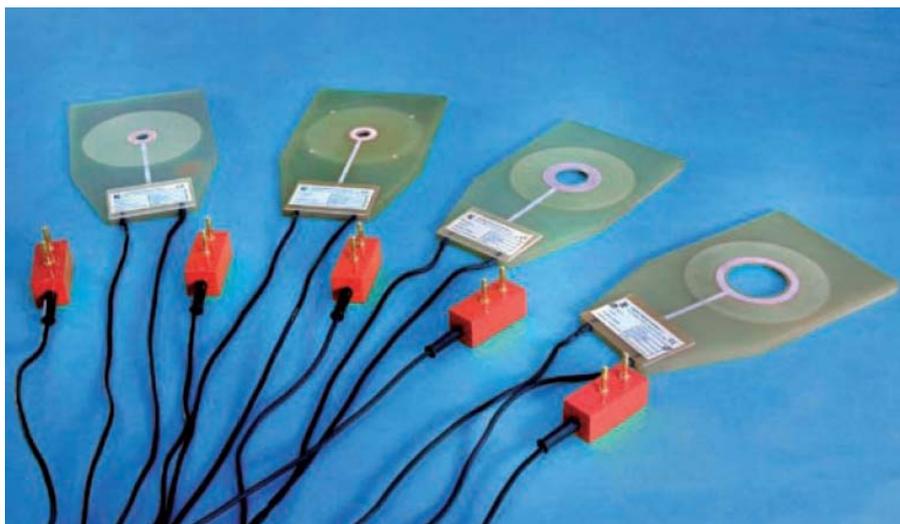


Figura An1-7. Bobinas compensadas para diferentes dimensões das amostras.

Na Figura An1-8 é apresentada a informação geral do instrumento.

TYPE OF MEASURE

- 1st quadrant, 2nd quadrant, 1st and 2nd quadrant, complete hysteresis cycle, recoil permeability.

RESULTS

- Br, H_{cj}, H_{cB}, BH_{max}, BA, HA, H_{knee}, H_{sat}, J_{sat}, B_{sat}, recoil permeability, magnetic moment, anisotropy parameters, loading line, working point, temperature coefficients and advanced results;
- Magnetic units in SI and CGS, measures in mm and inches, temperature in °C and °F.

SETTING OF MEASURING PARAMETERS

- Manual or automatic settings of magnetizing and demagnetizing field, speed, resolutions and many other parameters;
- Setting of acceptance limit for direct quality control.

PROTECTION

- Password protection for access and selected parameters.

SET OF MEASURES

- Possibility to group together different measurements in the same graph, to manage them in a collective way. The software recognizes the group type and provides additional results such as temperature coefficient or some statistical data (average, standard deviation, etc.).

DATA BASE AND FILE SEARCHING

- Data base of measuring files with fast search options, ordering, selection, etc;
- Full compatibility with all main elaboration program, such as Microsoft Excel™.

PRINTING A REPORT

- 6 pre-set reports with different sizes and contents;
- Customized reports for changing the information and the language: 10 languages available for the printing (European languages plus Chinese and Hindi);
- Direct print or automatic creation of graphical and/or text file;
- Reports can be opened and saved with other spread sheet programs, like Microsoft Word™.

DATA ELABORATION

- Curve comparison;
- Extrapolation of the curve at higher or lower temperature, for a quick evaluation of the measured curve at different T;
- Curve's interpolation, automatic or using a mathematical function from a list;
- Extrapolation of uncompleted curves (such those of high-H_{cj} materials);
- Correction of poles' saturation;
- Elaboration of curves made with shaped poles;
- Automatic control of the Fluxmeter's drift.

Figura An1-8. Estratégias e métodos de medição do instrumento.

Página intencionalmente deixada em branco.

ANEXO 2. Características técnicas das amostras caracterizadas pelo histerisímetro AMH-300

Os dados de caracterização dos ímãs permanentes (tanto padrões como de teste) obtidos experimentalmente pelo IPT serão apresentados em ordem alfabética. Na Figura An2-1 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra FB1.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| File | FB1-jun | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.386 T (3.858 kG) |
| Sample | FB1 | HcB | 249.1 kA/m (3.130 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | HcJ | 254.3 kA/m (3.196 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 28.48 kJ/m ² (3.58 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.198 T (1.980 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 143.8 kA/m (1.808 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 243.0 kA/m (3.054 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 84.47 kJ/m ² (10.61 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.80 |
| NB | 13.00 | Hd | 230.0 kA/m (2.890 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 0.363 T (3.632 kG) |
| Range flux H | 5 | Bd | 0.074 T (0.743 kG) |
| Range flux J | 10 | Mag. moment | 3.087 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 10.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-1. Dados da amostra FB1, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-2.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| File | FB1-ago-magnet | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.387 T (3.870 kG) |
| Sample | FB1 | HcB | 248.9 kA/m (3.127 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | HcJ | 253.8 kA/m (3.189 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 28.68 kJ/m ² (3.60 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.196 T (1.960 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 146.3 kA/m (1.839 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 243.6 kA/m (3.061 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 85.37 kJ/m ² (10.73 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.80 |
| NB | 13.00 | Hd | 231.0 kA/m (2.903 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 0.365 T (3.648 kG) |
| Range flux H | 5 | Bd | 0.075 T (0.746 kG) |
| Range flux J | 10 | Mag. moment | 3.096 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 10.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-2. Dados da amostra FB1, corrida 2.

Na Figura An2-4 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra FB2.

| | | | |
|-------------------|-------------------------|---------------|---------------------------------------|
| File | -FB2 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 06-2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.384 T (3.841 kG) |
| Sample | FB2 | HcB | 259.6 kA/m (3.263 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | HcJ | 262.2 kA/m (3.294 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 28.39 kJ/m ² (3.57 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.198 T (1.979 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 143.5 kA/m (1.803 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 259.2 kA/m (3.258 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 91.43 kJ/m ² (11.49 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.67 |
| NB | 13.00 | Hd | 197.9 kA/m (2.487 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 0.374 T (3.736 kG) |
| Range flux H | 5 | Bd | 0.125 T (1.250 kG) |
| Range flux J | 10 | Mag. moment | 6.146 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 10.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-3. Dados da amostra FB2, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime FB2 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-4.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| File | FB2-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.384 T (3.837 kG) |
| Sample | FB2 | HcB | 260.5 kA/m (3.274 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | HcJ | 262.4 kA/m (3.297 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 28.27 kJ/m ² (3.55 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.194 T (1.936 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 146.1 kA/m (1.835 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 257.7 kA/m (3.238 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 91.54 kJ/m ² (11.50 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.67 |
| NB | 13.00 | Hd | 197.8 kA/m (2.486 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 0.373 T (3.734 kG) |
| Range flux H | 5 | Bd | 0.125 T (1.250 kG) |
| Range flux J | 10 | Mag. moment | 6.138 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 10.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-4. Dados da amostra FB2, corrida 2.

Finalizada a corrida 2, o espécime FB2 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da terceira corrida são apresentados na Figura An2-5.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------------------|
| File | FB2 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 0.381 T (3.813 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 261.4 kA/m (3.285 kOe) |
| Sample | FB2 | HcJ | 263.0 kA/m (3.305 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | BHmax | 28.09 kJ/m ² (3.53 MG-Oe) |
| Section shape | Rectangle | BA | 0.192 T (1.923 kG) |
| Length | 40.00 mm | HA | 146.0 kA/m (1.835 kOe) |
| Width | 40.00 mm | Hknee | 258.6 kA/m (3.250 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | JHmax | 91.68 kJ/m ² (11.52 MG-Oe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | Demag. factor | 0.67 |
| Measuring coil | USER | Hd | 196.9 kA/m (2.475 kOe) |
| NB | 13.00 | Jd | 0.372 T (3.718 kG) |
| NxA | 8600 mm ² | Bd | 0.124 T (1.244 kG) |
| Range flux H | 5 | Mag. moment | 6.100 μWb·m |
| Range flux J | 10 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 10.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-5. Dados da amostra FB2, corrida 3.

Considerando que os testes foram realizados nas mesmas condições e com o mesmo instrumento, as incertezas podem ser consideradas da mesma ordem de magnitude. Portanto, os valores finais dos parâmetros informados no capítulo 7 foram obtidos como média aritmética simples, sem necessidade de efetuar a média ponderada.

Na Figura An2-6 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra FC1.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--------------------------------------|
| Date and time | 13/08/2009 | Temperature | 20.0 °C |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.384 T (3.841 kG) |
| Department | LME/CME | HcB | 232.4 kA/m (2.920 kOe) |
| Sample | FC1 | HcJ | 237.7 kA/m (2.987 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | BHmax | 27.75 kJ/m ² (3.49 MG-Oe) |
| Section shape | Circle | BA | 0.197 T (1.966 kG) |
| Diameter | 25.00 mm | HA | 141.2 kA/m (1.774 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 226.3 kA/m (2.844 kOe) |
| Section area | 490.87 mm ² | JHmax | 78.78 kJ/m ² (9.90 MG-Oe) |
| Measuring coil | LJT42 | Demag. factor | 0.69 |
| NB | 14.94 | Hd | 199.5 kA/m (2.507 kOe) |
| NxA | 8955 mm ² | Jd | 0.365 T (3.647 kG) |
| Range flux H | 10 | Bd | 0.114 T (1.141 kG) |
| Range flux J | 2 | Mag. moment | 0.943 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 1500.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-6. Dados da amostra FC1, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime FC1 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-7.

| | | | |
|-------------------|------------------------|---------------|---------------------------------------|
| Date and time | 13/08/2009 | Temperature | 20.0 °C |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.386 T (3.863 kG) |
| Department | LME/CME | HcB | 234.0 kA/m (2.940 kOe) |
| Sample | FC1 | HcJ | 238.8 kA/m (3.000 kOe) |
| Material | Anisotropic ferrite | BHmax | 28.25 kJ/m ² (3.55 MG-Oe) |
| Section shape | Circle | BA | 0.195 T (1.949 kG) |
| Diameter | 25.00 mm | HA | 145.0 kA/m (1.822 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 227.4 kA/m (2.857 kOe) |
| Section area | 490.87 mm ² | JHmax | 79.65 kJ/m ² (10.01 MG-Oe) |
| Measuring coil | LJT42 | Demag. factor | 0.69 |
| NB | 14.94 | Hd | 201.5 kA/m (2.532 kOe) |
| NxA | 8955 mm ² | Jd | 0.368 T (3.682 kG) |
| Range flux H | 10 | Bd | 0.115 T (1.152 kG) |
| Range flux J | 2 | Mag. moment | 0.948 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 1500.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-7. Dados da amostra FC1, corrida 2.

Na Figura An2-8 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra NB1.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | NB1 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 1.216 T (12.163 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 925.7 kA/m (11.633 kOe) |
| Sample | NB1 | HcJ | 1079.7 kA/m (13.568 kOe) |
| Material | NdFeB | BHmax | 282.38 kJ/m ² (35.49 MG-Oe) |
| Section shape | Rectangle | BA | 0.608 T (6.079 kG) |
| Length | 40.00 mm | HA | 464.5 kA/m (5.837 kOe) |
| Width | 40.00 mm | Hknee | 1055.0 kA/m (13.258 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | JHmax | 1170.47 kJ/m ² (147.09 MG-Oe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | Demag. factor | 0.80 |
| Measuring coil | USER | Hd | 745.6 kA/m (9.370 kOe) |
| NB | 13.00 | Jd | 1.177 T (11.774 kG) |
| NxA | 8600 mm ² | Bd | 0.241 T (2.409 kG) |
| Range flux H | 20 | Mag. moment | 9.731 μWb·m |
| Range flux J | 50 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-8. Dados da amostra NB1, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime NB1 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-9.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | NB1-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.216 T (12.163 kG) |
| Sample | NB1 | HcB | 931.2 kA/m (11.702 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1104.0 kA/m (13.873 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 284.71 kJ/m ² (35.78 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.610 T (6.102 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 466.6 kA/m (5.863 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 1064.8 kA/m (13.380 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 1214.21 kJ/m ² (152.58 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.80 |
| NB | 13.00 | Hd | 747.5 kA/m (9.393 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 1.180 T (11.803 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.241 T (2.415 kG) |
| Range flux J | 50 | Mag. moment | 9.731 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-9. Dados da amostra NB1, corrida 2.

Na Figura An2-10 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra NB2.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | NB2 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.243 T (12.428 kG) |
| Sample | NB2 | HcB | 962.4 kA/m (12.093 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1104.5 kA/m (13.879 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 298.19 kJ/m ² (37.47 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.634 T (6.342 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 470.2 kA/m (5.909 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 1093.7 kA/m (13.744 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 1284.95 kJ/m ² (161.47 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.67 |
| NB | 13.00 | Hd | 645.6 kA/m (8.112 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 1.219 T (12.187 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.408 T (4.079 kG) |
| Range flux J | 50 | Mag. moment | 19.885 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-10. Dados da amostra NB2, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime NB2 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-11.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | NB2-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.240 T (12.404 kG) |
| Sample | NB2 | HcB | 964.3 kA/m (12.117 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1130.4 kA/m (14.206 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 297.84 kJ/m ² (37.43 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.612 T (6.118 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 486.8 kA/m (6.118 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 1117.6 kA/m (14.044 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 1322.61 kJ/m ² (166.20 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.67 |
| NB | 13.00 | Hd | 646.8 kA/m (8.128 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 1.221 T (12.212 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.409 T (4.087 kG) |
| Range flux J | 50 | Mag. moment | 19.846 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-11. Dados da amostra NB2, corrida 2.

Na Figura An2-12 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra NB3 (Relatório de Medição N° 3636-204, 2007).

| | | | |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| File | NdFeB-UFRGS-01-1 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 18/01/07 | | |
| Operator | Ramon | Br | (1.217 ± 0.012) T |
| Serial number | 01 | HcB | (910.5 ± 13.7) kA/m |
| Material | NdFeB | HcJ | (1164.7 ± 17.5) kA/m |
| Section shape | Rectangle | BHmax | (275.97 ± 5.52) kJ/m ² |
| Length | 25.40 mm | Hknee | (1098.0 ± 16.5) kA/m |
| Width | 25.40 mm | JHmax | (1207.32 ± 24.15) kJ/m ² |
| Thickness | 8.00 mm | | |
| Section area | 645.16 mm ² | | |
| Measuring coil | LJT42 | | |
| NB | 15.05 | | |
| NxA | 8955 mm ² | | |
| Range flux H | 20 | | |
| Range flux J | 10 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Type of measure | II° quadrant | | |
| Max applied field | 1400.00 kA/m | | |

Figura An2-12. Dados da amostra NB3, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime NB3 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-13 (Relatório de Medição N° 3636-204, 2007).

| | | | |
|--------------------------|------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| File | NdFeB-UFRGS-01-3 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 18/01/07 | Br | (1.220 ± 0.012) T |
| Operator | Ramon | HcB | (911.1 ± 13.7) kA/m |
| Serial number | 01 | HcJ | (1163.7 ± 17.5) kA/m |
| Material | NdFeB | BHmax | (276.53 ± 5.53) kJ/m ² |
| Section shape | Rectangle | Hknee | (1103.8 ± 16.6) kA/m |
| Length | 25.40 mm | JHmax | (1218.59 ± 24.37) kJ/m ² |
| Width | 25.40 mm | | |
| Thickness | 8.00 mm | | |
| Section area | 645.16 mm ² | | |
| Measuring coil | LJT42 | | |
| NB | 15.05 | | |
| NxA | 8955 mm ² | | |
| Range flux H | 20 | | |
| Range flux J | 10 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Type of measure | II° quadrant | | |
| Max applied field | 1400.00 kA/m | | |

Figura An2-13. Dados da amostra NB3, corrida 2.

Na Figura An2-14 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra NC1.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | NC1 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 1.259 T (12.594 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 936.1 kA/m (11.763 kOe) |
| Sample | NC1 | HcJ | 1084.0 kA/m (13.621 kOe) |
| Material | NdFeB | BHmax | 296.15 kJ/m ² (37.22 MG·Oe) |
| Section shape | Circle | BA | 0.628 T (6.285 kG) |
| Diameter | 25.40 mm | HA | 471.2 kA/m (5.922 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 977.8 kA/m (12.288 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | JHmax | 1121.76 kJ/m ² (140.96 MG·Oe) |
| Measuring coil | LJT42 | Demag. factor | 0.69 |
| NB | 15.05 | Hd | 662.8 kA/m (8.330 kOe) |
| NxA | 8955 mm ² | Jd | 1.206 T (12.057 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.373 T (3.732 kG) |
| Range flux J | 10 | Mag. moment | 3.191 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-14. Dados da amostra NC1, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime NC1 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-15.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | NC1-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.255 T (12.555 kG) |
| Sample | NC1 | HcB | 932.4 kA/m (11.717 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1092.6 kA/m (13.730 kOe) |
| Section shape | Circle | BHmax | 294.15 kJ/m ² (36.96 MG·Oe) |
| Diameter | 25.40 mm | BA | 0.622 T (6.219 kG) |
| Thickness | 5.00 mm | HA | 473.0 kA/m (5.944 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | Hknee | 986.4 kA/m (12.396 kOe) |
| Measuring coil | LJT42 | JHmax | 1134.40 kJ/m ² (142.55 MG·Oe) |
| NB | 15.05 | Demag. factor | 0.69 |
| NxA | 8955 mm ² | Hd | 661.1 kA/m (8.307 kOe) |
| Range flux H | 20 | Jd | 1.202 T (12.025 kG) |
| Range flux J | 10 | Bd | 0.372 T (3.722 kG) |
| Poles | LP-80 | Mag. moment | 3.181 μWb·m |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-15. Dados da amostra NC1, corrida 2.

Na Figura An2-16 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra NC2.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | NC2 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.279 T (12.785 kG) |
| Sample | NC2 | HcB | 962.9 kA/m (12.100 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1110.9 kA/m (13.959 kOe) |
| Section shape | Circle | BHmax | 311.70 kJ/m ² (39.17 MG·Oe) |
| Diameter | 25.40 mm | BA | 0.634 T (6.341 kG) |
| Thickness | 10.00 mm | HA | 491.5 kA/m (6.177 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | Hknee | 999.8 kA/m (12.564 kOe) |
| Measuring coil | LJT42 | JHmax | 1171.96 kJ/m ² (147.27 MG·Oe) |
| NB | 15.05 | Demag. factor | 0.53 |
| NxA | 8955 mm ² | Hd | 527.8 kA/m (6.633 kOe) |
| Range flux H | 20 | Jd | 1.250 T (12.497 kG) |
| Range flux J | 10 | Bd | 0.587 T (5.868 kG) |
| Poles | LP-80 | Mag. moment | 6.478 μWb·m |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-16. Dados da amostra NC2, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime NC2 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-17.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | NC2-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 1.276 T (12.759 kG) |
| Sample | NC2 | HcB | 961.3 kA/m (12.080 kOe) |
| Material | NdFeB | HcJ | 1120.8 kA/m (14.085 kOe) |
| Section shape | Circle | BHmax | 309.53 kJ/m ² (38.90 MG-Oe) |
| Diameter | 25.40 mm | BA | 0.637 T (6.374 kG) |
| Thickness | 10.00 mm | HA | 485.6 kA/m (6.102 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | Hknee | 1012.3 kA/m (12.722 kOe) |
| Measuring coil | LJT42 | JHmax | 1191.15 kJ/m ² (149.68 MG-Oe) |
| NB | 15.05 | Demag. factor | 0.53 |
| NxA | 8955 mm ² | Hd | 526.1 kA/m (6.611 kOe) |
| Range flux H | 20 | Jd | 1.246 T (12.456 kG) |
| Range flux J | 10 | Bd | 0.585 T (5.849 kG) |
| Poles | LP-80 | Mag. moment | 6.465 μWb·m |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-17. Dados da amostra NC2, corrida 2.

Na Figura An2-18 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra SB1.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---|
| File | SB1 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.859 T (8.587 kG) |
| Sample | SB1 | HcB | 674.2 kA/m (8.472 kOe) |
| Material | SmCo5 | HcJ | 1405.9 kA/m (17.667 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 144.37 kJ/m ² (18.14 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.431 T (4.314 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 334.6 kA/m (4.205 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | Hknee | 1277.1 kA/m (16.049 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 993.88 kJ/m ² (124.90 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.80 |
| NB | 13.00 | Hd | 538.3 kA/m (6.764 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Jd | 0.850 T (8.500 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.174 T (1.739 kG) |
| Range flux J | 20 | Mag. moment | 6.869 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-18. Dados da amostra SB1, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime SB1 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-19.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|---|
| File | SB1-ago-4 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 0.838 T (8.385 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 656.9 kA/m (8.255 kOe) |
| Sample | SB1 | HcJ | 1412.7 kA/m (17.752 kOe) |
| Material | SmCo5 | BHmax | 137.21 kJ/m ³ (17.24 MG-Oe) |
| Section shape | Rectangle | BA | 0.420 T (4.205 kG) |
| Length | 40.00 mm | HA | 326.3 kA/m (4.101 kOe) |
| Width | 40.00 mm | Hknee | 1217.1 kA/m (15.294 kOe) |
| Thickness | 5.00 mm | JHmax | 919.13 kJ/m ³ (115.50 MG-Oe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | Demag. factor | 0.80 |
| Measuring coil | USER | Hd | 524.3 kA/m (6.588 kOe) |
| NB | 13.00 | Jd | 0.828 T (8.279 kG) |
| NxA | 8600 mm ² | Bd | 0.169 T (1.694 kG) |
| Range flux H | 20 | Mag. moment | 6.708 μWb·m |
| Range flux J | 20 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-19. Dados da amostra SB1, corrida 2.

Na Figura An2-20 podem ver-se os dados da primeira caracterização da amostra SB2.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | SB2 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 0.952 T (9.519 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 751.0 kA/m (9.438 kOe) |
| Sample | SB2 | HcJ | 1264.2 kA/m (15.886 kOe) |
| Material | SmCo5 | BHmax | 178.55 kJ/m ³ (22.44 MG-Oe) |
| Section shape | Rectangle | BA | 0.474 T (4.736 kG) |
| Length | 40.00 mm | HA | 377.0 kA/m (4.738 kOe) |
| Width | 40.00 mm | Hknee | 1161.6 kA/m (14.597 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | JHmax | 1010.62 kJ/m ³ (127.00 MG-Oe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | Demag. factor | 0.67 |
| Measuring coil | USER | Hd | 501.2 kA/m (6.298 kOe) |
| NB | 13.00 | Jd | 0.946 T (9.462 kG) |
| NxA | 8600 mm ² | Bd | 0.317 T (3.167 kG) |
| Range flux H | 20 | Mag. moment | 15.231 μWb·m |
| Range flux J | 20 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-20. Dados da amostra SB2, corrida 1.

Finalizada a corrida 1, o espécime SB2 é re-magnetizado e novamente testado. Os dados da segunda corrida são apresentados na Figura An2-21.

| | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|--|
| File | SB2-ago | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.960 T (9.596 kG) |
| Sample | SB2 | HcB | 751.6 kA/m (9.445 kOe) |
| Material | SmCo5 | HcJ | 1269.2 kA/m (15.949 kOe) |
| Section shape | Rectangle | BHmax | 181.36 kJ/m ² (22.79 MG-Oe) |
| Length | 40.00 mm | BA | 0.487 T (4.872 kG) |
| Width | 40.00 mm | HA | 372.3 kA/m (4.678 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 1160.4 kA/m (14.582 kOe) |
| Section area | 1600.00 mm ² | JHmax | 1012.29 kJ/m ² (127.21 MG-Oe) |
| Measuring coil | USER | Demag. factor | 0.67 |
| NB | 13.00 | Hd | 0.0 kA/m (0.000 kOe) |
| NxA | 8600 mm ² | Mag. moment | 15.354 μWb·m |
| Range flux H | 20 | | |
| Range flux J | 20 | | |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-21. Dados da amostra SB2, corrida 2.

Na Figura An2-22 podem ver-se os dados da única caracterização da amostra SC1.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | SC1_3 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | | |
| Operator | Ramon Valls Martin | Br | 0.999 T (9.986 kG) |
| Sample | SC1-3 | HcB | 729.5 kA/m (9.167 kOe) |
| Material | SmCo5 | HcJ | 1082.4 kA/m (13.602 kOe) |
| Section shape | Circle | BHmax | 187.54 kJ/m ² (23.57 MG-Oe) |
| Diameter | 25.40 mm | BA | 0.497 T (4.974 kG) |
| Thickness | 5.00 mm | HA | 377.1 kA/m (4.738 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | Hknee | 756.9 kA/m (9.511 kOe) |
| Measuring coil | LJT42 | JHmax | 680.72 kJ/m ² (85.54 MG-Oe) |
| NB | 15.02 | Demag. factor | 0.69 |
| NxA | 8955 mm ² | Hd | 527.9 kA/m (6.634 kOe) |
| Range flux H | 20 | Jd | 0.960 T (9.603 kG) |
| Range flux J | 5 | Bd | 0.297 T (2.972 kG) |
| Poles | LP-80 | Mag. moment | 2.530 μWb·m |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-22. Dados da amostra SC1, corrida única.

Na Figura An2-23 podem ver-se os dados da única caracterização da amostra SC2.

| | | | |
|--------------------------|------------------------|----------------------|--|
| File | SC2_3 | Temperature | 20.0 °C |
| Date and time | 2010 | Br | 0.955 T (9.552 kG) |
| Operator | Ramon Valls Martin | HcB | 741.1 kA/m (9.313 kOe) |
| Sample | SC2-3 | HcJ | 1329.2 kA/m (16.703 kOe) |
| Material | SmCo5 | BHmax | 176.78 kJ/m ² (22.22 MG·Oe) |
| Section shape | Circle | BA | 0.476 T (4.760 kG) |
| Diameter | 25.40 mm | HA | 371.4 kA/m (4.667 kOe) |
| Thickness | 10.00 mm | Hknee | 1157.6 kA/m (14.546 kOe) |
| Section area | 506.71 mm ² | JHmax | 1007.05 kJ/m ² (126.55 MG·Oe) |
| Measuring coil | LJT42 | Demag. factor | 0.53 |
| NB | 15.02 | Hd | 397.8 kA/m (4.998 kOe) |
| NxA | 8955 mm ² | Jd | 0.942 T (9.418 kG) |
| Range flux H | 20 | Bd | 0.442 T (4.422 kG) |
| Range flux J | 5 | Mag. moment | 4.840 μWb·m |
| Poles | LP-80 | | |
| Max applied field | 100.00 kA/m | | |
| Max demag field | Automatic | | |

Figura An2-23. Dados da amostra SC2, corrida única.

GLOSSÁRIO

Avaliação Tipo A (da incerteza): método de avaliação da incerteza por análise estatística de uma série de medições.

Avaliação Tipo B (da incerteza): método de avaliação da incerteza por outros meios não estatísticos de uma série de medições.

Bias: Tendência. Erro sistemático de indicação de um instrumento de medição, (VIM, 2007).

Discrepância (entre duas medições): Diferença algébrica entre as duas melhores estimativas.

Exatidão: de um instrumento de medição é a aptidão de um instrumento para fornecer respostas próximas a um valor considerado verdadeiro, enquanto **exatidão de medição** é o grau de concordância entre um valor medido e um valor considerado verdadeiro do mensurando. A exatidão de medição não é uma grandeza, é um conceito qualitativo que não deve ser expresso numericamente. Uma medição é considerada mais exata quando é caracterizada por uma incerteza de medição menor (VIM, 2007), (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010).

Fator de abrangência: fator numérico usado como multiplicador da incerteza padrão combinada a fim de obter a incerteza expandida.

Fluxímetro: Dispositivo ou sistema usado para medir mudanças no fluxo enlaçado em uma bobina exploradora. Todos os fluxímetros usam algum tipo de integração do sinal.

Galvanômetro balístico: Sensível instrumento de agulha tipo D'Arsonval com constantes eletromecânicas apropriadas tais que a rotação da bobina começa somente depois que o impulso de corrente no galvanômetro é essencialmente completado. Proporciona uma deflexão proporcional ao valor integrado $\int edt$ dos volts-segundos de um impulso de tensão induzida na bobina exploradora e aplicado à bobina do galvanômetro.

Galvanômetro D'Arsonval: Instrumento sensível de medição de corrente formado por uma bobina móvel ou rolante suspensa num campo magnético radial e uniforme entre os pólos de um material magnetizado. A rotação angular da bobina manifesta-se através de um indicador de agulha em relação a uma posição inicial não energizada.

Gaussímetro: Equipamento desenhado para medir a intensidade de campo magnético ou a resultante indução B no ar. Usualmente vai acompanhado do tipo de sensor empregado, por exemplo: Gaussímetro de efeito Hall.

Histerese: fenômeno que apresentam todos os materiais em maior ou menor grau: Quando uma força magnetizante é aplicada a um material e logo restaurada ao seu valor original, a magnetização resultante de tal material não volta a sua condição inicial.

Histerisímetro: Também chamado histeresímetro ou traçador de curvas magnéticas. Trata-se de um sistema desenhado para obter um gráfico contínuo da curva de magnetização ou laço de

histerese de um material. Usualmente é usado um registrador X-Y onde o sinal de X provém da magnitude magnetizante (H) e para Y é usada uma magnitude proporcional ao B ou J . Atualmente os sistemas armazenam os dados da curva, posteriormente sofrem algum tipo de tratamento (filtrado, ajuste, interpolação, etc.) para finalmente deixar ao usuário a forma de apresentação, se na tela de um monitor, se impressa ou simplesmente armazenada.

Incerteza padrão: incerteza do resultado de uma medição expressada como desvio padrão.

Incerteza padrão combinada: incerteza padrão obtida como resultado de uma medição quando o resultado é obtido de valores de um número de outras quantidades, igual à raiz quadrada da soma de termos, variâncias ou co-variâncias destas quantidades, ponderadas de acordo a como o resultado varia com uma mudança nestas quantidades.

Incerteza expandida: quantidade que define um intervalo ao redor do resultado da medição que se espera inclua uma grande fração dos valores distribuídos que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando.

Integrador magnético: Dispositivo, sistema, circuito ou algoritmo que permite obter a integral no tempo de uma tensão ou corrente derivada de uma mudança de fluxo magnético numa bobina exploradora. A integração pode ser feita eletromecanicamente (galvanômetro balístico), eletronicamente (integrador Miller ou circuito RC), ou por software (a tensão induzida é digitalizada é mediante um algoritmo é obtida a integral).

Permeâmetro: Sistema completo (circuito magnético com os instrumentos requeridos para a medição de H e B ou J) utilizado para a determinação das propriedades magnéticas em CC dos materiais, usualmente utilizado na caracterização de materiais magnetizados (aços em forma de vara ou cilindro de comprimento superior aos 10 cm).

Precisão: de medição é definida como o grau de concordância entre indicações ou valores medidos, obtidos por medições repetidas, no mesmo ou em objetos similares, sob condições especificadas. Usualmente é expressa na forma numérica por meio de medidas de dispersão como o desvio padrão, a variância ou o coeficiente de variação, sob condições de medição especificadas, (BALBINOT, BRUSAMARELLO, 2010).

Processos Irreversíveis: Mudanças irreversíveis são aquelas que persistem ainda depois que a causa foi removida, mas a curva original de desmagnetização pode ser restaurada mediante uma total re-magnetização do material (CAMPBELL, 1994).

Processos Reversíveis: É aquele no qual o vetor magnetização se re-orienta na sua posição original depois que o campo H foi removido (PARKER, 1990).

Redes Metrológicas: Instituições que atuam comonexo entre as indústrias regionais e os laboratórios credenciados pelo Inmetro. Entre tantas atividades pode-se mencionar: consultoria; promoção de comparação interlaboratoriais na área de calibração; desenvolvimento de programas de ensaios de proficiência; divulgação dos laboratórios acreditados pelo Inmetro, etc.

Repetitividade: Traduzido da palavra **Repeatability** da Guia Para a Expressão de Incerteza de Medição Inmetro. Grau de concordância entre resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando, efetuadas sob as mesmas condições de medição.