

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

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL HEV –
UMA PROPOSTA ALTERNATIVA PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES**

Porto Alegre

2007

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL HEV -
UMA PROPOSTA ALTERNATIVA PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES**

Dissertação de mestrado 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 Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Automação e Instrumentação Eletro-Eletrônica

ORIENTADOR: Ály Ferreira Flores Filho

Porto Alegre

2007

HECTOR ROLANDO ANOCIBAR

**HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL HEV –
UMA PROPOSTA ALTERNATIVA PARA A
CARACTERIZAÇÃO DE ÍMÃS PERMANENTES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre 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. João Edgar Schmidt, UFRGS

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

Profª. Dra. Marília Amaral da Silveira, ULBRA

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

Prof. Dr. Renato Machado de Brito, UFRGS

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

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich, UFRGS

Doutor pela Universidade Estadual de Campinas, Campinas, Brasil

Coordenador do PPGEE: _____

Prof. Dr. Marcelo Soares Lubaszewski

Porto Alegre, junho de 2007

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa e minhas filhas por me acompanharem em todas minhas decisões.

AGRADECIMENTOS

Ao Único e Grande Deus e Senhor, que merece toda honra e toda 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 apoio na revisão deste trabalho.

À CAPES pela provisão da bolsa de mestrado.

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 à temperatura ambiente de baixo custo e de implementação mais simples e rápida. Ele consiste de um circuito magnético formado pelo ímã permanente sob caracterização, uma culatra de aço, um entreferro variável e uma sonda de efeito Hall com seu respectivo gaussímetro para a medição da intensidade do campo magnético no entreferro.

Como introdução se apresenta o estado da arte da caracterização dos ímãs permanentes, conceitos básicos de magnetismo e em relação aos ímãs permanentes, sua história, os principais tipos, sua importância e suas aplicações principais. Os resultados teóricos e experimentais são comparados a resultados certificados, validando o método como proposto.

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

ABSTRACT

Determining the main magnetic properties of a permanent magnet usually requires sophisticated and expensive measurement setups. This work analyses and proposes a low-cost system to characterize Rare Earth permanent magnets at ambient temperature with easy and fast implementation. It consists of a magnetic circuit with the permanent magnet under test, appropriate pole pieces, a variable air gap and a Hall Effect probe with its respective Gaussmeter.

As an introduction, it is presented the state of the art of permanent magnets characterization, basic concepts of magnetism and its history, the main types of permanent magnets, their importance and applications. The theoretical and experimental results are compared to certified ones, validating so the method as proposed.

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

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 REVISÃO DE LITERATURA	1
1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES.....	1
1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES: AS NORMAS INTERNACIONAIS DE PADRONIZAÇÃO	5
1.3.1 Alcance da norma	5
1.3.2 Definições.....	5
1.3.3 Eletromagneto e as condições para a magnetização.....	6
1.3.3.1 Condições geométricas	6
1.3.3.2 Condições eletromagnéticas	8
1.3.4 Amostra	8
1.3.5 Determinação da densidade de fluxo magnético.....	9
1.3.6 Determinação de polarização magnética.....	10
1.3.7 Medição da intensidade do campo magnético.....	10
1.3.8 Determinação da curva de desmagnetização	11
1.3.8.1 Amostra magnetizada no eletromagneto.....	11
1.3.8.2 Amostra magnetizada em bobina supercondutiva ou magnetizador pulsante	11
1.3.9 Determinação das principais características.....	12
1.3.9.1 Remanência magnética	11
1.3.9.2 Produto $(BH)_{max}$	11
1.3.9.3 Coercitividades H_c e H_{ci}	11
1.3.9.4 Determinação da linha de retorno (<i>recoil</i>) e da permeabilidade de retorno....	11
1.3.10 Reproducibilidade	14
1.3.11 Relatório	14
1.3.12 Influência do entreferro entre a amostra e as faces polares.....	15
1.4 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES - AS ALTERNATIVAS EXISTENTES	16
1.4.1 Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM).....	16
1.4.2 Permeâmetro ou Histerisímetro	18
1.4.3 Magnetometria com Campo Pulsante (PFM)	21
1.4.4 Bobinas de Helmholtz.....	23
1.4.5 Bobina exploradora	27
1.4.6 Gaussímetro com sonda Hall.....	28
1.4.7 Bobina de potencial	33
2 ANÁLISE DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS COM ÍMÃS PERMANENTES	36
2.1 CAMPO DESMAGNETIZANTE	37
2.2 ANISOTROPIA	38
2.2.1 Anisotropia Magnetocristalina.....	38
2.2.2 Anisotropia de forma	42
2.3 HISTERESE.....	42
2.3.1 Materiais macios	45
2.3.2 Materiais duros	47
2.4 CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DOS ÍMÃS PERMANENTES E FIGURAS DE MÉRITO	47
2.4.1 Coercitividade	48
2.4.2 Remanência	49
2.4.3 Magnetização de saturação.....	49
2.4.4 Produto energético.....	50
2.4.5 Dependência da temperatura	52

2.4.6 Curva de desmagnetização	56
2.4.7 Fator de quadratura (“squareness ratio”)	57
2.5 OS ÍMÃS PERMANENTES DUROS (“HARD PERMANENT MAGNET”)	57
2.6 TIPOS DE MATERIAIS PARA ÍMÃS PERMANENTES	59
2.6.1 Alnico	59
2.6.2 Ferrites ou cerâmicos	59
2.6.3 Ímãs Permanentes de Terras Raras.....	60
2.6.3.1 Samário-Cobalto	60
2.6.3.2 Neodímio-Ferro-Boro	60
2.7 CARACTERÍSTICA DESMAGNETIZANTE LINEAR E NÃO LINEAR.....	62
2.8 CIRCUITO MAGNÉTICO COM ÍMÃ PERMANENTE	67
2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE CIRCUITOS MAGNÉTICOS	69
3 HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL - O HEV	73
3.1 INTRODUÇÃO	73
3.2 DESCRIÇÃO DO HEV	73
3.3 ELEMENTOS CONSTITUENTES DO HEV	76
3.4 ANÁLOGO ELÉTRICO EQUIVALENTE.....	77
3.5 OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA DESMAGNETIZANTE DO ÍMÃ PERMANENTE	78
3.6 ROTINA DE MEDIÇÃO NO HEV	80
3.7 DETERMINAÇÃO DO K_C	83
3.8 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO HEV	86
4 SIMULAÇÕES	89
4.1 INTRODUÇÃO	89
4.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	89
4.3 PACOTE DE ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS MEGA	90
4.4 MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DO HEV	91
4.4.1 Resultados da simulação	94
4.5 CONCLUSÕES DA SIMULAÇÃO	104
5 TESTES	105
5.1 AMOSTRAS UTILIZADAS	105
5.2 TESTES NO IPT	105
5.2.1 Procedimento utilizado no IPT.....	107
5.3 ENSAIOS E SIMULAÇÃO.....	110
5.4 ENSAIOS NO HEV	112
5.4.1 Resultados para o Ímã permanente N° 2 (0065-02).....	113
5.4.2 Resultados para o Ímã permanente N° 3 (0065-03).....	117
6 ANÁLISE DE RESULTADOS.....	121
6.1 COMPARAÇÃO DAS DENSIDADES DE FLUXO OBTIDAS POR SIMULAÇÃO E MEDIDAS	121
6.2 CARACTERÍSTICA DE DESMAGNETIZAÇÃO DO ÍMÃ 2	122
6.3 CARACTERÍSTICA DE DESMAGNETIZAÇÃO DO ÍMÃ 3	125
6.4 DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DE INCERTEZAS	126
6.4.1 Fontes ou causas de incerteza	126
6.4.2 Condições ambientais das medições.....	127
6.4.3 Condições e características particulares das medições	127
6.4.4 Avaliação das incertezas dos instrumentos	127
6.4.5 Determinação das incertezas nos parâmetros do ímã	128
6.5 COMPARAÇÃO GERAL ENTRE ÍMÃS	131
7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	137
REFERÊNCIAS	139
ANEXOS	139

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Método tradicional de relevar o laço de histerese nos materiais magnéticos (WRIGHT, 1977).....	2
Figura 2. Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J de um ímã genérico (PARKER, 1990).....	3
Figura 3. Detalhe de segundo quadrante da curva de indução e de desmagnetização (FLORES FILHO, 2003).	3
Figura 4. Diagrama do eletromagneto (IEC404-5, 1993).....	7
Figura 5. Entreferro (IEC404-5, 1993).....	7
Figura 6. Curva de desmagnetização mostrando o ponto de $(BH)_{max}$ (IEC404-5).	13
Figura 7. Curva de desmagnetização e laço de retorno (IEC404-5, 1993).....	13
Figura 8. (a) Diagrama do primeiro VSM (FONER, 1959), (b) VSM comercial (HIRST, 2006).	17
Figura 9. Histerisímetro comercial (WALKER SCIENTIFIC, 2006).....	19
Figura 10. (a) Histerisímetro com bobinas exploradoras embutidas em um pólo (CAMPBELL, 1994), (b) versão comercial (WALKER SCIENTIFIC, 2006).	19
Figura 11 Planos de potencial entre pólos de alta permeabilidade (PARKER, 1990).	21
Figura 12. Medição da diferença de potencial magnético entre pólos (PARKER, 1990).	21
Figura 13. Modelo simplificado de um magnetizador pulsante e seu impulso de corrente (FLORES FILHO, 2003).	22
Figura 14. a) Diagrama de blocos de um magnetômetro de campo pulsante (GRÖSSINGER, 2002), b) versão comercial (HIRST, 2006).	23
Figura 15. (a) Fluxo magnético em um par de bobinas Helmholtz; (b) intensidade do campo magnético axial em função de x (JILES, 1991).	24
Figura 16. Bobinas Helmholtz usadas para medir características de um ímã permanente (STEINGROEVER, 1997).	25
Figura 17. Característica de segundo quadrante de um ímã permanente genérico (TROUT, 2002).	26
Figura 18. (a) Medição com uma bobina exploradora (MOSKOWITZ, 1995), (b) versão comercial (MAGNET-PHYSIK, 2006).	27
Figura 19. Elemento básico Hall (SENSORS, 1997)	29
Figura 20.(a) Sonda axial e (b) transversa (F. W. BELL, 2006).	31
Figura 21. Ímã permanente e sonda Hall (SIRCILLI, 2001).....	32
Figura 22 Blocos básicos de um histerisímetro para materiais macios (BUCK, 2000).	33
Figura 23. Bobina de diferencia de potencial (TUMANSKI, 2007).	34
Figura 24. Bobina de potencial magnético (McDONALD, 1978).	34
Figura 25. Aplicação da bobina de potencial magnético (MAGNET-PHYSIK, 1997).	35
Figura 26. Distribuição de B , H e M dentro do ímã (CULLITY, 1972).	37
Figura 27. Campo H dentro e fora do ímã e densidade de fluxo B dentro e fora do ímã (CULLITY, 1972).	38
Figura 28. Espécime com anisotropia uniaxial (FURLANI, 2001).....	39
Figura 29. Resposta do espécime com anisotropia uniaxial: (a) M vs. H ; e (b) B vs. H (CAMPBELL, 1994), (FURLANI, 2001).	41
Figura 30. Laço B - H para um espécime com anisotropia de forma (FURLANI, 2001).	43
Figura 31. Laço de histerese (FURLANI, 2001).	43
Figura 32. Distribuição das orientações dos domínios em um laço de histerese (CHIKAZUMI, 1964).	44
Figura 33. Laços menores de histerese (FURLANI, 2001).....	45

Figura 34. Laços B-H para materiais magnéticos macios e duros (FURLANI, 2001).....	46
Figura 35. Valores atuais de remanência e coercitividade (VACUUMSCHMELZE, 2003)....	48
Figura 36. Curva de desmagnetização e de produto energético de um ímã permanente (FLORES FILHO, 2003).....	50
Figura 37. Evolução do máximo produto energético dos ímãs (VACUUMSCHMELZE, 2003).	51
Figura 38. Volume de material de ímãs permanentes de diferentes tipos para gerar 0.1 T a 5 mm (VACUUMSCHMELZE, 2003).....	51
Figura 39. Relação entre a magnetização e a temperatura [CAMPBELL, 1994]	52
Figura 40. Curvas de desmagnetização do Ceramic 8 para diferentes temperaturas (EAMAGNETICS, 2007).....	53
Figura 41. Curvas de desmagnetização do Alnico 5 para diferentes temperaturas (CAMPBELL, 1994)	54
Figura 42. Características desmagnetizantes de (a) SmCo_5 e (b) $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ para diferentes temperaturas (CAMPBELL, 1994).....	54
Figura 43. Características de desmagnetização ímã NdFeB a diferentes temperaturas (VACUUMSCHMELZE, 2003).....	55
Figura 44. Comparação de características de desmagnetização de diferentes ímãs permanentes (VACUUMSCHMELZE, 2003).....	56
Figura 45. Comparação da permeabilidade, linhas de fluxo útil e disperso (PARKER, 1990).57	
Figura 46. Dois tipos de ímãs permanentes com suas características de desmagnetização (PARKER, 1990).....	58
Figura 47. Curvas de desmagnetização de amostras de Samario-Cobalto (EAMAGNETICS, 2007).....	60
Figura 48. Curvas de desmagnetização de amostras de Neodímio-Ferro-Boro (EAMAGNETICS, 2007).....	61
Figura 49. Característica desmagnetizante ideal.....	63
Figura 50. Característica de desmagnetização real de um ímã de NdFeB.....	65
Figura 51. Característica desmagnetizante com aumento da temperatura.....	66
Figura 52. Detalhes da característica de desmagnetização [HENDERSHOT Jr., 1994].....	67
Figura 53. Circuito magnético com ímã permanente e entreferro.....	67
Figura 54. Característica típica de desmagnetização de ímãs de Terras Raras e retas de carga (FLORES FILHO, 2003).....	68
Figura 55. Perdas num circuito magnético com ímãs permanentes (McCAIG, 1987).....	70
Figura 56. Diferentes configurações com ímãs permanentes (BASAK, 1996).....	72
Figura 57. Vista 2D do HEV – dimensões em milímetros	74
Figura 58. Detalhe dos cabeçotes niquelados –dimensões em milímetros.....	74
Figura 59. Vistas 3D do HEV.....	75
Figura 60. Imagem do primeiro protótipo do HEV.....	75
Figura 61. Detalhe da incorporação do relógio comparador para medição do deslocamento do entreferro.....	76
Figura 62. Características magnéticas do aço 1020 [SCHOESSOW, 1998].....	76
Figura 63. Circuito elétrico equivalente aproximado do HEV.....	77
Figura 64. Circuitos elétricos equivalentes com reagrupamento de relutâncias.....	78
Figura 65. Posicionamento do ímã permanente nas medições no HEV, as setas indicam o sentido da magnetização.....	80
Figura 66. Diagrama de blocos da medição de densidade de fluxo em abertura (continua na Figura 67).....	81
Figura 67. Diagrama de blocos da medição de densidade de fluxo em fechamento (é continuação da Figura 66).....	82

Figura 68. Diagrama de blocos da determinação dos parâmetros do ímã (é continuação da Figura 66 e 67).....	82
Figura 69. Configuração de medição da densidade de fluxo no entreferro.....	86
Figura 70. Detalhe do sistema de abertura e fechamento do entreferro do HEV.....	87
Figura 71. Detalhe do entreferro com o ímã permanente de NdFeB em posição de mínimo entreferro.....	88
Figura 72. Discretização da malha base do modelo do HEV.....	92
Figura 73. Extensão total da malha base do HEV.....	93
Figura 74. HEV em 3D resultado da extrusão do modelo em 2D mostrado na figura anterior.....	93
Figura 75. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV sem entreferro.....	95
Figura 76. Detalhe do B no centro do HEV onde se encontra o ímã permanente.....	95
Figura 77. Distribuição do B no HEV sem entreferro em 3D.....	96
Figura 78. Detalhe em 3D do B no centro do HEV onde se encontra o ímã permanente.....	96
Figura 79. Detalhe em 3D do B no centro do HEV sem o ímã permanente.....	97
Figura 80. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV com entreferro de 1 mm.....	98
Figura 81. Detalhe do B no centro do HEV com 1 mm de entreferro.....	98
Figura 82. Detalhe em 3D do B no centro do HEV com 1 mm de entreferro.....	99
Figura 83. Detalhe em 3D do B no centro do HEV sem o ímã permanente para 1 mm de entreferro.....	99
Figura 84. Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de 1 mm.....	100
Figura 85. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV com entreferro de 5,5 mm.....	100
Figura 86. Detalhe do B no centro do HEV com 5,5 mm de entreferro.....	101
Figura 87. Vista central do HEV com entreferro de 5,5 mm em 3D.....	101
Figura 88. Vista da base do pólo interior sem o ímã para 5,5 mm de entreferro.....	102
Figura 89. Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de 5,5 mm.....	102
Figura 90. Posicionamento das medições virtuais mostradas nas figuras 91 e 92.....	103
Figura 91. Medição de B em $x=z=0$ ao longo de y para diferentes entreferros.....	103
Figura 92. Medição de $\mu_0 H$ em $x=z=0$ ao longo de y para diferentes entreferros.....	104
Figura 93. Culatra do histerisímetro usado para testar os ímãs permanentes.....	106
Figura 94. Equipamento de aquisição de dados e controle do histerisímetro do IPT.....	106
Figura 95. Magnetizador pulsante do IPT.....	107
Figura 96. Vista superior desde o entreferro.....	110
Figura 97. Posicionamento das medições virtuais.....	111
Figura 98. Densidade de fluxo no HEV simulado para vários entreferros.....	112
Figura 99. Sonda utilizada na medição de densidade de fluxo no HEV (HIRST, 2007).....	112
Figura 100. Posicionamento da sonda no centro geométrico do ímã e do entreferro.....	113
Figura 101. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 2 em posição 1.....	114
Figura 102. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 2 em posição 2.....	115
Figura 103. Característica de desmagnetização do ímã permanente 2 utilizando o fator K_c	117
Figura 104. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 3 em posição 1.....	118
Figura 105. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 3 em posição 2.....	119
Figura 106. Característica de desmagnetização do ímã permanente 3 utilizando o fator K_c	120
Figura 107. Comparação de resultados de simulação e valores experimentais no HEV com ímã 2 (valores da Tabela 24).....	122
Figura 108. Característica de segundo quadrante do ímã 2 na simulação.....	123
Figura 109. Densidade de fluxo remanente B_r do ímã 2 com seus intervalos de abrangência.....	132
Figura 110. Coercitividade H_c no ímã permanente 2 com seus intervalos de abrangência.....	133
Figura 111. Máximo produto energético $(BH)_{max}$ no ímã 2 com seus intervalos de abrangência.....	133

Figura 112. Permeabilidade de retorno no ímã permanente 2 com seus intervalos de abrangências.	134
Figura 113. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.	134
Figura 114. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.	135
Figura 115. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.	135

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Reproducibilidade da medição das características magnéticas de materiais ímãs permanentes (IEC404-5, 1993).....	14
Tabela 2. Influência do entreferro para diferentes materiais (IEC404-5, 1993).....	15
Tabela 3. Materiais mais usados na construção de um sensor Hall (JILES, 1990).....	30
Tabela 4. Dependência dos ímã da temperatura (MILLER, 1993)	56
Tabela 5. Comparação dos ímãs permanentes tipo I e II ou ‘brandos’ e ‘duros’ (PARKER, 1990).....	58
Tabela 6. Desmagnetização ideal.	63
Tabela 7. Desmagnetização real a temperatura ambiente.....	64
Tabela 8. Característica de desmagnetização com aumento de temperatura.....	65
Tabela 9. Medição de B no ímã padrão na posição 1.	84
Tabela 10. Medições de B no ímã padrão na posição 2.....	84
Tabela 11. Valores finais de densidade de fluxo do ímã permanente 1.	85
Tabela 12. Obtenção do fator K_c do HEV.	85
Tabela 13. Resultados para dois diferentes discretizações no modelo do HEV.....	94
Tabela 14. Dados das amostras de NdFeB utilizadas nos testes.	105
Tabela 15. Resultados dos testes realizados no IPT.	110
Tabela 16. Densidade de fluxo em HEV simulado com 0,5 a 5,5 mm de entreferro (sublinhadas medições no entreferro).....	111
Tabela 17. Medição da densidade de fluxo no entreferro do HEV com ímã 2 em posição 1.	114
Tabela 18. Medições de B no ímã 2 na posição 2.....	115
Tabela 19. Valores finais de densidade de fluxo do ímã permanente 2.	116
Tabela 20. Obtenção de $\mu_0 H_m$ para o ímã 2 a partir do K_c	116
Tabela 21. Valores de densidade de fluxo do ímã permanente 3 em posição 1.	117
Tabela 22. Valores de densidade de fluxo do ímã permanente 3 em posição 2.	118
Tabela 23. Valores finais de densidade de fluxo e obtenção de $\mu_0 H_m$ para o ímã 3 a partir do K_c	119
Tabela 24. Comparação dos resultados da simulação (B_s) com as medições no HEV.	121
Tabela 25. Especificações principais dos instrumentos utilizados no HEV.....	126
Tabela 26. Incertezas dos instrumentos utilizados no HEV.	128
Tabela 27. Resultados dos cálculos das incertezas nas medições no HEV.	130
Tabela 28. Comparação de resultados obtidos para o ímã permanente 2 (IPT 0065-02).....	131
Tabela 29. Comparação de resultados obtidos para o ímã permanente 3 (IPT 0065-03).....	132

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT:	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IEC:	International Electrotechnical Commission.
VSM:	Vibrating Sample Magnetometer.
PFM:	Pulsed Field Magnetometer.
NdFeB:	Neodímio - Ferro – Boro
SmCo:	Samário – Cobalto
HEV:	Histerisímetro de Entreferro Variável
LVDT:	Linear Variable Differential Transformer
IPT:	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
V.V.C.:	Valor Verdadeiro Convencional
B	Indução magnética ou densidade de fluxo magnético (T)
B_i	Polarização magnética (T)
B_r	Remanência, retentividade, indução magnética residual ou densidade de fluxo residual (T)
B_s	Indução magnética de saturação (T)
$(BH)_{max}$	Máximo produto energético de um ímã permanente (kJ/m ³)
C_f	Coefficiente de espraiamento do fluxo magnético
H	Intensidade de campo magnético (A/m)
H_c	Coercitividade, força coercitiva (A/m)
H_{ci}	Coercitividade intrínseca (A/m)
J	Polarização magnética (T)
K_c	Fator de perdas globais do HEV
k	Fator de abrangência
L_f	Fator de dispersão do fluxo magnético
l_g	Comprimento do entreferro (m)
M	Magnetização (A/m)
M_r	Magnetização remanente (A/m)

M_s	Magnetização de saturação (A/m)
U	Incerteza expandida de medição
u_c	Incerteza padrão combinada
μ_0	Permeabilidade magnética do vácuo (H/m)
μ_r	Permeabilidade magnética relativa de retorno do ímã permanente
ϕ	Fluxo magnético (Wb)
\mathfrak{R}	Relutância magnética (Ae/Wb)

1 INTRODUÇÃO

Embora o ímã permanente tenha a aparência de um simples elemento, nada relacionado a ele tem essa atribuição. Nem sua história, sua importância, suas aplicações, suas características magnéticas, sua tecnologia de fabricação e nem a forma como chegamos a conhecer seu comportamento. Isto é de suma importância para poder aproveitá-lo nas diferentes aplicações, e para isso precisamos de instrumentos e métodos de medição adequados para caracterizá-lo.

Mas temos que reconhecer que as medições magnéticas estão entre as áreas da tecnologia moderna mais complexas e, muitas vezes, pobremente compreendida. Isso se explica, em parte, pela dificuldade inerente de mensurar um fenômeno que não pode ser medido diretamente, mas só por seus efeitos, e também pela falta de consenso e acordo nas diferentes técnicas e terminologias utilizadas pelos cientistas e engenheiros (MOSKOWITZ, 1995).

1.1 REVISÃO DE LITERATURA

Antes de começar a descrever as técnicas e instrumentos utilizados na caracterização dos ímãs permanentes, considere-se a visão a respeito de alguns que já têm a experiência na caracterização de ímãs permanentes:

“As medições magnéticas estão em uma das áreas técnicas mais confusas e pobremente compreendidas da tecnologia moderna,..., originada provavelmente nas grandes diferenças nas técnicas e nos termos empregados pelos pesquisadores de materiais (físicos) e projetistas de produto (engenheiros)” (MOSKOWITZ, 1995);

“Pesquisando a magnetometria achei e examinei centenas de publicações.... Parece que existiram mais métodos e técnicas de medição que estudiosos do magnetismo” (FONER, 1981);

“Algo similar à Torre de Babel ocorre quando tentamos discutir aspectos referentes às medições magnéticas” (TROUT, 2002).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES

Os ímãs permanentes apresentam o fenômeno de histerese: quando uma força magnetizante é aplicada a um material e logo restaurada ao seu valor original, a magnetização resultante de tal material não volta à sua condição inicial.

Tradicionalmente, os laços de histerese são medidos em um anel ou toróide bobinado como se vê na Figura 1. Esta configuração permite confinar o maior fluxo possível no material testado. E, na ausência de entreferros, o campo aplicado estará concentrado no material ferromagnético sob teste.

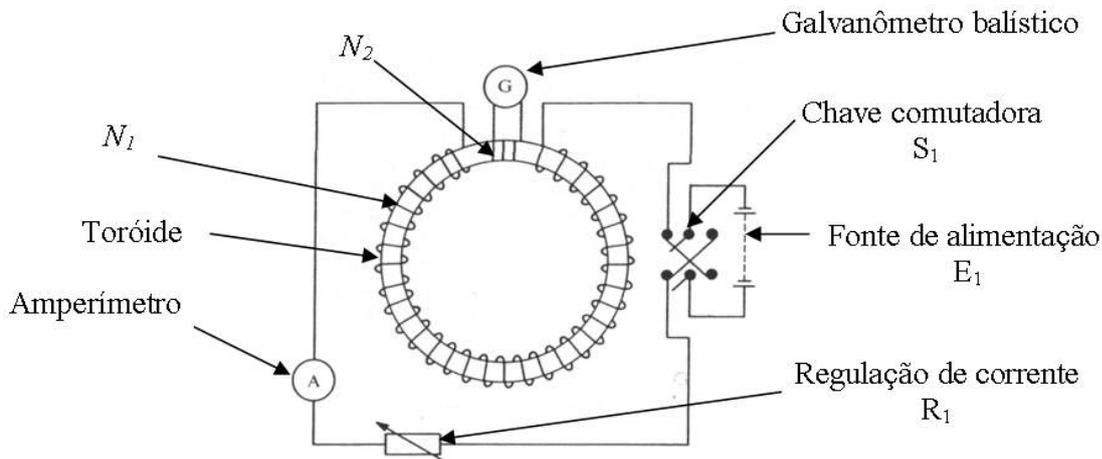


Figura 1. Método tradicional de relevar o laço de histerese nos materiais magnéticos (WRIGHT, 1977).

O toróide contendo o material magnético a ser testado tem um bobinado magnetizante com N_1 espiras através do qual pode circular uma corrente I (em qualquer dos dois sentidos graças a uma chave reversível), regulada por um resistor variável e medida por um amperímetro. Uma bobina de medição com N_2 espiras é conectada a um galvanômetro balístico. Quando a corrente I é modificada, a primeira flutuação do galvanômetro proporciona a medida da mudança na densidade de fluxo B no material. Atualmente, o galvanômetro balístico é substituído por algum tipo de fluxímetro que proporciona uma leitura estável e permite uma observação sem pressa. Mudando então H ciclicamente entre os valores $+H_c$ e $-H_c$, o valor de B terá uma forma de laço fechado simétrico como se vê na Figura 2.

A descrição de um ímã permanente quanto às suas características magnéticas é o que chamamos de caracterização. Uma forma de obtê-la pode ser feita através da análise de um gráfico da histerese do ímã permanente. No primeiro quadrante ele é magnetizado e no segundo quadrante ele trabalha como fonte. Portanto, este trabalho concentra a atenção sobre a parte da curva no segundo quadrante, chamada de característica desmagnetizante ou curva de desmagnetização, Figura 3.

Consideremos inicialmente um material ferromagnético não magnetizado no anel da Figura 1. O campo magnético H é estabelecido por E_1 nas espiras N_1 controlado e revertido por R_1 e S_1 . Com corrente aumentando desde zero, o campo magnético H_m também acompanhará, magnetizando o material conforme o gráfico da Figura 2. A indução ou densidade de

fluxo B_m no material começa em O e vai inicialmente até P com a linha tracejada. Esta é chamada de curva de magnetização inicial. Se agora reduzimos a corrente (campo magnético) a zero, B_m não cai para zero, mas retém um valor residual B_r . É preciso aplicar um campo magnético H_m negativo para forçar B_m ir para zero. Este valor de H_m é conhecido como força coercitiva H_c . Se o processo é alternado, algumas vezes aplicando valores positivos e negativos de campo magnético, é obtido um laço simétrico $P B_r -H_c P' -B_r H_c P$. Esta curva é a curva normal de indução ou histerese e é a base para a avaliação de um material magnético.

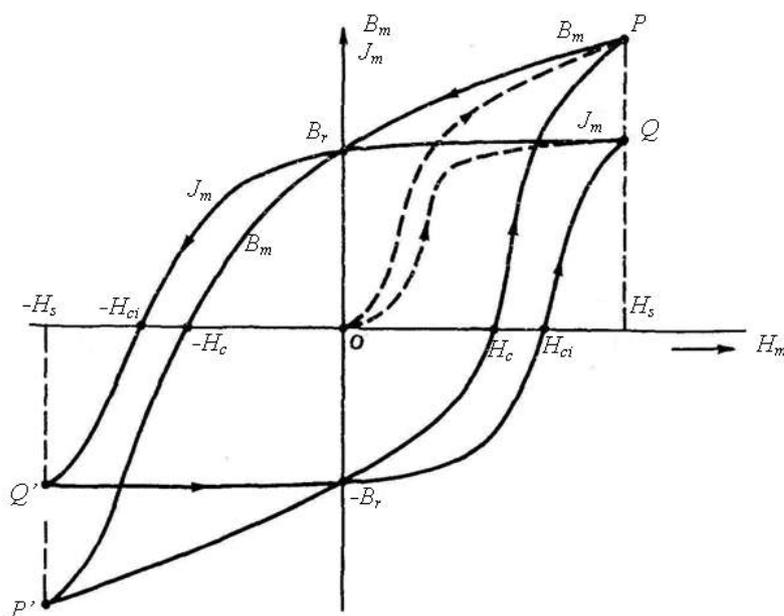


Figura 2. Curvas de indução B e de magnetização intrínseca J de um ímã genérico (PARKER, 1990).

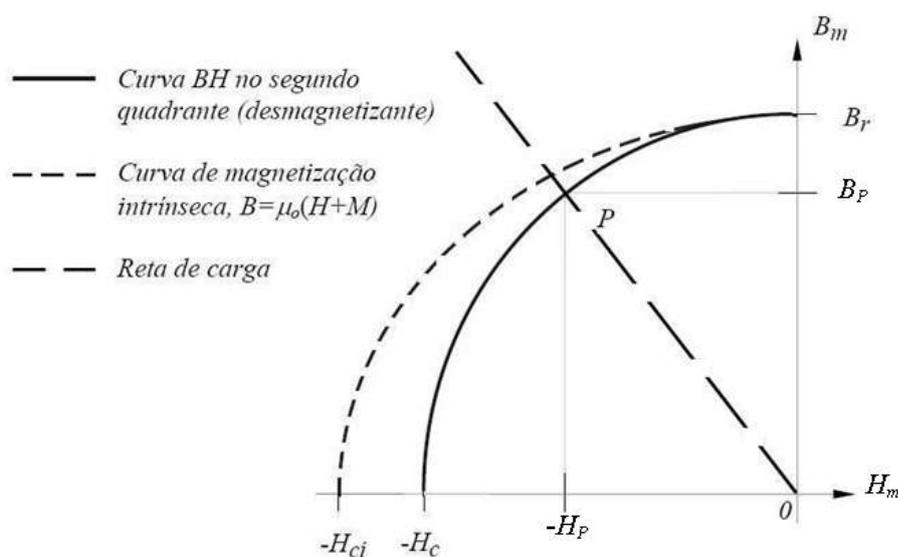


Figura 3. Detalhe de segundo quadrante da curva de indução e de desmagnetização (FLORES FILHO, 2003).

No caso, as grandezas relevantes especificadas como propriedades magnéticas dos ímãs permanentes são:

B_m é a densidade de fluxo magnético em Tesla (T);

B_r é a remanência ou magnetismo residual; é o valor de B do ímã permanente quando $H = 0$; em Tesla (T);

H_m é a intensidade do campo magnético em ampères por metro (A/m);

H_c 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 $M = 0$; em kA/m;

M Magnetização ou momento magnético por unidade de volume de um sólido; em kA/m;

J_m Polarização magnética; é igual a $\mu_0 M$; em Tesla (T);

μ_r permeabilidade relativa de retorno; inclinação da curva BH para $H = 0$ e $B = B_r$;

$(BH)_{max}$ Produto energético máximo do ímã permanente; densidade de energia armazenada ou armazenável no volume do ímã permanente; em kJ/m³.

Se B_m e H_m estão em unidades SI ((T) e (A/m)), as características magnéticas são frequentemente plotadas com o eixo horizontal $\mu_0 H_m$ em lugar de H_m . Isto transforma as unidades do eixo horizontal de A/m para Tesla, de modo que a inclinação da característica de desmagnetização $B_m = f(H_m)$ passa a ser a **permeabilidade relativa de retorno** μ_r . Os ímãs permanentes duros (ver 2.5) têm uma permeabilidade relativa de retorno na ordem de 1.0 – 1.1, perto da permeabilidade do ar.

Na verdade, tanto H , B como M (ou J) são vetores, mas usualmente eles são paralelos e, portanto, neste trabalho as equações serão escritas em forma escalar.

Embora as características magnéticas como máximo produto energético, coercitividade e remanência sejam as principais que definem praticamente um ímã permanente, a maneira mais útil de visualizar as propriedades magnéticas deste elemento é através da porção do laço de histerese no segundo quadrante, ou seja, desde a remanência até a coercitividade. Esta é conhecida como a curva de desmagnetização e é a informação sempre utilizada na hora de decidir se um ímã permanente é adequado ou não para uma determinada aplicação.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES: AS NORMAS INTERNACIONAIS DE PADRONIZAÇÃO

A padronização das medições nos ímãs permanentes foi apresentada pela “International Electrotechnical Commission (IEC)”. Essa é a organização internacional de padronização responsável por estabelecer os padrões de testes dos materiais elétricos e magnéticos. Vários documentos têm sido publicados em relação às técnicas de medição e avaliação dos ímãs permanentes. A **IEC404-5: Materiais ímãs permanentes (magneticamente duros) – Método de medição das propriedades magnéticas (*Permanent magnet (magnetically hard) materials – Method of measurement of magnetic properties*)** está relacionada aos métodos de medição das propriedades magnéticas dos ímãs permanentes.

1.3.1 Alcance da norma

Esta norma tem como propósito definir o método de medição da densidade do fluxo magnético, polarização magnética e da intensidade do campo magnético. Também inclui a determinação da curva de desmagnetização e da linha de retorno (*recoil line*) dos ímãs permanentes os quais serão supostos homogêneos em seu volume. E assim trata da escolha da geometria da amostra em relação à estrutura eletromagnética, da uniformidade do campo e nível de saturação dos pólos e também descreve a localização dos sensores para B e H .

O desempenho de um sistema magnético não depende só das propriedades do ímã permanente, mas também das dimensões do sistema, do entreferro e dos outros elementos do circuito magnético. Os métodos descritos se referem às medições das propriedades magnéticas em um circuito magnético fechado sem entreferro. A IEC404-5 é única norma disponível de medição e caracterização de ímãs permanentes.

1.3.2 Definições

Para ímãs permanentes esta norma tem que ver tanto com a determinação da coercitividade H_c como da coercitividade intrínseca H_{ci} .

As especificações das medições são tanto para a densidade de fluxo magnético B_m e para a polarização magnética J_m como função da intensidade do campo magnético H_m . As quantidades mencionadas estão relacionadas pela seguinte equação:

$$B_m = \mu_0 H_m + J_m \quad (1)$$

onde

μ_0 é a permeabilidade magnética do vácuo igual a $4\pi \times 10^{-7}$ henrys por metro (H/m).

Com esta relação, H_{ci} pode ser obtido da curva de histerese $J_m(H_m)$ e H_c pode ser obtido do laço de histerese $B_m(H_m)$. O ponto em que o módulo do produto $B \times H$ tem o máximo valor é denominado ponto de trabalho para $(BH)_{max}$.

1.3.3 Eletromagneto e as condições para a magnetização

As medições são realizadas em um circuito magnético fechado com um eletromagneto construído com material magnético macio e a amostra para ser testada. A construção das culatras deverá ser simétrica; ao menos um dos pólos deverá ser móvel para minimizar o entreferro entre a amostra e as peças polares, Figura 4. As superfícies das peças polares devem estar tão polidas, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo da amostra como seja possível para minimizar o entreferro, Figura 5.

Para obter um campo de magnetização suficientemente uniforme no espaço ocupado pela amostra de teste, devem-se levar em conta as condições a seguir enumeradas.

1.3.3.1 Condições geométricas

Em relação com a Figura 4 (IEC404-5, 1993):

$$d_1 \geq d_2 + 1,2l_1 \quad (2)$$

$$d_1 \geq 2,0l_1 \quad (3)$$

onde

d_1 é o diâmetro da peça polar circular ou a dimensão de menor lado de uma peça polar retangular, em milímetros (mm);

l_1 é a distância entre as peças polares, em milímetros (mm);

d_2 é o máximo diâmetro do volume cilíndrico com um campo homogêneo, em milímetros (mm).

Com referência à intensidade de campo magnético no centro do entreferro, a condição da equação (2) assegura que a máxima diminuição de campo a uma distância radial de $d_2/2$ é de 1%, e a condição estabelecida pela equação (3) assegura que o máximo incremento de campo ao longo do eixo do eletromagneto nas faces polares é de 1%.

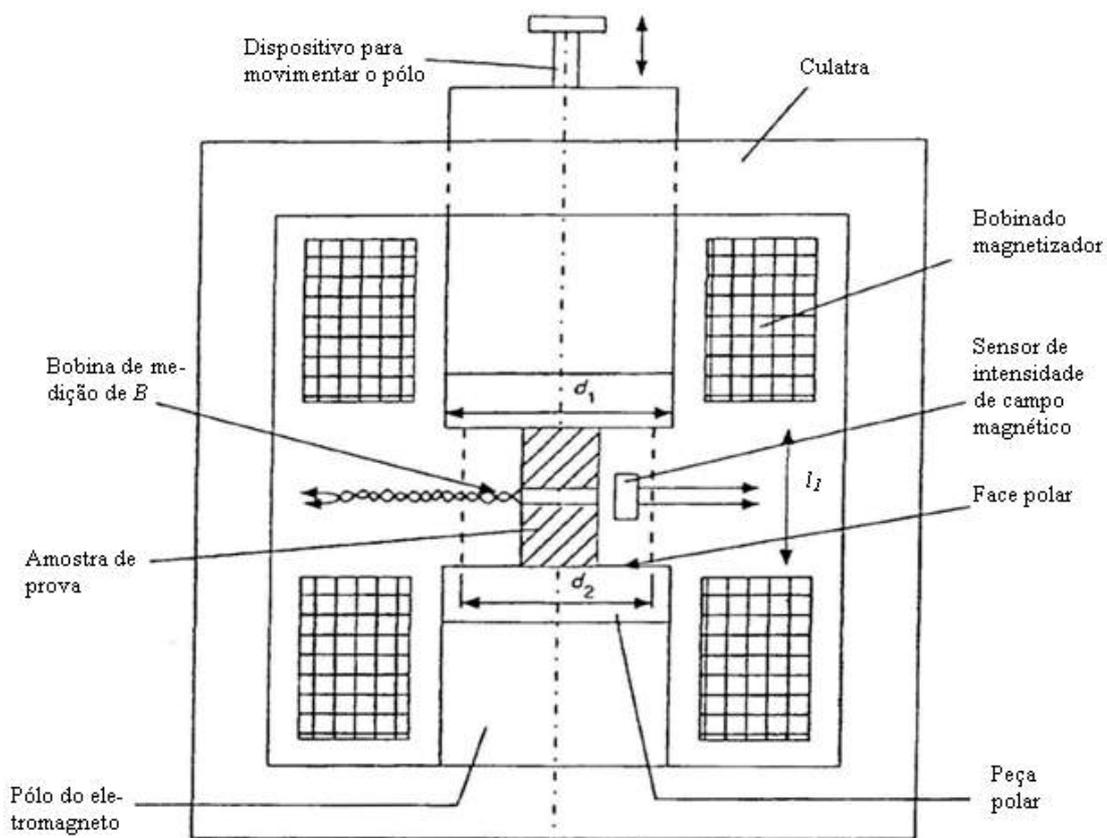


Figura 4. Diagrama do eletromagneto (IEC404-5, 1993).

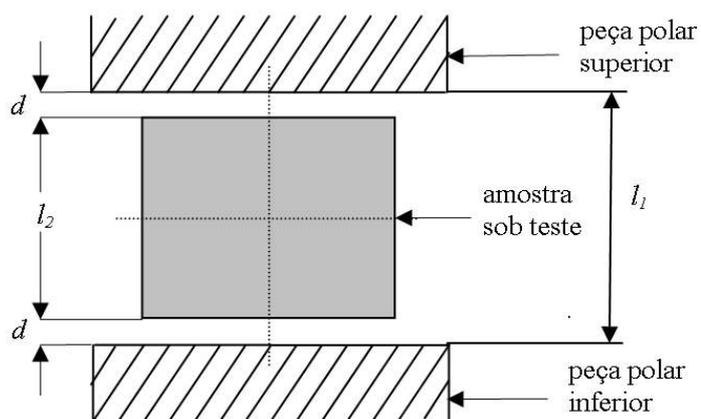


Figura 5. Entreferro (IEC404-5, 1993).

Nota – Para certas medições, a culatra e os pólos podem ser laminados para diminuir as correntes parasitas. Normalmente a coercitividade do material não deve ser maior que 100 A/m (1,26 Oe).

1.3.3.2 Condições eletromagnéticas

Durante as medições da curva de desmagnetização, a densidade de fluxo nas peças polares deve manter-se substancialmente abaixo da polarização magnética de saturação de modo as faces polares sejam tão próximas quanto possível de superfícies equipotenciais. Segundo a prática, a densidade de fluxo magnético deve ser menor que 1 T (10 kG) no ferro e menos de 1,2 T (12 kG) em ligas de ferro contendo 35% a 50% cobalto (Permendur).

A culatra é excitada por bobinas dispostas simetricamente tão perto quanto possível da amostra como mostra a Figura 4. O eixo da amostra deve ser coincidente com o eixo das bobinas.

Antes das medições, a amostra deve ser magnetizada em um campo magnético H_{max} que a leve próximo da saturação. A determinação da curva de desmagnetização deve então se realizar em um campo magnético na direção contrária à magnetização inicial. Caso não seja possível magnetizar a amostra até próximo da saturação (ímãs de Terras Raras), a magnetização deve ser realizada fora do eletromagneto em uma bobina supercondutora ou em magnetizador pulsante. Em qualquer caso, o processo de magnetização não deve provocar um aquecimento excessivo na amostra.

1.3.4 Amostra

A amostra deve ter uma forma simples, por exemplo, de cilindro reto ou paralelepípedo. O comprimento l_2 da amostra não deve ser menor que 5 mm, e suas outras dimensões devem ser no mínimo de 5 mm e ser tais que a amostra e o dispositivo de medição devem estar dentro do diâmetro d_2 como foi definido em [IEC404-5, 1993].

As faces da amostra devem ser entre elas tão paralelas quanto possível e perpendiculares ao eixo da amostra para reduzir o entreferro.

A área da seção transversal da amostra deve ser tão uniforme quanto possível ao longo do seu comprimento; qualquer variação deve ser menor que 1% de sua menor área transversal. A área transversal média deve ser determinada em 1%, e a amostra deve estar marcada com a direção de magnetização [IEC404-5, 1993].

1.3.5 Determinação da densidade de fluxo magnético

As mudanças na densidade de fluxo magnético na amostra são determinadas integrando as tensões induzidas na bobina exploradora.

Esta bobina exploradora deve ser bobinada tão perto da amostra quanto seja possível e simetricamente com respeito às faces polares. Os condutores de interconexão devem estar bem retorcidos para evitar erros provocados por tensões espúrias induzidas nos laços de conexão ao instrumento.

O erro total da medição de densidade de fluxo magnético deve não ser maior que $\pm 2\%$.

A variação da densidade de fluxo magnético aparente ΔB_{ap} , não corrigida por fluxo no ar, entre dois instantes t_1 e t_2 é dado por [IEC404-5, 1993]

$$\Delta B_{ap} = B_2 - B_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (4)$$

onde

B_2 é a densidade de fluxo magnético no instante t_2 em teslas (T);

B_1 é a densidade de fluxo magnético no instante t_1 em teslas (T);

A é a área de seção transversal da amostra, em metros quadrados (m^2);

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ é a integração da tensão induzida, em webers (Wb), pelo intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) em segundos (s).

Esta mudança na densidade de fluxo magnético aparente ΔB_{ap} deve ser corrigida para levar em conta o fluxo no ar incluído na bobina exploradora. Então, a mudança na densidade de fluxo magnético ΔB na amostra é dado por [IEC404-5, 1993]:

$$\Delta B = \Delta B_{ap} - \mu_0 \Delta H \frac{(A_t - A)}{A} \quad (5)$$

onde

ΔH é a mudança na intensidade de campo magnético medido, em ampères por metro (A/m);

A_t é a área de seção transversal média da bobina exploradora, em metros quadrados (m^2).

1.3.6 Determinação de polarização magnética

As mudanças na polarização magnética na amostra são determinadas por integração das tensões induzidas em duas bobinas exploradoras, sendo que a amostra fica contida por uma só delas. Se cada uma das bobinas tem o mesmo produto de área de seção transversal e número de espiras, e se ambas estão conectadas eletricamente em oposição, a mudança de polarização magnética ΔJ na amostra é dada por [IEC404-5, 1993]

$$\Delta J = J_2 - J_1 = \frac{1}{AN} \int_{t_1}^{t_2} U dt \quad (6)$$

onde

J_2 é a polarização magnética no instante t_2 em teslas (T);

J_1 é a polarização magnética no instante t_1 em teslas (T);

A é a área de seção transversal da amostra, em metros quadrados (m^2);

$\int_{t_1}^{t_2} U dt$ é a integração da tensão induzida, em webers (Wb), pelo intervalo de tempo ($t_2 - t_1$) em segundos (s).

Então a saída da bobina 1 compensa a saída da bobina 2 exceto para J dentro da amostra.

Devido a não ser necessária a correção de fluxo no ar, podem ser medidas amostras com diferente seção transversal usando as mesmas bobinas exploradoras.

As duas bobinas exploradoras devem ficar totalmente dentro do campo magnético homogêneo definido pelas condições (2) e (3).

O erro total de medição não deve ser maior que $\pm 2\%$ [IEC404-5, 1993].

1.3.7 Medição da intensidade do campo magnético

A intensidade de campo magnético na superfície da amostra é igual à intensidade de campo magnético dentro da amostra só naquela região do espaço onde o vetor campo magnético é paralelo à superfície lateral da amostra. Portanto, o sensor de intensidade de campo magnético é localizado na zona de campo magnético homogêneo tão próximo da amostra quanto seja possível e simétrico com respeito às faces polares.

Para determinar a intensidade de campo magnético pode ser usado uma bobina exploradora plana, um potenciômetro magnético ou uma sonda Hall junto com instrumentos ade-

quados. As dimensões do sensor de campo magnético e sua localização devem ser tais que fiquem dentro da área limitada pelo diâmetro d_2 , de acordo com as condições (2) e (3).

Para reduzir o erro de medição, o entreferro entre a amostra e as peças polares deve ser pequeno. A influência de entreferro é considerada a seguir.

O sistema de medição da intensidade do campo magnético deve ser calibrado. O erro total de medição não deve ser maior que $\pm 2\%$ [IEC404-5, 1993].

1.3.8 Determinação da curva de desmagnetização

A curva de desmagnetização pode ser obtida ou plotada como $B_m(H_m)$ ou $J_m(H_m)$. A conversão de uma medição de B em uma de J e vice-versa poder ser obtida elétrica ou numericamente, subtraindo ou adicionando respectivamente $\mu_0 H_m$ de acordo com a equação (1).

A determinação das curvas $B_m(H_m)$ é descrita a seguir. No caso de curvas $J_m(H_m)$ é seguido um raciocínio análogo.

As medições devem ser feitas numa temperatura ambiente de $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$ [IEC404-5, 1993]. A temperatura da amostra deve ser medida por um sensor não magnético fixado às peças polares do eletromagneto. Qualquer dependência da temperatura de um instrumento de medição deve ser levada em conta.

1.3.8.1 Amostra magnetizada no eletromagneto

A bobina exploradora usada para medição de B_m ou J_m é conectada a um integrador de fluxo calibrado e ajustado a zero. A amostra é inserida dentro da bobina exploradora, montada dentro do eletromagneto e magnetizada até saturação. A corrente de magnetização é logo reduzida a um valor pequeno, zero ou revertida se necessário, para produzir uma intensidade de campo magnético nulo. É registrado o valor correspondente da densidade de fluxo magnético ou polarização.

Com a corrente na direção reversa àquela usada para magnetização, esta é incrementada até que a densidade de fluxo magnético cai a zero registrando-se o valor da intensidade do campo magnético como H_c . Continua-se incrementando a corrente até que a polarização magnética cai a zero registrando-se o valor da intensidade de campo magnético como H_{ci} . A velocidade de variação da intensidade de campo magnético deve ser o suficientemente baixa para evitar o surgimento de uma diferença de fase entre H_m e B_m por correntes parasitas na amostra. Em alguns materiais existe um retardo significativo entre a mudança de densidade de fluxo magnético e a mudança na intensidade de campo. Neste caso, a constante de tempo do integra-

dor de fluxo deve ser suficientemente longo e a variação do nível DC (drift) é suficientemente baixo para assegurar uma integração confiável.

Correspondentes valores de H_m e B_m ou H_m e J_m na curva de desmagnetização devem ser obtidos tanto por uma curva contínua produzida por um registrador conectado às saídas dos medidores de intensidade de campo magnético e de densidade de fluxo, ou por medições ponto a ponto das mesmas variáveis mencionadas.

1.3.8.2 Amostra magnetizada em bobina supercondutiva ou magnetizador pulsante

Neste caso a amostra é magnetizada até a saturação de acordo com a seção 1.3.3. A bobina exploradora usada para medição de B_m ou J_m é conectada a um integrador de fluxo calibrado e ajustado a zero. A amostra é inserida dentro da bobina exploradora, montada dentro do eletromagneto e magnetizada na mesma direção em que foi magnetizada previamente. A corrente é agora reduzida até produzir uma intensidade de campo magnético zero. O correspondente valor de densidade de fluxo magnético é registrado como B_r ou polarização magnética J_r . Os procedimentos seguintes são os mesmos já descritos em 1.3.8.1.

1.3.9 Determinação das principais características

As características de remanência, $(BH)_{max}$, coercitividade, linha de retorno e permeabilidade de retorno são obtidas como a seguir.

1.3.9.1 Remanência magnética

A remanência magnética é obtida na intersecção da curva de desmagnetização com o eixo B_m ou J_m .

1.3.9.2 Produto $(BH)_{max}$

O produto $(BH)_{max}$ é o máximo valor do módulo do produto dos valores correspondentes de B_m e H_m na curva de desmagnetização do segundo quadrante.

Os seguintes são exemplos de métodos para obtenção deste produto:

- 1) avaliação por leitura direta ou interpolação de uma família de curvas de $B.H = \text{constante}$;
- 2) cálculo do produto $B.H$ para um número de pontos da curva de desmagnetização e assegurando que o valor máximo foi coberto;
- 3) avaliação por multiplicação de B e H eletronicamente e plotando o produto como função de H ou B .

1.3.9.3 Coercitvidades H_c e H_{ci}

A coercitvidade H_c é dada pela intersecção da curva de desmagnetização com o eixo de $B_m = 0$. A coercitvidade H_{ci} é dada pela intersecção da curva de desmagnetização com o eixo de $J_m = 0$, Figura 7.

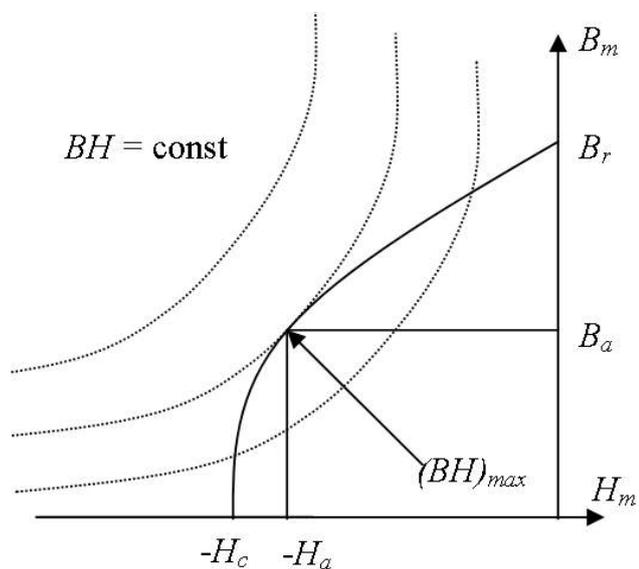


Figura 6. Curva de desmagnetização mostrando o ponto de $(BH)_{max}$ (IEC404-5).

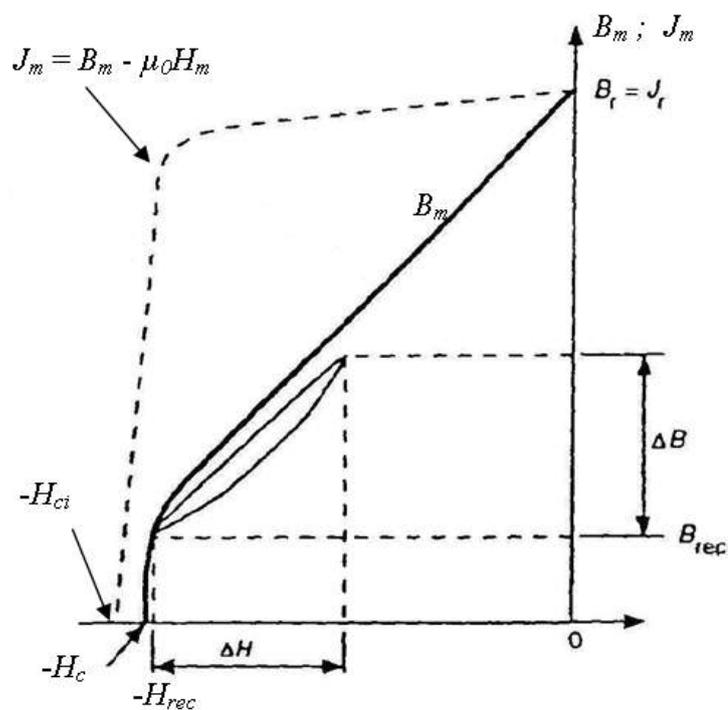


Figura 7. Curva de desmagnetização e laço de retorno (IEC404-5, 1993).

1.3.9.4 Determinação da linha de retorno (*recoil*) e da permeabilidade de retorno

Para o ponto de **partida** B_{rec} , H_{rec} da linha de retorno, Figura 7, a amostra deve estar previamente magnetizada por uma intensidade de campo magnético H_{max} . Diminuindo a corrente, mudando o sentido e passando por B_r prossegue-se aumentando a corrente já no segundo quadrante até alcançar H_{rec} . Logo, a intensidade de campo magnético é reduzida por um valor ΔH , e a correspondente mudança na densidade de fluxo magnético ΔB é medida. A permeabilidade relativa de retorno μ_r é calculada como [IEC404-5, 1993]

$$\mu_r = \frac{1}{\mu_0} \frac{\Delta B}{\Delta H} \quad (7)$$

onde

ΔB é a mudança em a densidade de fluxo magnético correspondente a uma mudança de ΔH , em teslas (T);

ΔH é a mudança na intensidade de campo magnético desde H_{rec} , em ampères por metro (A/m).

Devido à permeabilidade de retorno não ser usualmente constante ao longo da curva de desmagnetização, os valores de H_{rec} , B_{rec} e ΔH devem ser indicados.

1.3.10 Reproducibilidade

A reproducibilidade das medições é caracterizada por um desvio padrão dado na Tabela 1:

Tabela 1. Reproducibilidade da medição das características magnéticas de materiais ímãs permanentes (IEC404-5, 1993).

Parâmetro	AlNiCo	Ferrites e ímãs de Terras Raras
B_r	1%	2%
H_c	1%	2%
$(BH)_{max}$	1,5%	3%

1.3.11 Relatório

O relatório das medições deve conter, se aplicável:

- forma e dimensões da amostra;
- tipo de culatra usada (simples ou dupla);
- temperatura da amostra durante a medição;

- a temperatura ambiente;
- o valor do campo magnetizante H_{max} ;
- tipo e identificação do material usado;
- curva de desmagnetização;
- remanência magnética B_r ou J_r ;
- coercitividade H_c e H_{ci} ;
- produto $(BH)_{max}$;
- valores de B_m e H_m para $(BH)_{max}$, isto é, B_a e H_a , 1.3.9.3;
- permeabilidade de retorno μ_r e os valores B_{rec} , H_{rec} e ΔH ;
- no caso de material anisotrópico, a direção de magnetização com respeito ao eixo preferido do material, se este ângulo difere de zero graus;
- incerteza estimada das medições;
- tipo de sensor usado para H_m , B_m ou J_m .

1.3.12 Influência do entreferro entre a amostra e as faces polares

O máximo erro relativo da medição da intensidade do campo magnético, $\Delta H/H$, devido ao entreferro, pode ser calculado aproximadamente da equação [IEC404-5, 1993]

$$\frac{\Delta H}{H} = \frac{2Bd}{\mu_0 l H} \quad (8)$$

onde

B , H são os valores da densidade de fluxo magnético, em teslas (T), e da intensidade do campo magnético em ampères por metro (A/m), respectivamente, em um ponto dado da curva de desmagnetização;

l é o comprimento da amostra em metros (m), Figura 5;

d é o comprimento do entreferro entre uma face da amostra e a peça polar, em metros (m).

Por exemplo, perto do ponto $(BH)_{max}$, o erro é de 1% para as relações de d/l , Tabela 2.

Tabela 2. Influência do entreferro para diferentes materiais (IEC404-5, 1993).

Material	d/l
AlNiCo 37/5	0,00025
Hard ferrite 25/14	0,1003
RECo 120/96	0,005

1.4 CARACTERIZAÇÃO DOS ÍMÃS PERMANENTES - AS ALTERNATIVAS EXISTENTES

As três alternativas mais conhecidas para caracterizar um ímã permanente são:

1. Magnetometria de Amostra Vibrante;
2. Permeâmetro ou Histerisímetro;
3. Magnetometria com Campo Pulsante.

E outras alternativas válidas para fazer medições num ímã permanente são:

4. Bobinas de Helmholtz;
5. Bobina exploradora;
6. Gaussímetro com sonda Hall ou magnetorresistiva;
7. Bobina de potencial.

De fato, cada técnica de medição tem méritos e limitações; não existe uma única técnica universalmente aplicável a todas as possibilidades de medição de todas as características de um ímã permanente (FONER, 1981), (TROUT, 2002). As três primeiras poderiam ter concentradas as principais possibilidades de caracterização de um ímã, mas, como veremos, nem sempre é buscada a determinação de todos os parâmetros.

Para um pesquisador, um instrumento ou método que apresente o H_{ci} e a temperatura Curie é o necessário, para um outro cientista o importante é confirmar o B_r , o $(BH)_{max}$ e o H_{ci} . Para um fabricante de ímãs é importante dispor da curva de histerese depois de ter o ímã completamente magnetizado. Para um fabricante de motores poderia ser importante a característica de segundo quadrante do ímã e, claro, a performance do conjunto.

O objetivo desta primeira parte é apresentar cada uma das alternativas existentes, uma breve introdução da sua história, as pesquisas desenvolvidas ao redor dela, com seus aspectos vantajosos e seus pontos fracos.

1.4.1 Magnetometria de Amostra Vibrante (VSM)

Este instrumento foi inventado há 50 anos por Simon Foner (FONER, 1996). O momento magnético de uma amostra é detectado por bobinas exploradoras próximas à amostra em um campo magnético ajustável. Este campo pode ser produzido por um eletromagneto, ímã supercondutivo ou um magneto Bitter, Figura 8.

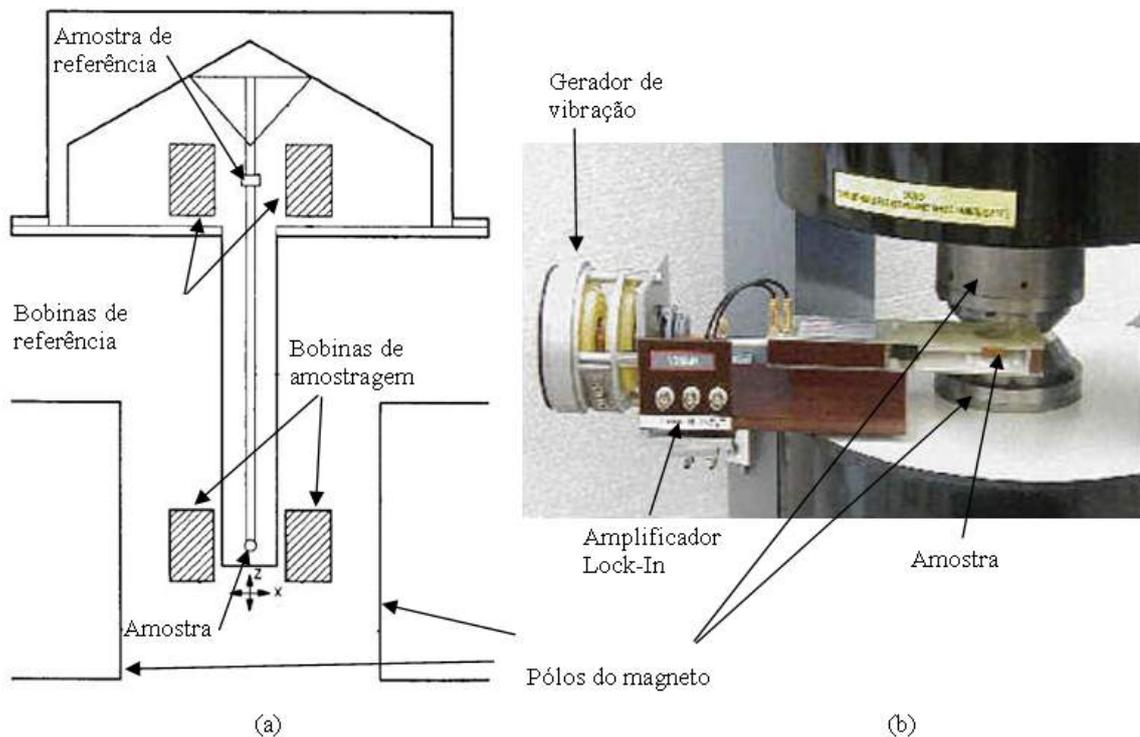


Figura 8. (a) Diagrama do primeiro VSM (FONER, 1959), (b) VSM comercial (HIRST, 2006).

É um instrumento muito sensível, adequado para medição de campos magnéticos fracos, tanto para amostras sólidas ou em pó. Para as amostras em pó é considerado o principal instrumento de teste. A temperatura pode ser variada em uma ampla faixa sem dificuldades. O momento magnético é usualmente calibrado com um padrão de Ni, estabelecendo-se que $4\pi M_s = 6115$ Gauss (0,6115 T) a 10 kOe (795.774,7 A/m) e 20°C.

Sendo esta uma medição em circuito aberto, é requerida uma correção para a auto-desmagnetização, 2.1. Como amostras sólidas são usados cubos ou esferas desde que elas tenham fatores de desmagnetização bem definidos. A correção para pó é mais problemática, sem solução ideal. A única solução prática é a seleção de um fator de correção arbitrário para usá-lo consistentemente. Com um magneto supercondutivo ou Bitter, o VSM permite obter o laço de histerese inteiro, mesmo para ímãs de Terras Raras com grande H_{ci} . No entanto, os eletromagnetos são mais usados geralmente com um campo máximo típico de menos de 20 kOe (1,6 MA/m). Como resultado, algumas amostras não serão totalmente saturadas, exceto externamente por um magnetizador de pulso, e H_{ci} não poderia ser medido. O teste é usualmente uma medição destrutiva quando é feita sobre um ímã, devido à amostra ser cortada de uma peça maior. Os resultados podem não ser representativos de todo o ímã permanente, mas só da amostra testada. Os tamanhos factíveis de utilizar como amostras podem ter de 3 a 7 mm de diâmetro e até 7 mm de comprimento.

As amostras em pó podem ser bem pequenas, menos de uma grama. Mas isto também representa dificuldades. Enquanto a medição sobre pó é um bom indicador, prever as propriedades finais do ímã não é tão fácil como poderia parecer devido em parte às dificuldades na correção por auto-desmagnetização.

As medições atuais com VSM reportam exatidões da ordem de 1% para B e J em função de H e de 2% para o máximo produto energético.

As vantagens deste método são:

- sensível e exato;
- fácil de modificar a temperatura;
- abrange quase todo o segundo quadrante;
- adequado para amostras em pó.

E suas desvantagens seriam:

- deve ser conhecido o peso e a densidade da amostra;
- é preciso fazer correção para a auto-desmagnetização.
- campo limitado; freqüentemente não é suficiente para saturar a amostra ou medir H_{ci} ;
- a amostra deve ter dimensões especiais (usualmente é destrutivo).

1.4.2 Permeâmetro ou Histerisímetro

O histerisímetro é um instrumento para medição em circuito fechado e comumente usado para a caracterização de ímãs permanentes, Figura 9. Não é requerida correção por auto-desmagnetização, nem por erros produzidos por correntes parasitas como é o caso do PFM, ver 1.4.3. Ele fornece campo magnético mais elevado, comparado com o VSM de eletromagneto, devido ao fato de que o entreferro no histerisímetro é essencialmente zero. No entanto, este campo não é suficiente para saturar a maioria dos ímãs de Terras Raras, os quais são usualmente saturados com um magnetizador pulsante. Frequentemente o campo é suficiente para obter H_{ci} .

Em um histerisímetro, a amostra pode apresentar maiores dimensões que as amostras usuais utilizados em um VSM ou em um PFM, deve ter seção transversal uniforme e deve ser posicionada entre as faces de um eletromagneto.

Em virtude da observação da conservação do fluxo através de uma interface, a componente normal da densidade de fluxo é contínua; então a indução magnética B_m no ímã permanente pode ser medida, seja por uma bobina que envolve a amostra, ou por uma pequena bobi-

na inserida dentro de uma das peças polares (*pole tips*). Em qualquer das duas opções, é preciso medir as variações de fluxo com um fluxímetro integrador, de acordo com 1.4.5.



Figura 9. Histerisímetro comercial (WALKER SCIENTIFIC, 2006).

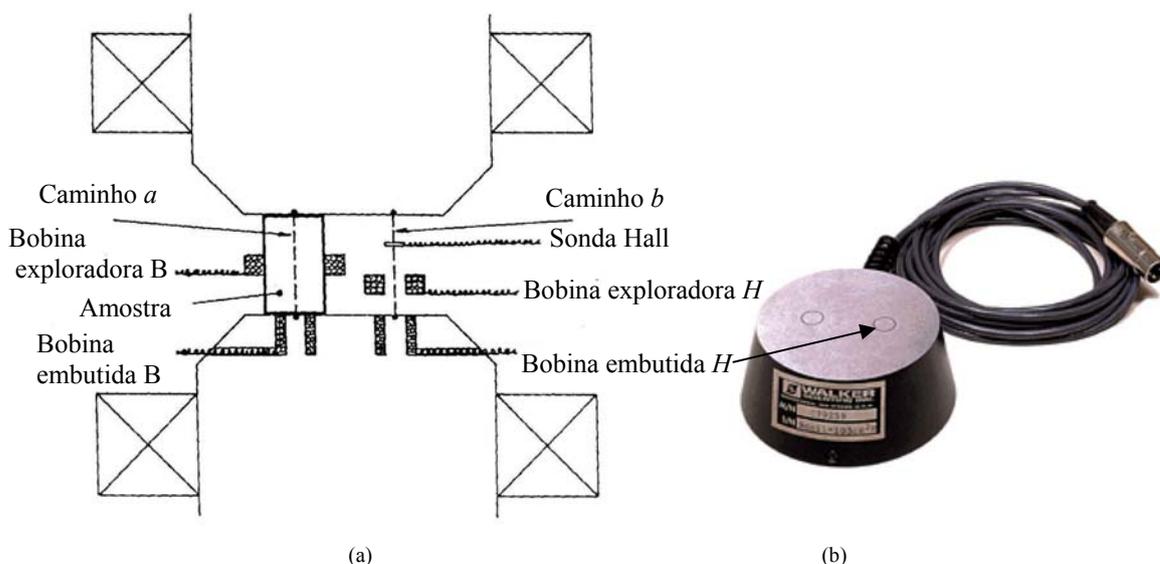


Figura 10. (a) Histerisímetro com bobinas exploradoras embutidas em um pólo (CAMPBELL, 1994), (b) versão comercial (WALKER SCIENTIFIC, 2006).

Em um histerisímetro de CC (conhecido assim porque o laço de histerese não é obtido com corrente de magnetização/desmagnetização de CA de freqüência industrial, mas com uma corrente contínua variável em amplitude e com o tempo de forma manual ou automática) a velocidade de excitação de corrente é estabelecida como um compromisso que deve atender duas situações antagônicas: se a variação é muito rápida, é possível observar diferenças de fase entre B e H , produzindo-se erros na curva de histerese; se é muito lenta, é possível incorporar erros devido ao integrador eletrônico do fluxímetro.

Com a incorporação de novos componentes eletrônicos e novas técnicas de medição com ADC (conversor analógico/digital), a aquisição de dados com baixa frequência já não é mais uma dificuldade nem uma fonte de erros apreciável.

A força magnetizante H dentro de um material magnético deve ser deduzida por medições indiretas feitas fora do material.

Se a equação

$$\oint Hdl = 0 \quad (9)$$

é aplicada ao longo de um laço fechado que inclui os caminhos a e b mostrados na Figura 10(a), não existirá uma contribuição significativa à integral dos caminhos através de cada extremidade de pólo juntando a e b . Ainda mais, se as superfícies polares são co-planares, então os comprimentos dos caminhos a e b são idênticos, e H dentro da amostra é igual ao H em qualquer lugar dentro do campo uniforme no entreferro. Portanto, H no ímã permanente é deduzido da medição de $B (= \mu_0 H)$ ao longo do caminho b usando um sensor Hall, uma bobina exploradora ou uma bobina inserida ou embutida numa das faces polares.

Na caracterização de ímãs permanentes com produto energético muito elevado, a suposição de que o campo interno do ímã permanente é o mesmo que o campo adjacente à amostra pode ser uma fonte de erro.

Na Figura 11 é comparado o caso em que as peças polares não estão saturadas e formam um plano equipotencial $H = H'$ com o caso em que a saturação leva H dentro do ímã a ser menor que o campo medido no exterior, então $H \neq H'$. Para este caso, se podem obter resultados melhores usando uma bobina de potencial incorporada (potenciômetro de Chattock), Figura 12.

Este instrumento é adequado para amostras com uma seção transversal e espessura constante (peças planas), mas não é adequado para pós.

As medições com histerisímetro reportam 1% de exatidão para $B(H)$ e $J(H)$ e 2% para máximo produto energético.

As suas vantagens são:

- quase qualquer amostra delgada pode ser testada;
- não é requerida correção por auto-desmagnetização;
- campo magnetizante maior que em VSM;
- abrange quase todo o segundo quadrante.

Já as suas desvantagens são:

- lento, devido, principalmente, à preparação da amostra;
- necessidade de magnetizar previamente os ímãs permanentes de terras raras.

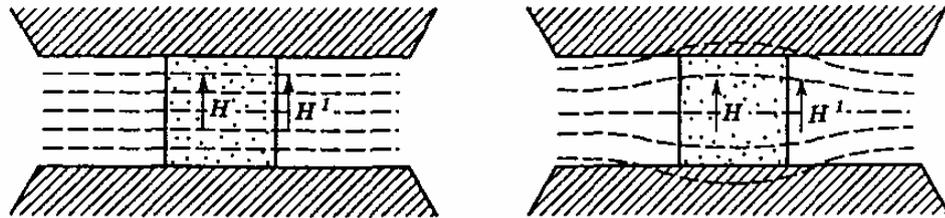


Figura 11 Planos de potencial entre polos de alta permeabilidade (PARKER, 1990).

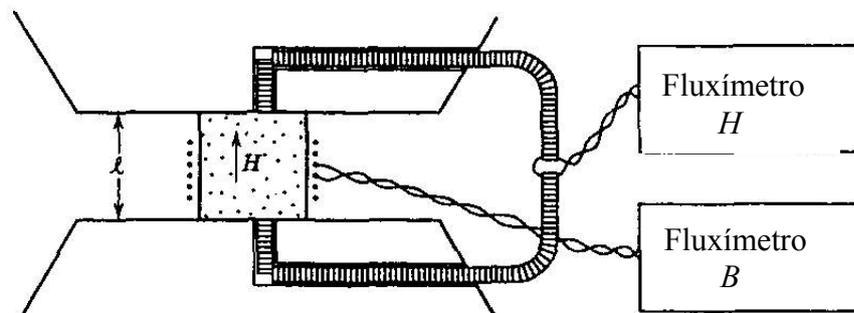


Figura 12. Medição da diferença de potencial magnético entre polos (PARKER, 1990).

1.4.3 Magnetometria com Campo Pulsante (PFM)

Até o aparecimento dos ímãs permanentes de Terras Raras com coercitividade intrínseca muito superior a dos ímãs permanentes de ferrite ou alnico, um ímã permanente ou amostra era passível de se magnetizar e caracterizar com um histerisímetro de circuito magnético fechado (permeâmetro). Sabendo que:

- para saturar um ímã permanente é preciso um campo magnético entorno de 3 a 5 vezes maior que o H_{ci} ;
- que um ímã de Terras Raras pode ter um H_{ci} perto de 4 MA/m (50 kOe);
- admitindo que um sistema de culatra de Fe pode suportar até 2 MA/m (25 kOe) sem saturação, as alternativas possíveis são as de circuito magnético aberto, ou seja, eletromagneto supercondutivo ou magnetizador de campo pulsante. Em laboratórios de pesquisa é possível encontrar algum VSM supercondutivo, mas são de alto custo, produzindo um campo máximo de 12 MA/m.

Uma alternativa que satisfaz tanto o aspecto econômico como a necessidade de um grande campo magnético é a geração pulsante. Sistemas experimentais alcançam 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).

Em um magnetizador pulsante de alta corrente temos um solenóide dentro do qual a peça de ímã ou amostra é colocada; então um pulso de corrente de curta duração é aplicado ao solenóide que deve gerar um campo magnético uniforme por todo o volume do ímã, Figura 13.

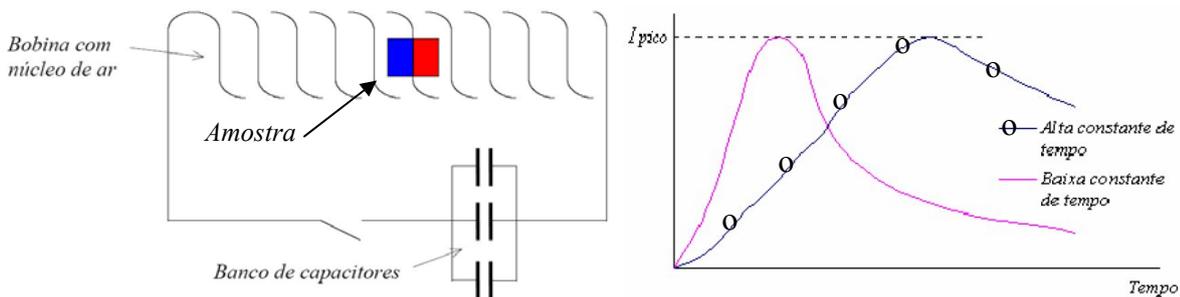


Figura 13. Modelo simplificado de um magnetizador pulsante e seu impulso de corrente (FLORES FILHO, 2003).

A duração do pulso magnetizante precisa satisfazer duas condições contraditórias: ser aplicado pelo máximo tempo possível sem sobreaquecer o magnetizador e no tempo mais curto possível que não produza significativas correntes parasitas na peça de ímã. Essas tendem a aquecê-la e assim produzir danos na microestrutura que irão afetar as características magnéticas da amostra (FLORES FILHO, 2003).

Na Figura 14 podemos ver um diagrama de blocos de um PFM industrial. Por este método pode-se obter o laço de histerese muito rapidamente. As medições podem ser feitas desde -40 até 200°C sem grandes dificuldades. 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 interferido nos sinais induzidos nas bobinas exploradoras do magnetômetro.

Como nos sistemas de medição anteriores, as exatidões obtidas nas medições de B_m e J_m são de 1% aprox. e de 2% no produto energético máximo.

As suas vantagens:

- extremamente rápido;
- altos campos magnéticos; obtenção do laço de histerese completo;

- adequado para amostras em pó.

E suas desvantagens:

- requer correção do efeito das correntes parasitas;
- requer correção da auto-desmagnetização.

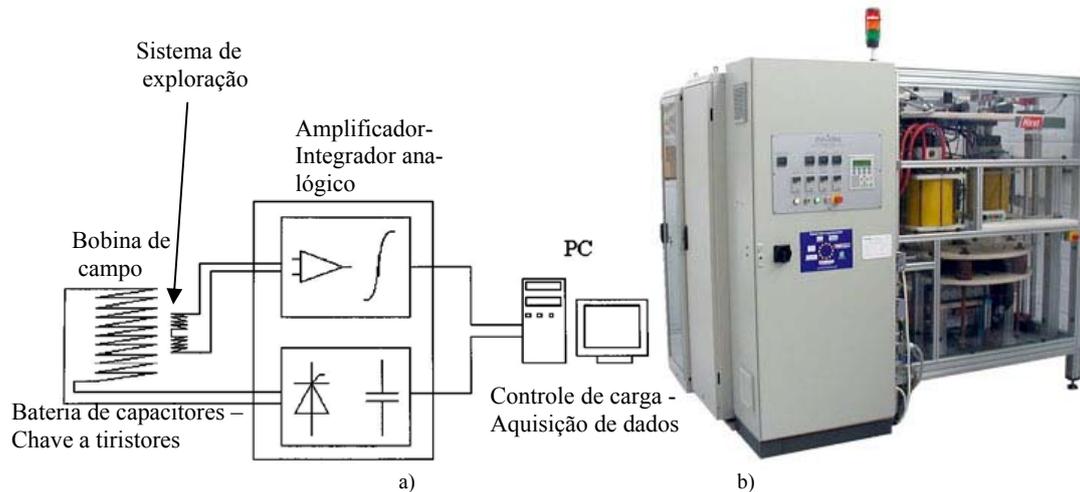


Figura 14. a) Diagrama de blocos de um magnetômetro de campo pulsante (GRÖSSINGER, 2002), b) versão comercial (HIRST, 2006).

1.4.4 Bobinas de Helmholtz

As bobinas de Helmholtz são um par de enrolamentos delgados, paralelos e idênticos, separados por uma distância igual a seu raio, Figura 15 e Figura 16. Elas foram pensadas inicialmente para produzir um campo magnético uniforme sobre um grande volume de espaço situado entre elas. Consiste de duas bobinas planas coaxiais, cada uma contendo N espiras, com corrente fluindo no mesmo sentido em cada bobina como mostra a Figura 15(a). A separação entre as bobinas é igual a seu raio a . A componente axial do campo magnético no eixo das duas bobinas pode ser calculada pela lei de Biot-Savart. Sendo que o campo no eixo de uma bobina simples de N espiras e raio a com corrente circulante i a uma distância x do plano formado pela bobina é:

$$H = \left(\frac{Ni}{2a} \right) \left(1 + \frac{x^2}{a^2} \right)^{-1,5} \quad (10)$$

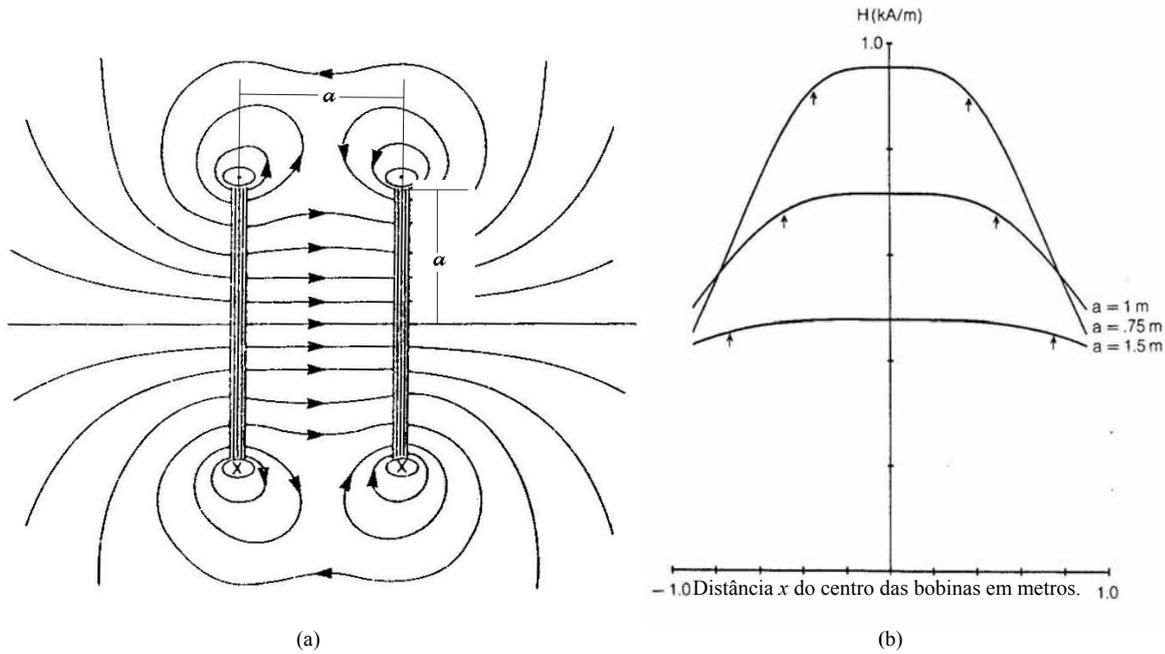


Figura 15. (a) Fluxo magnético em um par de bobinas Helmholtz; (b) intensidade do campo magnético axial em função de x (JILES, 1991).

Se tivermos uma bobina em posição $x = 0$ e uma outra idêntica em $x = a$, o campo magnético no eixo e no centro das duas bobinas em superposição será:

$$H = \left(\frac{Ni}{2a} \right) \left[\left(1 + \frac{x^2}{a^2} \right)^{-1,5} + \left(1 + \frac{(a-x)^2}{a^2} \right)^{-1,5} \right] \quad (11)$$

E como para as bobinas Helmholtz $x = a/2$ no ponto sobre o eixo e no meio entre as duas bobinas, a componente axial do campo magnético nesse ponto será:

$$H = \left(\frac{Ni}{2a} \right) \left[(1,25)^{-1,5} + (1,25)^{-1,5} \right] = \frac{0,7155Ni}{a} \quad (12)$$

E, por simetria, a componente radial sobre o eixo deve ser zero.

De fato, se fazemos uma expansão em série para a componente axial de H em termos da distância x ao longo do eixo desde o centro das bobinas, encontramos que o termo em x^2 desaparece, quando a separação das bobinas é igual ao raio a , de modo que o termo de correção de quarta ordem passa a ser o mais significativo. A expansão em série para o campo magnético em termos de x é então:

$$H = H_0 (1 + c_4 x^4 + c_6 x^6 + \dots) \quad (13)$$

Isto resulta em um valor pequeno de dH/dx no centro das bobinas, e, conseqüentemente, em um campo magnético muito uniforme ao longo do eixo enquanto x é variado perto de

zero. É o que se observa na Figura 15(b) para três diferentes valores de raio de bobina a (0,75 m, 1 m e 1,5 m), com $N = 100$ e uma corrente $i = 10$ A (as setas indicam a posição das bobinas). Além disso, a componente axial do campo magnético perto do centro do par de bobinas Helmholtz é muito pouco dependente da distância radial z desde o eixo. Isto significa que a intensidade do campo magnético H é mantida muito constante sobre um grande volume de espaço entre as bobinas Helmholtz (área tracejada da Figura 16).

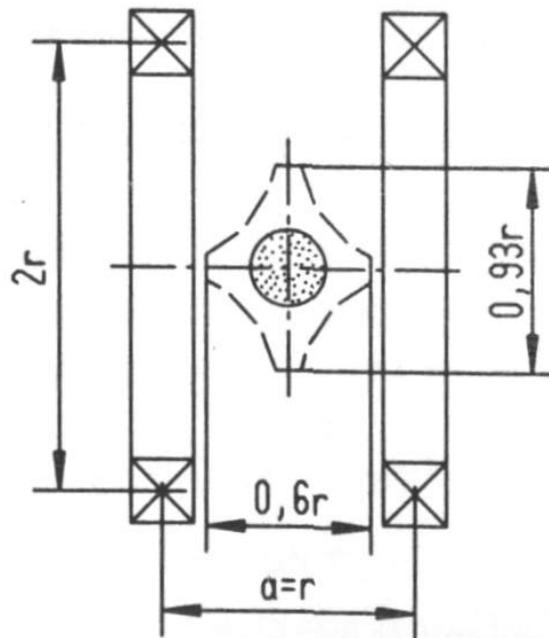


Figura 16. Bobinas Helmholtz usadas para medir características de um ímã permanente (STEINGROEVER, 1997).

A região útil de campo uniforme entre as bobinas pode ser acrescentada fazendo a separação entre elas um pouco maior que $a/2$, embora isto leve a uma ligeira redução na intensidade do campo em essa região (JILES, 1991). Um estudo mais aprofundado desta configuração pode ser encontrado em (GARRETT, 1952) e (FRANZEN, 1962).

O recíproco deste conceito é usar as bobinas Helmholtz como exploradoras, em vez de bobinas de geração de campo magnético uniforme. Elas então podem ser utilizadas para medir a magnetização em circuito aberto de ímãs permanentes.

A medição é feita saturando o ímã com um magnetizador pulsante, inserindo a amostra no dispositivo com o eixo magnético paralelo ao eixo das bobinas, zerando o fluxímetro e extraindo o ímã fora do dispositivo ou virando-o 180°. Conhecendo o volume da amostra, a magnetização pode ser calculada mediante a seguinte equação:

$$4\pi M_0 = \frac{K}{V} \int edt \quad (14)$$

onde a integral é a leitura do fluxímetro, V é o volume da amostra e K é a constante do dispositivo, determinada empiricamente ou pelo número de espiras e o diâmetro da bobina. Como é possível ver na Figura 17, a magnetização medida não é B_r , mas é um ponto na curva intrínseca à esquerda de B_r ($4\pi M_0$ em circuito aberto) o qual depende do fator de auto-desmagnetização ou da reta de carga.

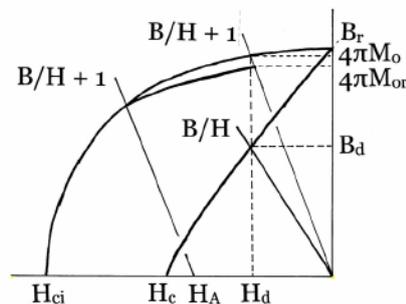


Figura 17. Característica de segundo quadrante de um ímã permanente genérico (TROUT, 2002).

Como o teste mede um simples ponto na curva, existe o risco de não se reconhecer um ímã com baixo H_{ci} . Portanto, um campo reverso, como H_A na mesma figura, é usualmente aplicado à amostra com um magnetizador pulsante, e a medição é repetida. A segunda medição proporciona uma indicação da resistência do ímã à desmagnetização e características de *recoil* ($4\pi M_{or}$). É também possível fazer esta medição em 3 dimensões, com três bobinas Helmholtz ortogonais. Isto permitiria observar orientação ou irregularidades na magnetização.

A exatidão depende principalmente dos aspectos construtivos das bobinas. Se os bobinados têm pequena espessura e comprimento axial, e se as bobinas estão perfeitamente construídas e alinhadas, a constante do par de bobinas pode ser derivada das dimensões e número de espiras. Mas se existem dúvidas no aspecto construtivo, é melhor determinar a constante do par de bobinas usando ímãs permanentes padrões ou excitando-as com uma corrente padrão e medindo o campo com um gaussímetro calibrado. Da Figura 16 é possível observar uma zona central com linhas tracejadas; as medições feitas nesse entorno tem exatidão de 1% ou melhor; reciprocamente, se o ímã permanente é retirado desse entorno (ou virado 180°) teríamos o mesmo nível de exatidão nas medições.

No trabalho de (COMPTER, 2003) é reportada a obtenção da característica de segundo quadrante de ímãs com desmagnetização linear (Terras Raras e ferrite) em configuração de

empilhamento de ímãs e usando bobinas Helmholtz. Extrapolando os dados de B e H obtidos com fator de desmagnetização calculado foi possível obter o B_r e o μ_r .

As vantagens:

- rápido e fácil;
- um dispositivo pode testar ímãs de diferentes tamanhos;
- razoavelmente exato;
- freqüentemente não destrutivo;
- equipamento de baixo custo.

E as desvantagens:

- medição de um ponto só;
- não adequado para ímãs multi-pólos;
- é requerida a medição do volume do ímã;
- é requerida a correção por auto-desmagnetização;
- exatidão dependente dos aspectos construtivos ou da calibração.

1.4.5 Bobina exploradora

Este sensor mostrado na Figura 18, também chamado *pickup coil*, é um dos mais antigos e melhor conhecido.

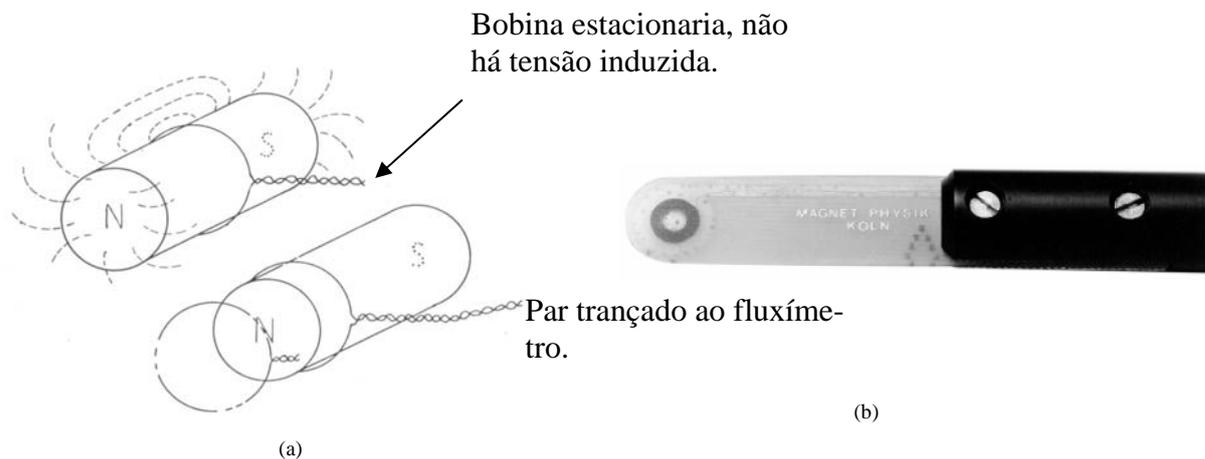


Figura 18. (a) Medição com uma bobina exploradora (MOSKOWITZ, 1995), (b) versão comercial (MAGNET-PHYSIK, 2006).

Sua função de transferência $e = f(B)$ resulta da lei fundamental de indução de Faraday:

$$e = -n \frac{d\Phi}{dt} = -nA \frac{dB}{dt} = -\mu_0 nA \frac{dH}{dt} \quad (15)$$

onde Φ é o fluxo magnético através da bobina de área A e número de espiras n . Vemos então que a medição de tensão sempre será dependente de uma situação dinâmica; em virtude do termo dB/dt teremos as seguintes possibilidades: (a) se o campo magnético é variável, a medição é simples e direta; (b) se o campo magnético é fixo como o produzido por um ímã permanente ou um eletromagneto, a alternativa é movimentar a bobina.

Na medição com bobina exploradora, esta deve ser colocada ao redor do ímã e operar em conjunto com um fluxímetro.

A bobina deve-se encaixar ajustadamente sobre o ímã. Extraindo a bobina obtemos a indução magnética B_m mediante a equação $B_m = \frac{\Phi}{A}$ onde A é a área da seção polar do ímã.

Novamente, sendo esta é uma medição em circuito aberto, então o B determinado é a indução no ponto de funcionamento do ímã B_d na Figura 17. Tipicamente, existe uma bobina especial para cada tipo de ímã para poder assegurar que a bobina pegue só o fluxo do ímã.

A sua vantagem é ser simples e rápido.

E as desvantagens:

- cada ímã requer sua própria bobina;
- medição de um ponto só.

1.4.6 Gaussímetro com sonda Hall

São os mais versáteis e mais amplamente utilizados. O alcance dos campos mensuráveis é tipicamente de 0,4 A/m a 4×10^6 A/m (5×10^{-3} a 5×10^4 Oe), com exatidão da ordem do 1%.

O efeito Hall pode ser obtido induzindo um campo magnético perpendicular a uma corrente circulando por um material semiconductor. 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:

$$F = qE + qv \times B \quad (16)$$

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.

Consideremos uma barra semicondutora tipo p como da Figura 19. O campo elétrico aplicado e a corrente estão na direção x positiva, o campo magnético aplicado está na direção z positiva. A componente y da força será:

$$F_y = qE_y - qv_x B_z \quad (17)$$

Nesta equação vemos 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 negativa. As lacunas no lado direito da amostra provocam uma carga positiva relativa ao lado esquerdo; 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

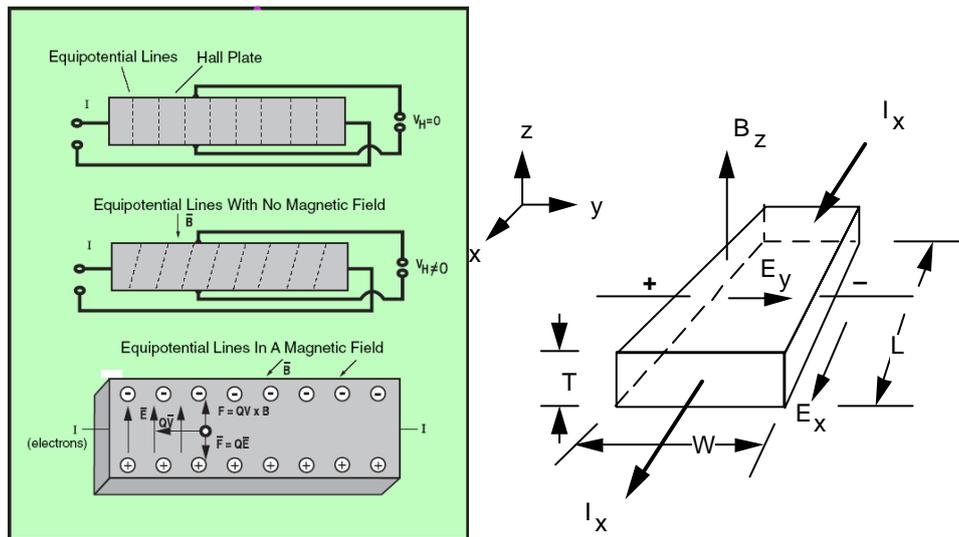


Figura 19. Elemento básico Hall (SENSORS, 1997).

$$E_y = v_x B_z \quad (18)$$

resultando em uma força líquida zero nos portadores na direção y . A presença do campo interno pode ser detectada medindo a tensão desenvolvida através da amostra:

$$E_y = \frac{V_y}{w} \quad (19)$$

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

$$I_p = qp v_d A \quad (20)$$

onde q é a carga da lacuna, p é a densidade de lacunas em n°/cm^3 , v_d é a velocidade de deriva, e A é a seção transversal da amostra. Podemos 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*:

$$J_p = qp v_d \quad (21)$$

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

$$v_d = \mu_p E \text{ para as lacunas,} \quad v_d = -\mu_n E \text{ para os elétrons} \quad (22)$$

Substituindo isto na equação da densidade de corrente obtemos:

$$J_p = qp \mu_p E \text{ para as lacunas,} \quad J_n = qn \mu_n E \text{ para os elétrons} \quad (23)$$

Usando esta relação na equação para o campo E_y obtemos:

$$E_y = v_x B_z = \frac{J_x}{qp} B_z = R_H J_x B_z \quad (24)$$

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

$$R_H = \frac{1}{q} \frac{(p\mu_p^2 - n\mu_n^2)}{(p\mu_p + n\mu_n)^2} \quad (25)$$

Tabela 3. Materiais mais usados na construção de um sensor Hall (JILES, 1990).

Material	R_H (m^3/C)
Li	$-1,7 \times 10^{-10}$
In	$+1,59 \times 10^{-10}$
Sb	$-1,98 \times 10^{-9}$
Bi	$-5,4 \times 10^{-7}$

A equação (24) pode ser escrita como:

$$R_H = \frac{E_y}{J_x B_z} = \frac{\frac{V_y}{w}}{\frac{I_x}{wT} B_z} = \frac{TV_y}{I_x B_z} \quad V_y = \frac{R_H I_x B_z}{T} \quad (26)$$

Medindo a tensão Hall, conhecendo a corrente I_x , as características do semiconductor (a espessura T da amostra e o coeficiente Hall R_H), podemos conhecer o campo magnético B_z .

Os magnetômetros de efeito Hall podem ser fabricados com áreas ativas muito pequenas abaixo de 10^{-6} m^2 ; podem, portanto, ser utilizados para medir o campo magnético com uma grande resolução espacial. Outro fator importante é que a diferença das bobinas exploradoras que devem ter sua área transversal bem determinada para medir indução magnética sobre ela, os magnetômetros Hall medem a intensidade de campo direta e puntualmente.

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 transversa, Figura 20.

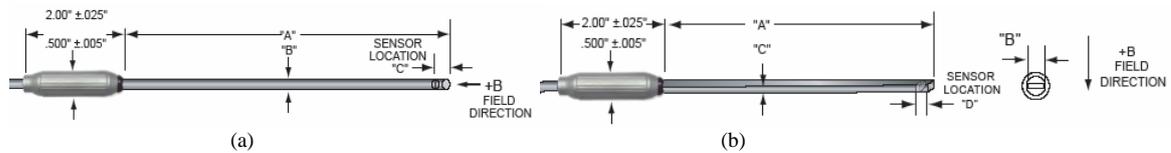


Figura 20.(a) Sonda axial e (b) transversa (F. W. BELL, 2006).

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 de magnetômetros, 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):

$$B_z(z) = \frac{B_r}{\pi} \tan^{-1} \left[\frac{(z+L)}{ab} \sqrt{a^2 + b^2 + (z+L)^2} \right] - \frac{B_r}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{z}{ab} \sqrt{a^2 + b^2 + z^2} \right) \quad (27)$$

Vemos que o campo medido está relacionado a B_r , no entanto o principal problema é que o campo ao redor do ímã varia rapidamente à medida que se muda de posição a sonda, como se vê na equação (27), e 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.

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.

Sircilli apresentou um trabalho de mapeamento das características da componente perpendicular ao ímã permanente do campo magnético ao longo do eixo x visualizado na Figura 21 com linhas tracejadas utilizando uma sonda Hall (SIRCILLI, 2001).

As vantagens:

- mede campo magnético c.c., como o produzido por ímãs permanentes;
- rápido e fácil.

E as desvantagens:

- risco de interpretar de modo incorreto o resultado devido ao posicionamento e orientação do elemento Hall na sonda;
- medição puntual e direcional;
- o elemento Hall é sensível à temperatura, requerendo compensação de seu sinal devido ao efeito térmico.

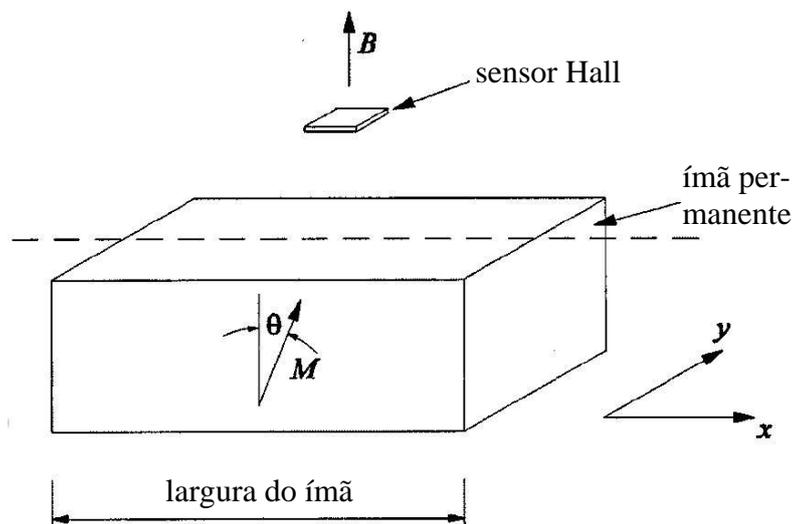


Figura 21. Ímã permanente e sonda Hall (SIRCILLI, 2001).

1.4.7 Bobina de potencial

Com base na relação entre a indução B e a força de magnetização H , é necessário obter H com exatidão para correlacioná-lo apropriadamente a B . Nas configurações de medição, frequentemente H pode ser calculado a partir da relação entre a corrente em um enrolamento de magnetização e a força magnetizante produzida. É o caso, por exemplo, do histerisímetro usado na caracterização de materiais magnéticos macios, Figura 22.

A amostra tem forma toroidal com um bobinado primário de excitação e um outro de medição secundário. A medição, neste caso da queda de tensão em um resistor shunt, proporciona a corrente de excitação e, por conseguinte, o campo magnetizante da expressão

$$H = \frac{4\pi ni}{l} \quad (28)$$

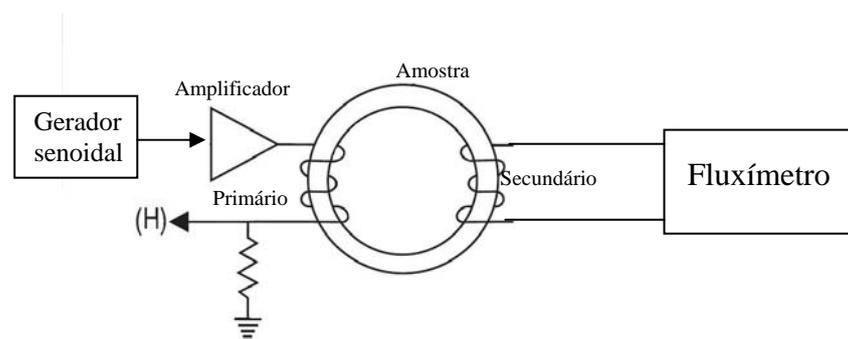


Figura 22 Blocos básicos de um histerisímetro para materiais macios (BUCK, 2000).

Na medição em circuitos magnéticos com ímãs permanentes, no entanto, o procedimento pode não ser tão simples. Geralmente a amostra não tem forma toroidal e a corrente de magnetização não é necessariamente diretamente proporcional a H , devido principalmente aos efeitos dos entreferros e à eventual saturação da culatra. Como não é possível a medição direta do H dentro da amostra, foram desenvolvidas outras opções, algumas das quais já foram apresentadas na seção correspondente ao histerisímetro.

A opção baseada na medição de potencial magnético já foi proposta por Chattock ao desenvolver seu potenciômetro magnético. O instrumento é, em essência, uma analogia magnética do voltímetro. Fisicamente, o medidor de Chattock consiste de uma bobina fina de seção uniforme com enrolamento de condutor delgado sobre uma forma flexível não metálica. Este bobinado é conectado a um instrumento de tipo fluxímetro integrador, Figura 23 e Figura 24. Se a bobina de comprimento l é inserida em um campo magnético, então a tensão de saída

é a soma das tensões induzidas em cada volta elementar (todas as voltas estão conectadas em série):

$$V = \sum \left(-n \frac{d}{dl} \frac{d\phi}{dt} \right) = -\mu_0 \frac{n}{l} A \frac{d}{dt} \int_A^B H dl \cos \alpha \quad (29)$$

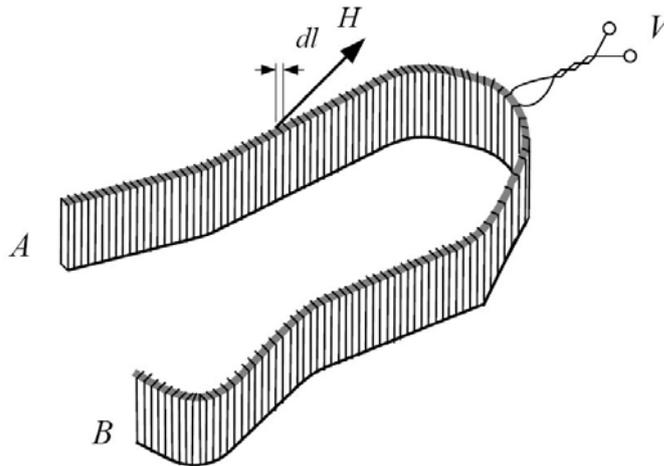


Figura 23. Bobina de diferença de potencial (TUMANSKI, 2007).

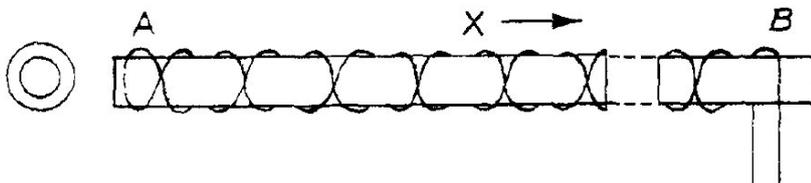


Figura 24. Bobina de potencial magnético (McDONALD, 1978).

Na versão de Steingroever, a bobina de potencial consiste em um enrolamento longo e fino, de espaçamento uniforme de espiras, mas com um dos extremos inserido em uma zona considerada livre de campo magnético. Por conseguinte, o outro extremo indicará o potencial de campo magnético do ponto onde ele está inserido. Em medições de grande exatidão, tem-se que considerar a influência do campo magnético terrestre.

A técnica de Steingroever indica que, em caso da medição do potencial de um dos polos de um ímã permanente, se tem que encostar perfeitamente a ponta plana da sonda contra o ímã e logo após afastar (a sonda ou o ímã) a uma posição onde se considera que já não há interação alguma como mostra a Figura 25(a). No caso de medição de um ímã dentro de um circuito magnético, a técnica é similar, no entanto a posição agora é o outro extremo do ímã, Figura 25(b). O campo magnético interno H_m é indiretamente determinado por (30).

$$P_m = P_b - P_a = H_m \cdot l_m \quad (30)$$

Sua vantagem é ser:

- simples e rápido.

E as desvantagens:

- Medição de um ponto só;
- interpretação dificultosa.

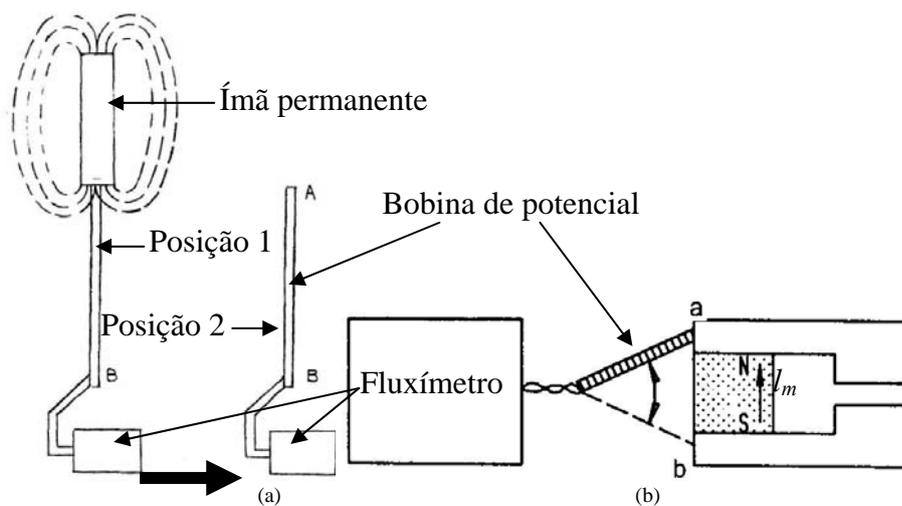


Figura 25. Aplicação da bobina de potencial magnético (MAGNET-PHYSIK, 1997).

Página em branco

2 ANÁLISE DE CIRCUITOS MAGNÉTICOS COM ÍMÃS PERMANENTES

São apresentados a seguir os conceitos que proporcionam embasamento à análise de circuitos magnéticos com ímãs permanentes para este trabalho.

2.1 CAMPO DESMAGNETIZANTE

Quando uma amostra de ímã permanente é magnetizada, um campo próprio interno é desenvolvido que se opõe ao campo magnetizante. Este é chamado campo desmagnetizante. Consideremos uma amostra magnetizada uniformemente. Sua magnetização M leva à formação de pólos superficiais, e estes, por sua vez, geram um campo desmagnetizante H_d dentro dela. O campo H_d é proporcional a M , mas na direção oposta, Figura 26.

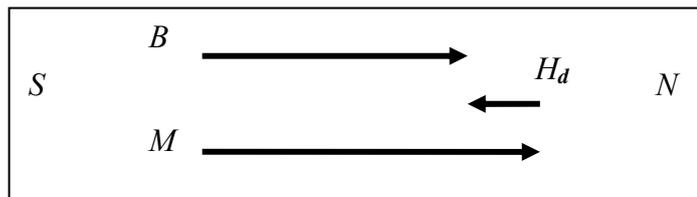


Figura 26. Distribuição de B , H e M dentro do ímã (CULLITY, 1972).

Por exemplo, no eixo x teremos

$$H_{dx} = -N_x M_x \quad (31)$$

onde H_{dx} e M_x são as componentes x de H_d e M respectivamente, e N_x é o fator de desmagnetização (medida da distorção do campo magnético devido à geometria do dispositivo) no mesmo eixo. Como os fatores de desmagnetização dependem da permeabilidade e da forma da amostra, são difíceis de se obter. No entanto, para formas elipsoidais é possível obter expressões analíticas (FURLANI, 2001).

Se a amostra é submetida a um campo externo H_a , então o campo H dentro dela (H_{in}) é o vetor soma de H_a e H_d ,

$$H_{in} = H_a + H_d \quad (32)$$

Fora do ímã, H e B estão na mesma direção. No entanto, dentro do ímã $H = H_d$, o qual se opõe tanto a M como a B , Figura 27.

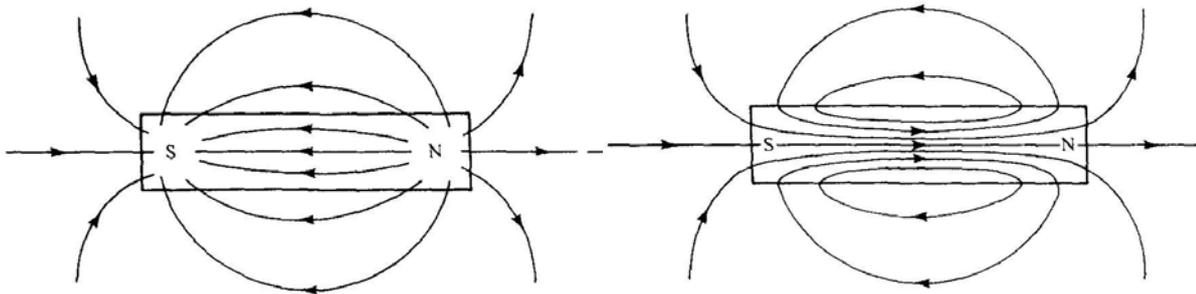


Figura 27. Campo H dentro e fora do ímã e densidade de fluxo B dentro e fora do ímã (CULLITY, 1972).

2.2 ANISOTROPIA

Um material com anisotropia magnética é aquele no qual as propriedades magnéticas são diferentes em direções diferentes. A principal classificação de anisotropia é a seguinte (CHIKAZUMI, 1964), (CULLITY, 1972) y (FURLANI, 2001):

1. Anisotropia magnetocristalina;
2. Anisotropia de forma;
3. Anisotropia de tensão mecânica; e
4. Anisotropia de intercâmbio (ou de troca).

2.2.1 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 se alinharem ao longo dos eixos cristalográficos, e, devido ao acoplamento do spin orbital, os momentos do spin também tendem a ficar alinhados. Em 1929 o físico Akulov mostrou que a energia anisotrópica cristalina E pode ser expressa em termos de uma expansão em série que relaciona a direção do M_s com os eixos do cristal. Em um cristal cúbico, suponhamos que M_s forma ângulos a , b , c com os eixos do cristal e sejam α_1 , α_2 , α_3 os cossenos desses ângulos; então

$$E = K_0 + K_1(\alpha_1^2\alpha_2^2 + \alpha_2^2\alpha_3^2 + \alpha_3^2\alpha_1^2) + K_2(\alpha_1^2\alpha_2^2\alpha_3^2) + \dots \quad (33)$$

onde $K_0, K_1, K_2, \dots, K_i$ são constantes para um material particular e estão expressas em ergs/cm^3 . Geralmente não é necessário empregar termos de maior ordem, e, na maioria dos casos, K_2 é tão pequeno que o termo envolvido pode ser desprezado. O primeiro termo K_0 é independente do ângulo; então é usualmente ignorado, pois normalmente estamos interessados somente nas mudanças na energia E quando o vetor M_s se desloca de uma direção para outra.

Em cristais hexagonais temos um eixo c como de fácil magnetização, a energia anisotrópica E depende de um ângulo θ entre o vetor M_s e o eixo mencionado. Portanto:

$$E = K_0 + K_1 \cos^2 \theta + K_2 \cos^4 \theta + \dots \quad (34)$$

Fazendo $\cos^2 \theta = 1 - \sin^2 \theta$ teremos:

$$E = K_0 + K_1 \sin^2 \theta + K_2 \sin^4 \theta + \dots \quad (35)$$

A forma mais elementar de anisotropia magnetocristalina é a anisotropia uniaxial. Se a amostra com anisotropia uniaxial é polarizada com um ângulo θ relativo a seu eixo fácil, Figura 28, a densidade de energia anisotrópica é:

$$w_{ma} \approx K \sin^2 \theta \quad (\text{J/m}^3) \quad (36)$$

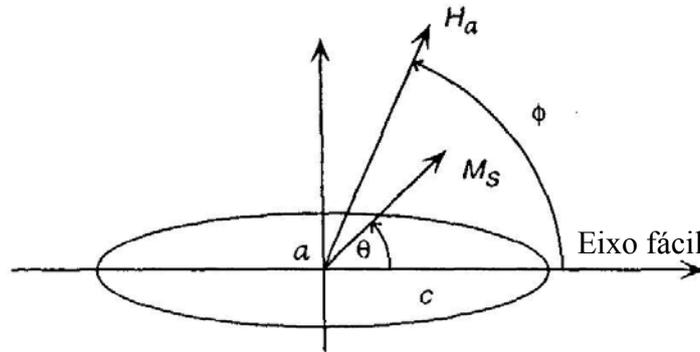


Figura 28. Espécime com anisotropia uniaxial (FURLANI, 2001).

A constante anisotrópica do material K_1 é suposta de maior peso nos ímãs permanentes atuais e adotada nas expressões como simplesmente K . A mínima energia tem lugar quando $\theta = 0^\circ$ e 180° .

Consideremos a resposta de uma amostra de domínio simples com anisotropia uniaxial quando é submetida a um campo H_a . Suponha-se que H_a está direcionado num ângulo ϕ com referência ao eixo fácil, Figura 28.

Supondo ainda que a amostra está magnetizada até saturação com M num ângulo θ com referência ao eixo fácil, e que o campo desmagnetizante H_d é desprezível, portanto, dentro da amostra, $H_{in} = H_a$ com relação à (32).

Como o espécime constitui um domínio simples, sua densidade de energia $w(\theta)$ consiste de duas partes: a densidade de energia magnetostática devido ao acoplamento de M e H_a e a densidade energética da anisotropia magnetocristalina w_{ma} . A densidade total de energia é:

$$w(\theta) = K \sin^2(\theta) - \mu_0 M_s H_a \cos(\phi - \theta) = K \sin^2(\theta) - \mu_0 M_s [H_x \cos(\theta) + H_y \sin(\theta)] \quad (37)$$

onde $H_x = H_a \cos(\phi)$ e $H_y = H_a \sin(\phi)$. Identificamos os valores de θ que representam mínima energia usando a derivada segunda onde $\partial w(\theta)/\partial \theta = 0$ identifica os pontos críticos, e $\partial^2 w(\theta)/\partial \theta^2 > 0$ confirma um mínimo. Consideremos o caso em que o campo é aplicado ao longo do eixo fácil ($H_y = 0$), então:

$$\frac{\partial w(\theta)}{\partial \theta} = 2K \sin(\theta) \cos(\theta) + \mu_0 M_s H_x \sin(\theta) = 0 \quad (38)$$

e

$$\frac{\partial^2 w(\theta)}{\partial \theta^2} = 2K \cos(2\theta) + \mu_0 M_s H_x \cos(\theta) > 0 \quad (39)$$

Teremos um mínimo quando $\theta = 0$ ou π . Em $\theta = 0$ ocorrerá um mínimo quando

$$-\frac{2K}{\mu_0 M_s} < H_x \quad (40)$$

e vamos ter $M_x = M_s \cos(\theta) = M_s$. Em $\theta = \pi$ ocorrerá um mínimo quando

$$H_x < \frac{2K}{\mu_0 M_s} \quad (41)$$

então teremos $M_x = -M_s$. As condições (40) e (41) identificam a coercitividade intrínseca H_{ci} (ou campo de comutação) da amostra (CAMPBELL, 1994), (FURLANI, 2001), que também pode ser encontrada nos textos como H_{cJ} , MH_c , mH_c ou iH_c :

$$H_{ci} \equiv \frac{2K}{\mu_0 M_s} = \frac{2K}{J_s} \quad (42)$$

Outros autores (CHIKAZUMI, 1964), (CULLITY, 1972), (PARKER, 1990) e (FARIA, 2005) chamam a expressão (42) de campo anisotrópico H_A ou H_k .

A coercitividade intrínseca é uma propriedade importante dos ímãs permanentes. Esta proporciona uma medida do campo requerido para magnetizar e desmagnetizar o espécime.

Aplicamos este resultado ao comportamento de um espécime de domínio simples com anisotropia uniaxial. Suponhamos agora que o espécime é magnetizado inicialmente ao longo do seu eixo fácil com $\theta = 0$ ($M = M_s \hat{x}$), Figura 29a.

Aplicamos um campo inverso na direção $\theta = \pi$ (H_x negativo). À medida que acrescentamos o campo (no sentido negativo), o espécime permanece polarizado ao longo do seu eixo fácil (num mínimo de energia) em tanto $-H_{ci} < H_x < 0$. Quando o campo é incrementado ao

ponto onde $H_x = -H_{ci}$, então M muda a orientação para $\theta = \pi$ ($M = -M_s \hat{x}$). Quando isto ocorre, o espécime está novamente num estado de mínima energia. Ele permanece nesse estado enquanto H_x for negativo e seu módulo aumentar.

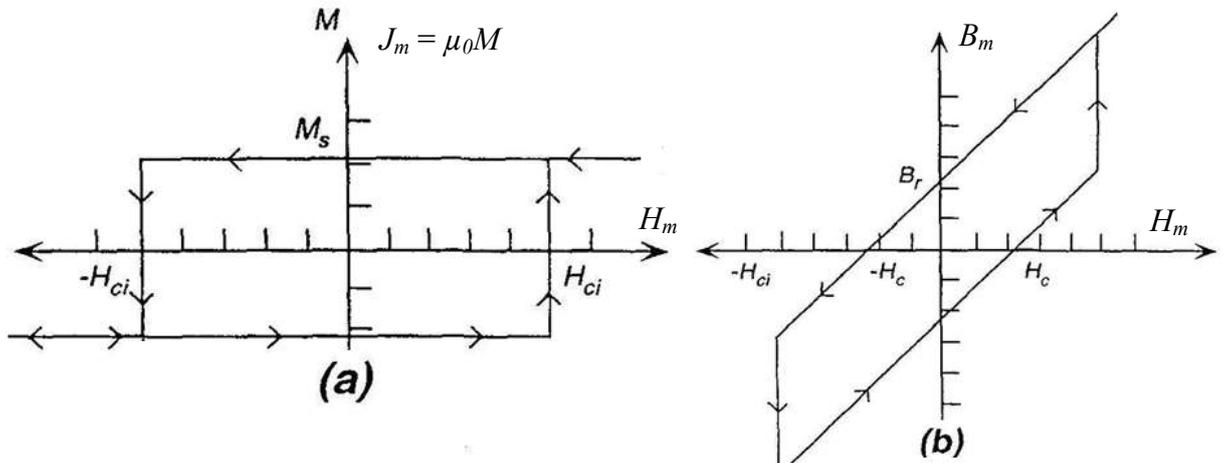


Figura 29. Resposta do espécime com anisotropia uniaxial: (a) M vs. H ; e (b) B vs. H (CAMPBELL, 1994), (FURLANI, 2001).

A seguir, gradualmente reduzimos H_x , reduzindo o seu módulo. O espécime permanece com $M = -M_s \hat{x}$ para todos os valores negativos de campo. Finalmente, H_x alcança o valor zero. Agora incrementamos gradualmente H_x desde zero até alcançar $H_x = H_{ci}$. Neste ponto, M muda a orientação para $\theta = 0$ ($M = M_s \hat{x}$). Uma vez que isto aconteça, o espécime está novamente num mínimo de energia. Ele permanece nesse estado para qualquer incremento posterior de H_x .

Toda esta seqüência de eventos pode ser sintetizada no gráfico de M vs. H da Figura 29a. Notamos que este gráfico tem uma forma de laço quadrado. Em particular, o espécime começa com $M = M_s$. Quando H é invertido e alcança $H = H_{ci}$, a magnetização muda abruptamente de direção em $M = -M_s$. Por conseguinte, a magnetização tem um valor constante $M = \pm M_s$ exceto para os dois pontos $H = \pm H_{ci}$.

É fundamental fazer o gráfico B vs. H para este espécime, Figura 29b. Obtemos B da relação constitutiva:

$$B = \mu_0 H \pm \mu_0 M_s = \mu_0 H \pm J_s, \quad (43)$$

onde \pm leva em conta as duas possíveis orientações de M . Como M_s é constante, o gráfico B vs. H será uma linha reta com inclinação μ_0 e com descontinuidades nos pontos $H = \pm H_{ci}$. Fazendo $H = 0$ na (43) encontramos que a reta cruza o eixo B em

$$B_r = \pm \mu_0 M_s = \pm J_s \quad (44)$$

Este valor B_r é chamado densidade de fluxo remanente ou remanência. Similarmente, chamamos ao valor de H para o qual $B = 0$ de força coercitiva ou coercitividade. É o valor requerido de H para reduzir B a zero e se indica como H_c (CULLITY, 1972), (PARKER, 1990) e (FURLANI, 2001), como ${}_B H_c$ (JILES, 1991) e (STEINGROEVER, 1997). Também é possível encontrar como H_{cb} ou H_{cB} em alguns textos. Se $H_{ci} > M_s$, da (43) encontramos que $H_c = M_s$. Quando se trata deste caso, a curva de desmagnetização é linear a través do segundo quadrante como se mostra na Figura 29b. 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. Isto acontece quando a anisotropia de forma é a dominante.

2.2.2 Anisotropia de forma

Este tipo de anisotropia é devido à forma do grão do material. Diferente da anisotropia magnetocristalina, esta não é uma propriedade intrínseca do material.

Seguimos a mesma análise de mínima energia apresentada antes, exceto que agora o eixo c representa ao eixo fácil.

Encontramos que a coercitividade intrínseca (campo de permutação) está dada por:

$$H_{ci} \equiv \frac{2K}{\mu_0 M_s} = M_s (N_a - N_c) \quad (45)$$

Neste caso, $H_c = H_{ci}$, e a curva de desmagnetização é linear sobre uma porção do segundo quadrante como se vê na Figura 30.

2.3 HISTERESE

Para a análise e projeto de aplicações com ímãs permanentes é necessário expressar as propriedades magnéticas macroscópicas do material. Estas podem ser encontradas em forma das curvas de indução magnética B ou M como função de H a partir da constitutiva

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (46)$$

Na Figura 31 observamos um gráfico típico de B vs. H . Ele é não linear e de valores múltiplos, refletindo o fato de que a resposta do material depende do seu estado anterior de magnetização. Esse gráfico B vs. H é denominada de laço de histerese. A energia por unidade de volume necessária para desenvolver o laço de histerese é igual à área interna do laço.

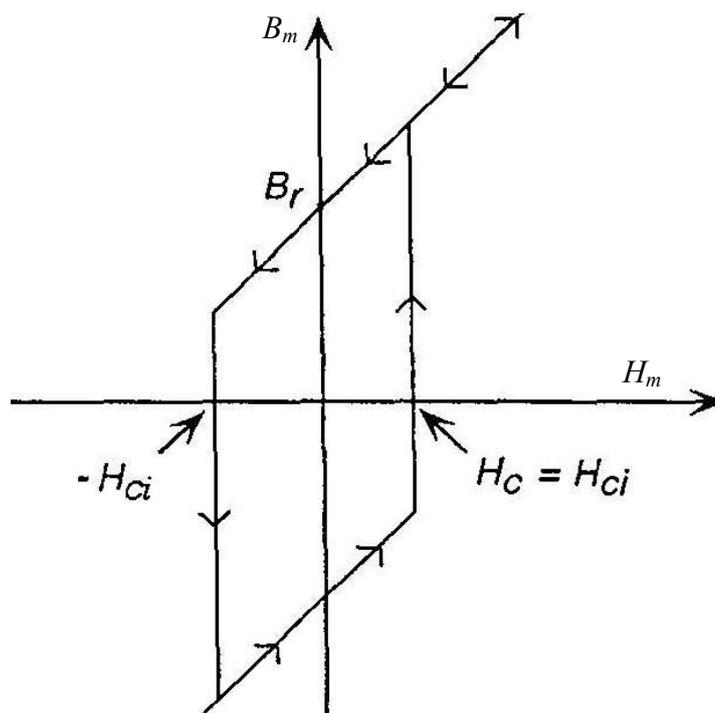


Figura 30. Laço B - H para um espécime com anisotropia de forma (FURLANI, 2001).

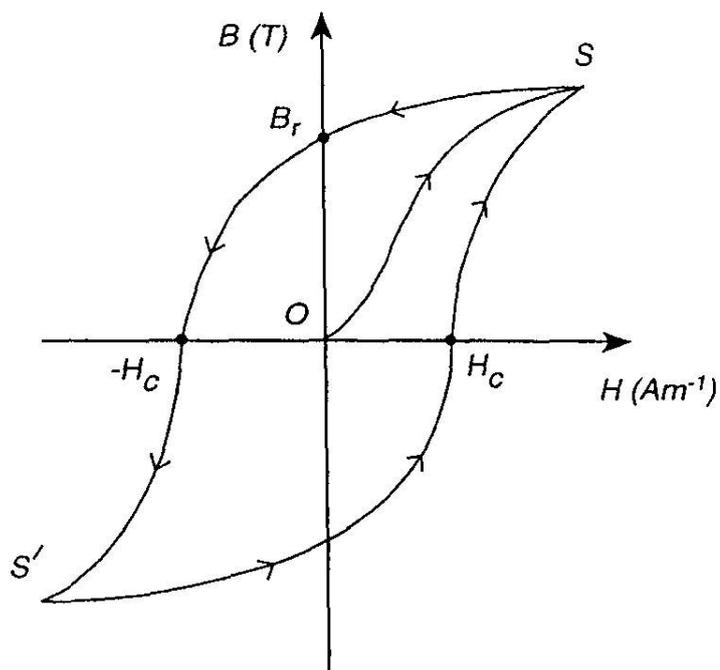


Figura 31. Laço de histerese (FURLANI, 2001).

Consideremos um espécime com distribuição isotrópica de orientação com eixos preferidos (anisotropia magnetocristalina). Inicialmente ele está desmagnetizado com seus domínios orientados isotropicamente como se vê em O na Figura 32.

Começamos a aplicar um campo H e, à medida que ele vai aumentando desde zero na direção positiva (campo ainda débil), os domínios vão se alinhando com o crescimento de H . Já os domínios não alinhados vão se contraindo devido ao movimento da parede do domínio. Enquanto H continua crescendo (campo moderado), os momentos magnéticos nos domínios que ainda não estiverem alinhados viram e se alinham ao longo de eixos preferidos que estão na direção geral de H .

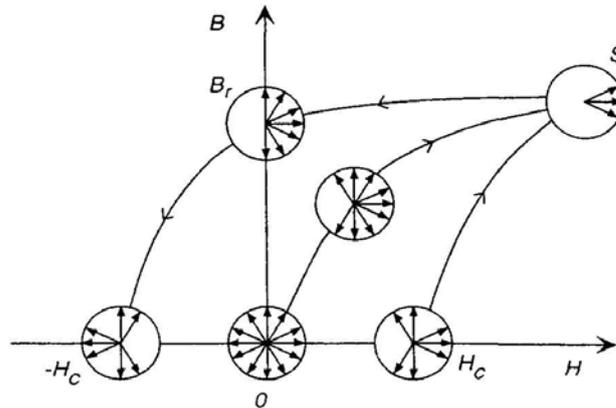


Figura 32. Distribuição das orientações dos domínios em um laço de histerese (CHIKAZUMI, 1964).

Para um campo H suficientemente alto, os momentos magnéticos ao longo de eixos preferidos em domínios que não estão estritamente alinhados com H giram longe desses eixos e ficam alinhados com H (ponto S da Figura 31 e Figura 32). Neste ponto o material está saturado e alcançou sua indução de saturação B_s . O trecho OS é denominado curva de magnetização inicial.

À medida que H decresce do seu valor de saturação, os momentos ao longo dos eixos preferidos estritamente alinhados com H retêm sua orientação. Ainda que H seja reduzido a zero, existirá um alinhamento líquido no sentido positivo, e o espécime apresentará uma indução remanente (residual) B_r , Figura 32.

Agora, à medida que H é invertido e tem sentido negativo, os momentos nos domínios orientados ao longo do sentido positivo são os primeiros a virar alinhando-se na direção negativa. Com incrementos negativos de H , um número suficiente de domínios obtém uma orientação predominantemente negativa, compensando através disso a magnetização dos domínios orientados positivos restantes de tal forma que a indução líquida no espécime é zero, $B = 0$. O valor de H em que ocorre isto é denominado coercitividade e se denota como H_c , $H = -H_c$. Notamos que, embora $B = 0$ neste ponto, a distribuição de orientações de domínios não é isotrópica como foi no estado inicial desmagnetizado, Figura 32.

Incrementando H ainda mais no sentido negativo, uma fração progressivamente maior de domínios obtém uma orientação predominantemente negativa até que é alcançada a saturação. Desde este ponto, H é reduzido até zero, e uma fração dos domínios inverte sua orientação, resultando em uma indução remanente $-B_r$. Incrementando agora H desde zero no sentido positivo, um número suficiente de domínios obtém uma orientação predominantemente positiva, compensando através disso a magnetização dos domínios restantes orientados negativamente de tal forma que a indução líquida no espécime é zero. Isto ocorre quando $H = H_c$. No entanto H continua crescendo, e os domínios novamente alinham-se com H até que a saturação é alcançada. A Figura 31 é denominada laço de histerese principal. Existem ainda laços de histerese menores como se mostra na Figura 33. Estes são formados variando H dentro da faixa $-H_c < H < H_c$.

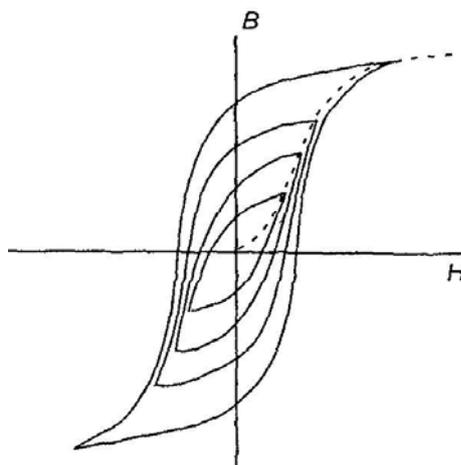


Figura 33. Laços menores de histerese (FURLANI, 2001).

2.3.1 Materiais macios

Os materiais ferromagnéticos são classificados como sendo macios ou duros, do ponto de vista magnético e dependendo de sua coercitividade H_c . Os materiais macios são caracterizados por uma alta permeabilidade e uma baixa coercitividade ($H_c < 1000$ A/m), ou seja, são materiais facilmente magnetizáveis e desmagnetizáveis. Os materiais duros têm uma relativa baixa permeabilidade e uma alta coercitividade ($H_c > 10.000$ A/m), o que faz com eles sejam mais difíceis de serem magnetizados ou desmagnetizados (JILES, 1991). A diferença entre os dois tipos de materiais é melhor ilustrada comparando seus laços de histerese típicos, Figura 34.

Os 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. 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 e coercitividade. Alta permeabilidade e magnetização de saturação elevada são desejadas para confinamento e concentração de fluxo. A resistência e a coercitividade são importantes para aplicações de alta frequência. Uma alta resistência é mais limitante para as correntes parasitas, enquanto que uma baixa coercitividade está associada a menores perdas por histerese.

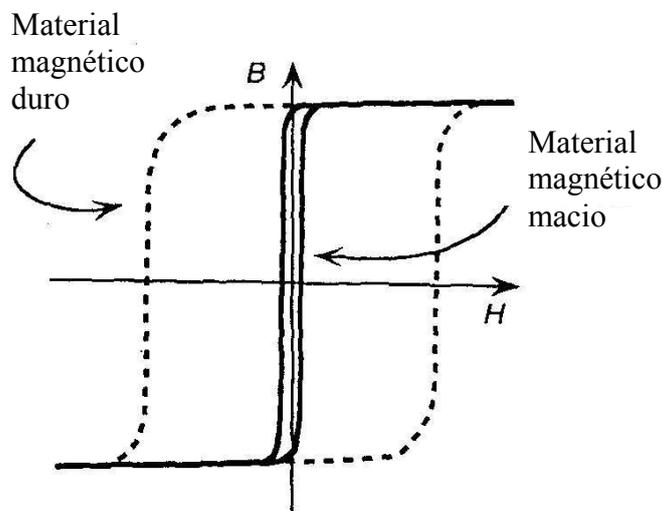


Figura 34. Laços B-H para materiais magnéticos macios e duros (FURLANI, 2001).

Os materiais macios são magneticamente lineares sobre porções limitadas de sua curva $B - H$ onde a permeabilidade μ é constante (independente de H). No entanto, eles são não lineares sobre outras porções onde μ é função de H , $\mu = \mu(H)$.

Em magnetismo, tanto para materiais macios como para duros, são usadas diferentes definições de permeabilidade:

$$\mu = \frac{B}{H} \text{ (permeabilidade absoluta)} \quad (47)$$

e esta modifica seu valor ao longo da curva $B - H$.

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_0} \text{ (permeabilidade relativa)} \quad (48)$$

que é normalizada ao valor do espaço livre $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m.

$$\mu_{dif} = \frac{dB}{dH} \text{ (permeabilidade diferencial)} \quad (49)$$

definida como a inclinação da tangente à curva $B - H$.

A permeabilidade inicial μ_i é a μ_{dif} avaliada na origem da curva de magnetização inicial:

$$\mu_i = \left. \frac{dB}{dH} \right|_{B=0, H=0} \quad (50)$$

Outras medidas de permeabilidade incluem a inicial e a máxima relativa, $\mu_{i,r}$ e $\mu_{max,r}$, respectivamente.

2.3.2 Materiais duros

São conhecidos como **ímãs permanentes** e estão caracterizados por uma permeabilidade baixa e uma alta coercitividade, tipicamente maior que 10 kA/m. Esta última propriedade faz que sejam mais difíceis de magnetizar e desmagnetizar.

O ímã permanente é um componente utilizado para gerar campo magnético. Isto quer dizer que ele não precisa de uma corrente elétrica circulando por uma bobina ou solenóide para manter um campo magnético. A energia necessária para manter este campo magnético foi armazenada previamente em seu campo magnético, quando o ímã foi “carregado”, ou seja, magnetizado inicialmente com uma intensidade de campo apropriada.

As principais propriedades na seleção de um ímã permanente são aquelas que definem a magnitude e a estabilidade do campo que ele pode gerar. Estas incluem a coercitividade H_c , a magnetização de saturação M_s e a remanência B_r , como também o comportamento do laço de histerese no segundo quadrante (característica de desmagnetização).

Os pontos (B, H) sobre a curva de desmagnetização definem um produto energético BH que, em determinadas condições de funcionamento, permitem obter dele seu máximo produto energético indicado como $(BH)_{max}$.

2.4 CARACTERÍSTICAS MAGNÉTICAS DOS ÍMÃS PERMANENTES E FIGURAS DE MÉRITO

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.

2.4.1 Coercitividade

A coercitividade é uma das propriedades mais importantes e desejáveis, Figura 35. Quanto maior for a coercitividade, mais difícil será desmagnetizar o ímã permanente.

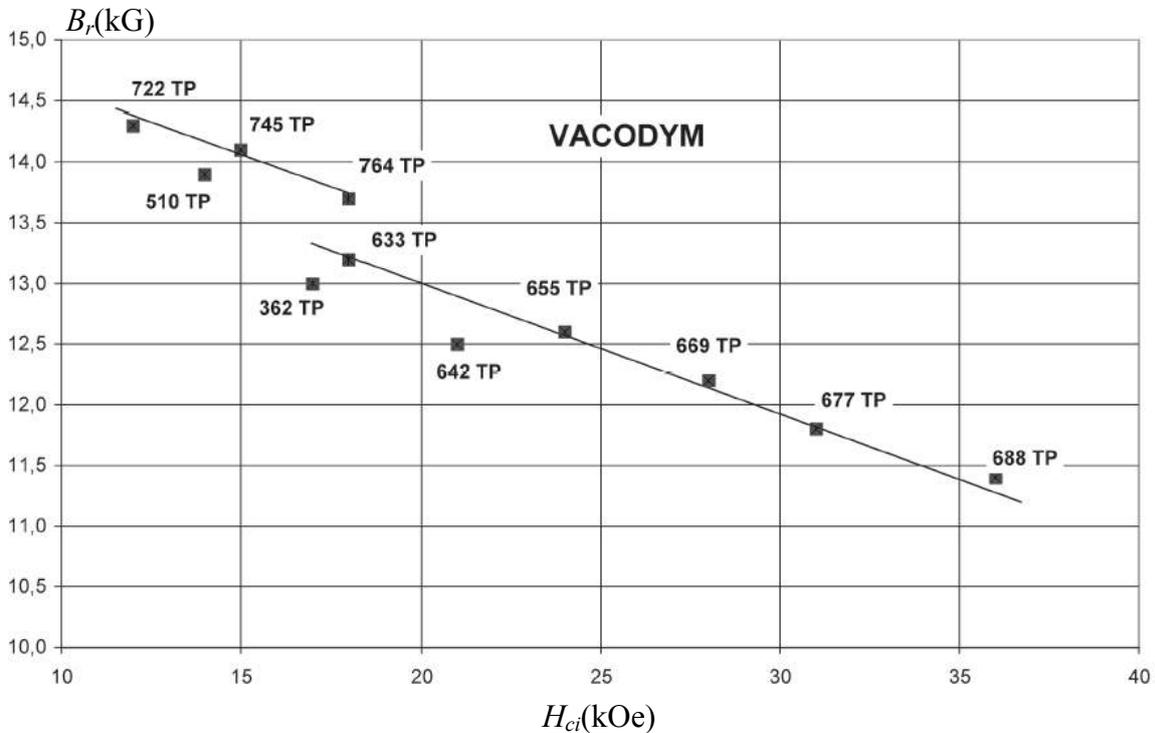


Figura 35. Valores atuais de remanência e coercitividade (VACUUMSCHMELZE, 2003).

Nos materiais macios, B é aproximadamente igual a $\mu_0 M$, enquanto nos ímãs a magnetização não é simplesmente uma aproximação linear da densidade de fluxo. Isso se deve ao fato de que os valores do campo magnético H usados nos ímãs permanentes são geralmente muito maiores que nos materiais macios. Portanto, nos ímãs permanentes, a coercitividade (H_{ci}) pode ser definida como o campo no qual a magnetização é nula ou o campo (H_c) no qual a densidade de fluxo dentro do material é nula.

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, materiais magneticamente macios devem possuir grãos grandes (monofásicos) e devem ser tratados termicamente para eliminar defeitos na sua estrutura, para facilitar o movimento das paredes de Bloch no seu interior. De maneira oposta, 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, 2005).

2.4.2 Remanência

Nos ímãs permanentes atuais, a forte anisotropia magnetocristalina faz com que a magnetização de saturação seja quase igual à de remanência, portanto tem validade a equação (44) (VACUUMSCHMELZE, 2003), onde

$$B_r = \pm \mu_0 M_s = \pm J_s \quad (51)$$

$$B_r \approx J_s \quad (52)$$

É essencial uma combinação de alta remanência com uma alta coercitividade. Na Figura 35 são apresentados valores encontrados atualmente das principais características magnéticas dos ímãs permanentes.

Os principais fatores que afetam a remanência num ímã permanente são: 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), a densidade real e a fração volumétrica de grãos magnéticos que o material contém (FARIA, 2005).

2.4.3 Magnetização de saturação

A remanência 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). Por exemplo, três compostos estequiométricos muito utilizados são o SmCo_5 , $\text{Pr}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ e $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ com $\mu_0 M_s$ de 1,07; 1,58 e 1,61 Teslas respectivamente (FARIA, 2005).

2.4.4 Produto energético

Um dos parâmetros de muito interesse para os fabricantes e usuários é o máximo produto energético, o qual é o máximo valor do produto BH obtido no segundo quadrante. Isto está claramente relacionado com as perdas totais de histerese ou área encerrada por o laço de histerese. É a máxima quantidade de energia no campo magnético por unidade de volume do ímã permanente, Figura 36.

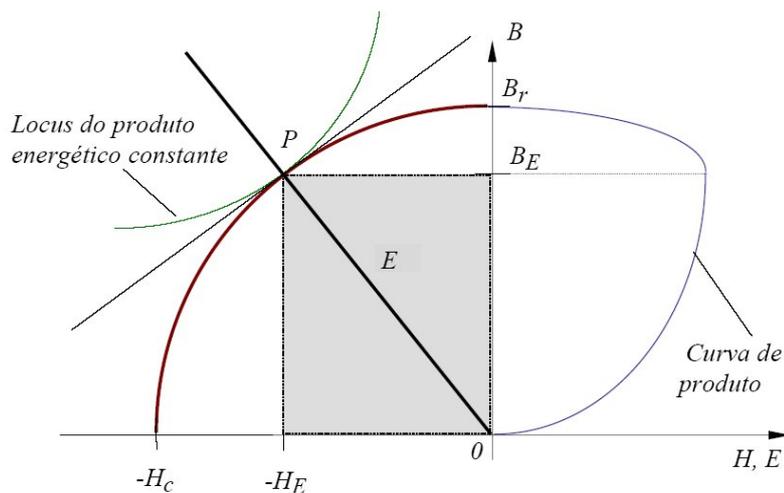


Figura 36. Curva de desmagnetização e de produto energético de um ímã permanente (FLORES FILHO, 2003).

O progresso no máximo produto de energia em vários materiais de ímãs permanentes ao longo do tempo pode ser observado através da Figura 37.

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.

Como exemplo, para gerar uma densidade de fluxo magnético B de 100 mT num ponto P a 5 mm da face polar de um ímã permanente teremos as seguintes opções da Figura 38.

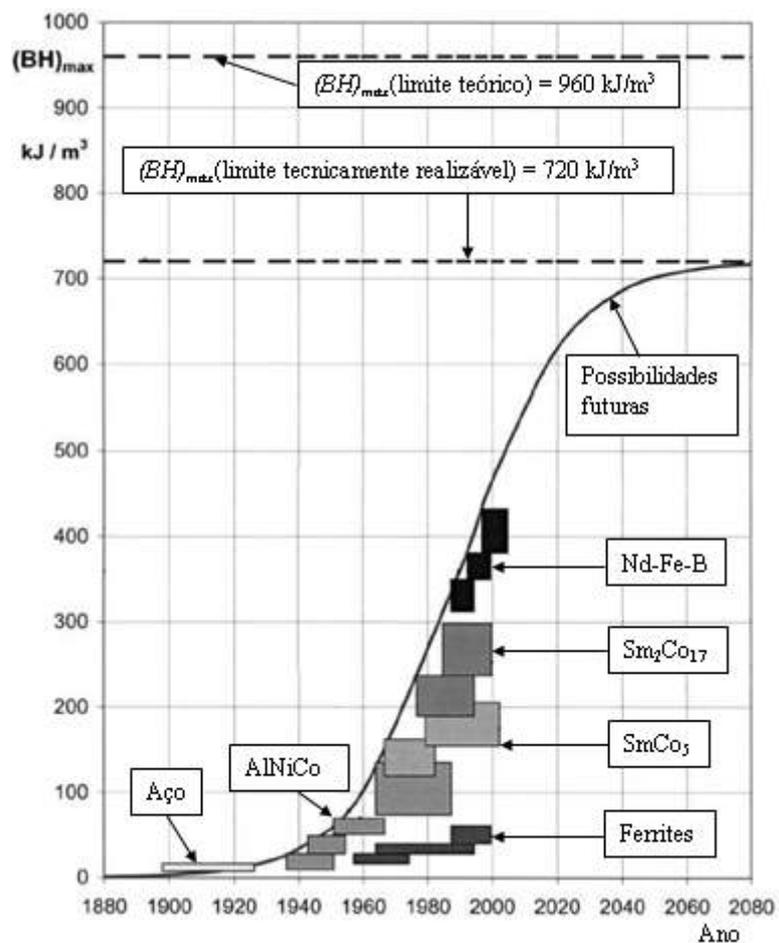


Figura 37. Evolução do máximo produto energético dos ímãs (VACUUMSCHMELZE, 2003).

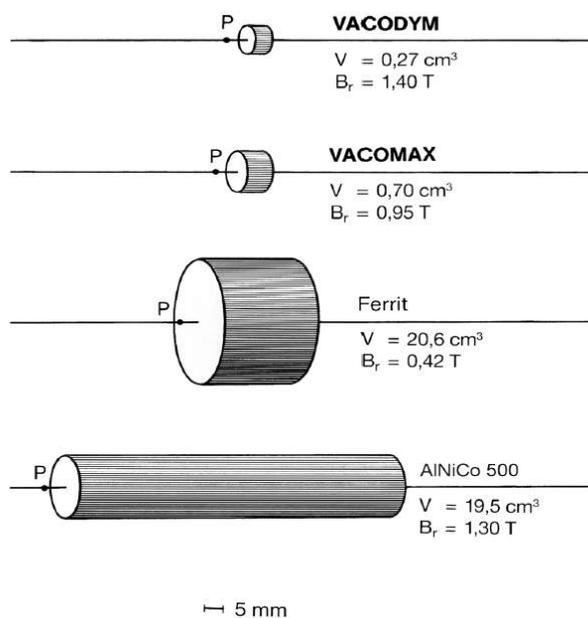


Figura 38. Volume de material de ímãs permanentes de diferentes tipos para gerar 0.1 T a 5 mm (VACUUMSCHMELZE, 2003).

O máximo produto energético pode ser determinado a partir da curva $B-H$ do material. Assim, no segundo quadrante, multiplicam-se os valores da indução magnética B pelo campo desmagnetizante H , e o máximo valor obtido é, então, tomado como a energia de referência para o material por unidade de seu volume.

Um alto produto energético resulta de uma alta coercitividade e alta remanência, no entanto não é sempre adequado escolher o material com o maior produto energético para qualquer aplicação. Dado que para condições ótimas de funcionamento, que são afetadas por considerações geométricas, poderiam indicar que são mais importantes outras propriedades. Para poder entender isto é necessário considerar a curva completa de desmagnetização do ímã permanente.

2.4.5 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, Figura 39.

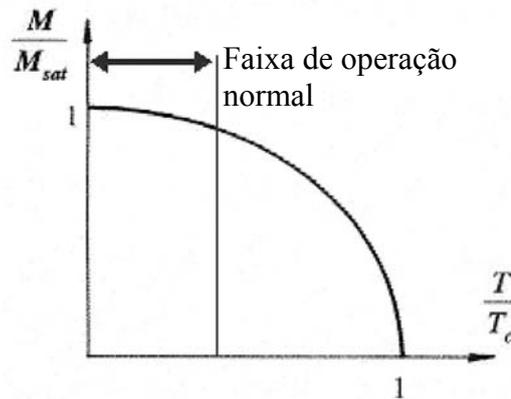


Figura 39. Relação entre a magnetização e a temperatura [CAMPBELL, 1994].

A coercitividade intrínseca foi achada anteriormente para um material com anisotropia magnetocristalina e voltamos a reproduzir:

$$H_{ci} = \frac{2K_1}{\mu_0 M_{sat}} \quad (53)$$

K_1 é a constante cristalográfica do material. Esta equação evidencia que ante incrementos de temperatura e, portanto, diminuição da magnetização efetiva, o H_{ci} aumenta como mostram as características de desmagnetização do material Ceramic 8 da Figura 40, por exemplo.

Das curvas observa-se que a característica ideal ou quase-ideal obtém-se para temperaturas acima de 60°C. Abaixo desta temperatura começam a aparecer joelhos nas curvas B - H .

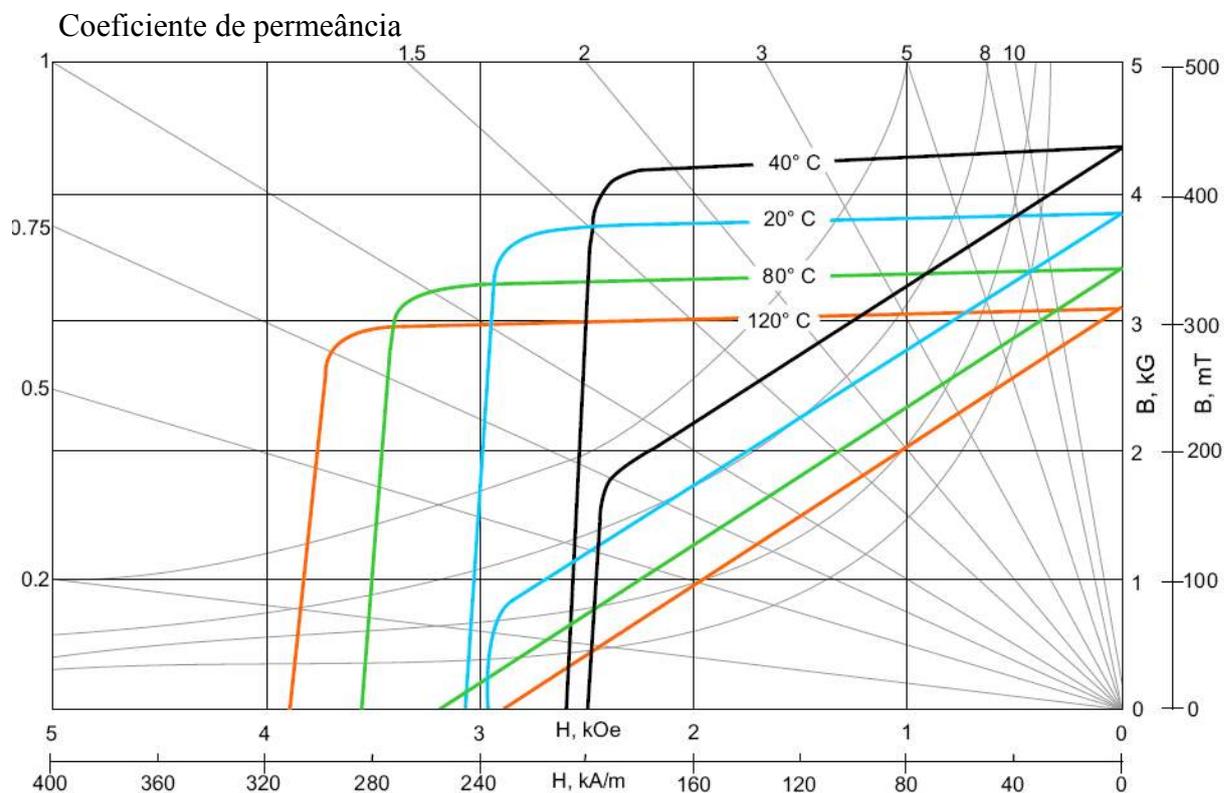


Figura 40. Curvas de desmagnetização do Ceramic 8 para diferentes temperaturas (EAMAGNETICS, 2007).

Como já foi apresentado previamente, para uma determinada temperatura, se H_{ci} (em módulo) é maior que M_{sat} então a curva de desmagnetização é inteiramente linear no segundo quadrante, e o joelho fica no terceiro quadrante do laço B vs. H .

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} , Figura 41.

A determinação da dependência da temperatura dos alnicos é mais complicada que nos ferrites. Da Figura 41 é possível ver que, independentemente da temperatura, a característica de desmagnetização é não linear.

Os ímãs permanentes de Terras Raras também têm uma grande anisotropia magneto-cristalina uniaxial, mas este mecanismo é mais complexo que nos ferrites já que também envolve mecanismos como nucleação ou ancoramento (*nucleation e pinning*). Ímãs permanentes de Samário-Cobalto de tipo SmCo_5 com temperatura Curie na faixa de 500 a 750°C apresentam as curvas (a), Figura 42, e o ímã $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ com temperatura Curie na faixa de 780 a 850°C apresenta as curvas (b).

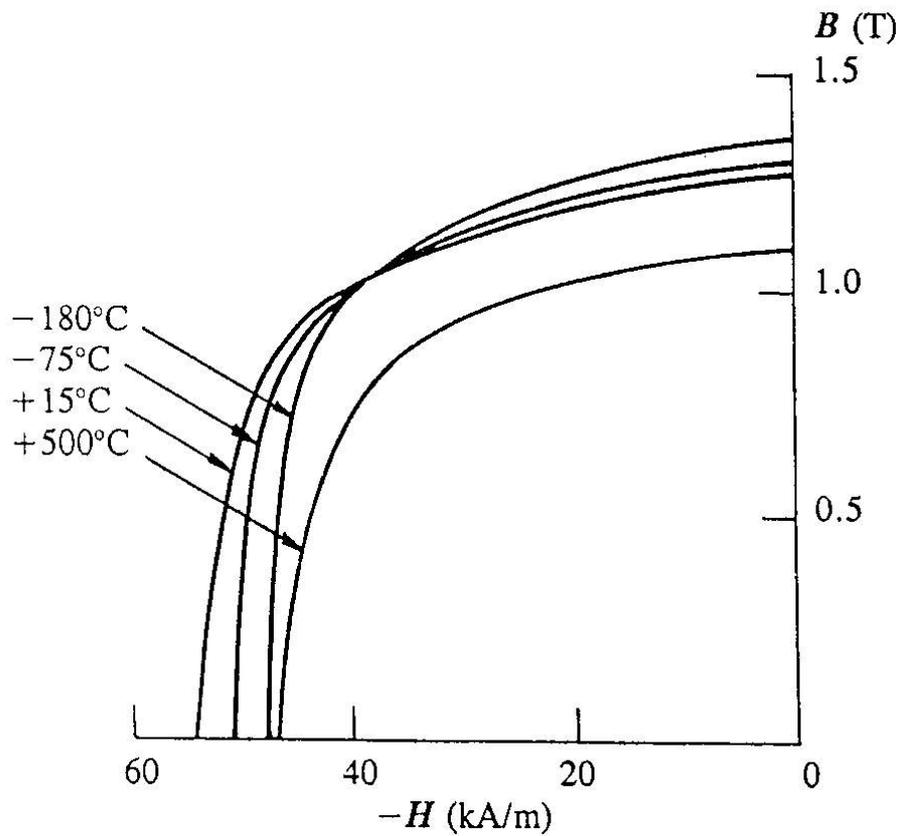


Figura 41. Curvas de desmagnetização do Alnico 5 para diferentes temperaturas (CAMPBELL, 1994).

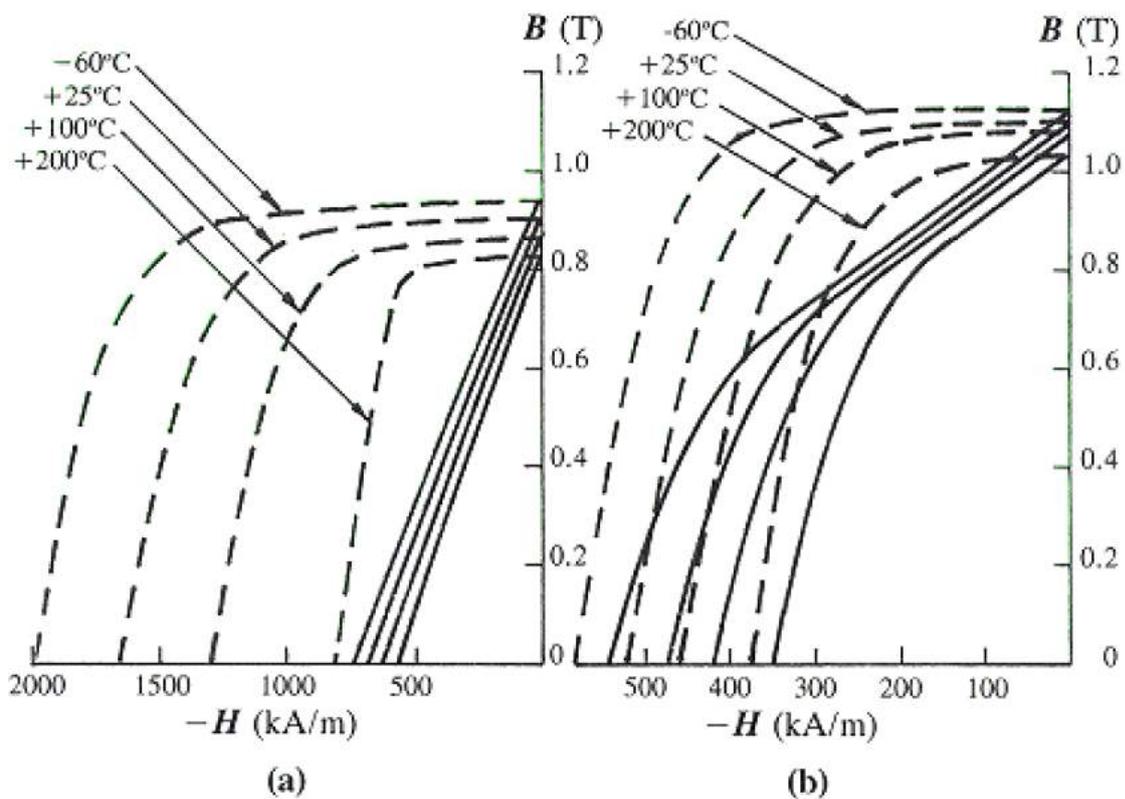


Figura 42. Características desmagnetizantes de (a) SmCo_5 e (b) $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ para diferentes temperaturas (CAMPBELL, 1994).

As coercitividades intrínsecas em estas e outras ligas de Terras Raras não são incrementadas com diminuição de M_{sat} ; ao contrário, H_{ci} diminui com o aumento da temperatura. Isto não é devido especificamente aos mecanismos de nucleação ou ancoramento complicando a anisotropia magnetocristalina; a causa está no nível atômico, onde os momentos magnéticos são fortemente dependentes da temperatura (CAMPBELL, 1994).

Até 200°C no SmCo_5 é possível comprovar que $|H_{ci}| > M_{sat}$ e portanto em todo o segundo quadrante a característica $B-H$ é 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 $|H_{ci}| \leq M_{sat}$ 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 teremos uma caída 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 43. Na Tabela 4 são apresentadas as temperaturas críticas e os coeficientes de temperatura dos principais ímãs permanentes.

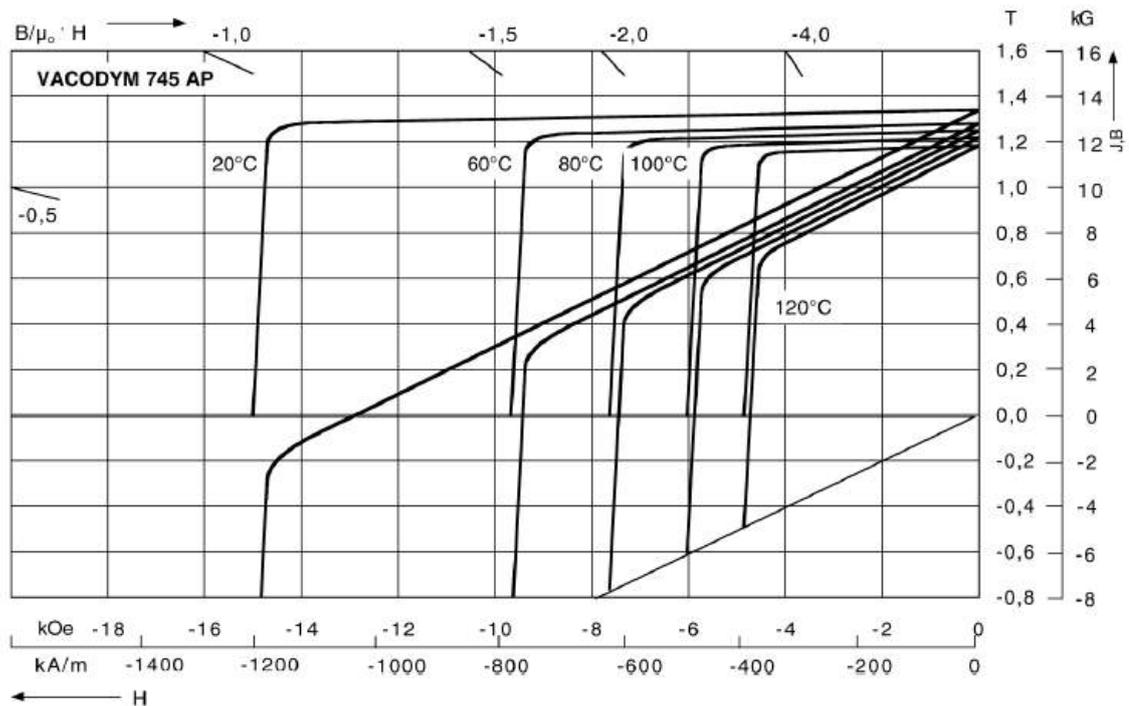


Figura 43. Características de desmagnetização ímã NdFeB a diferentes temperaturas (VACUUMSCHMELZE, 2003).

Tabela 4. Dependência dos ímã da temperatura (MILLER, 1993).

	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	-
SmCo ₅	300	700	-0,04	-	-0,25
Sm ₂ Co ₁₇	350	800	-0,02	-	-0,20
NdFeB	200	310	-0,11	-	-0,60

2.4.6 Curva de desmagnetização

Embora as características magnéticas já apresentadas (máximo produto energético, coercitividade e remanência) sejam as principais que definem praticamente um ímã permanente, a maneira mais útil de visualizar as propriedades magnéticas deste elemento é através da porção do laço de histerese no segundo quadrante, ou seja, desde a remanência até a coercitividade. Esta é conhecida como a curva de desmagnetização e é a informação sempre utilizada na hora de decidir se um ímã permanente é adequado ou não para uma determinada aplicação, Figura 44.

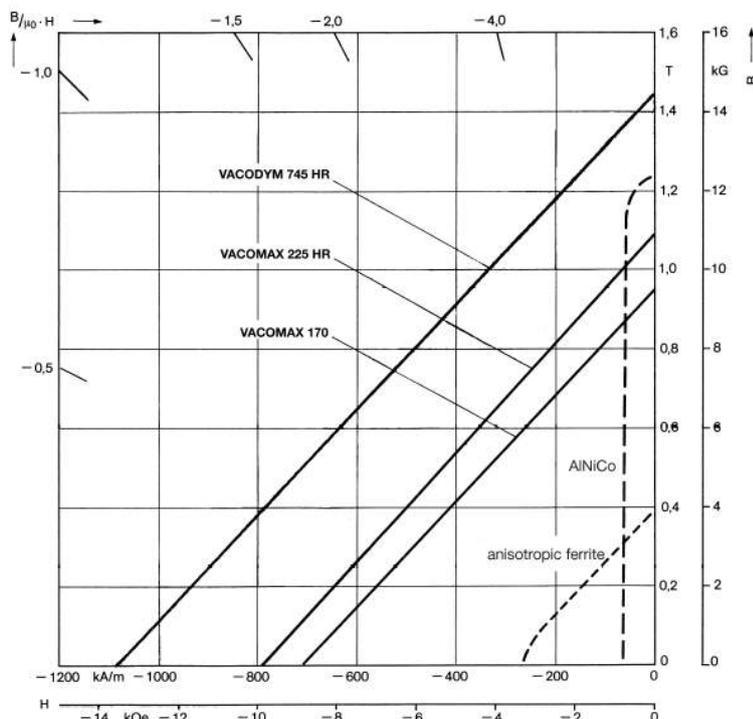


Figura 44. Comparação de características de desmagnetização de diferentes ímãs permanentes (VACUUMSCHMELZE, 2003).

2.4.7 Fator de quadratura (“squareness ratio”)

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_k e o H_{ci} do material, ou seja:

$$FQ = \frac{H_k}{H_{ci}} \quad (54)$$

Portanto, o FQ é uma grandeza adimensional que, para uma característica intrínseca perfeitamente ou 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 magnéticos 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 reverteriam concomitantemente sua magnetização para um dado valor do campo magnético reverso (FARIA, 2005).

2.5 OS ÍMÃS PERMANENTES DUROS (“HARD PERMANENT MAGNET”)

Embora dentro dos materiais magnéticos já tivéssemos definidos aos materiais duros como ímãs permanentes, ainda podemos fazer uma classificação dentro deles. Para isto vamos considerar o desempenho de dois tipos básicos de ímãs permanentes baseado no nível de H_{ci} com respeito à magnetização. Na Figura 45 e Figura 46 podemos diferenciar esses dois tipos de ímãs permanentes como sendo de tipo I e tipo II.

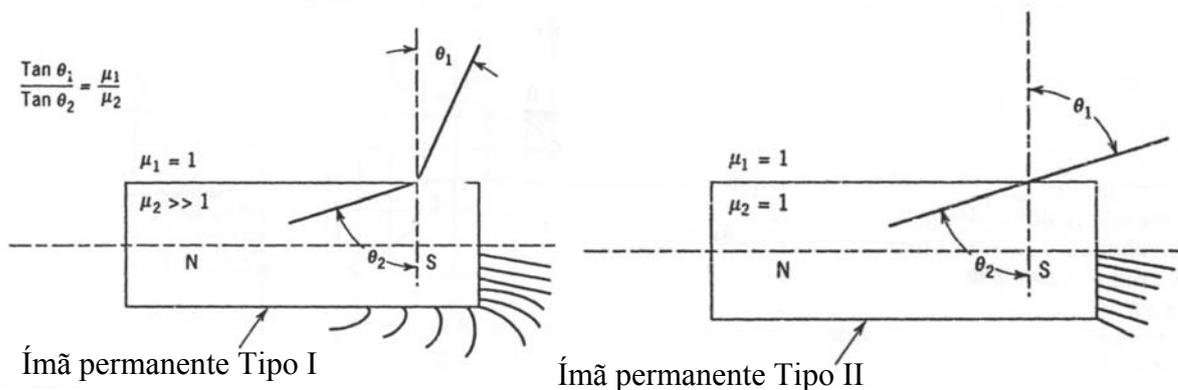


Figura 45. Comparação da permeabilidade, linhas de fluxo útil e disperso (PARKER, 1990).

Em os ímãs permanentes de tipo I temos um H_{ci} consideravelmente menor que B_r , enquanto que nos de tipo II, temos ímãs com H_{ci} igual ou maior que B_r . Na Tabela 5 temos lado a lado as características dos dois tipos de ímãs.

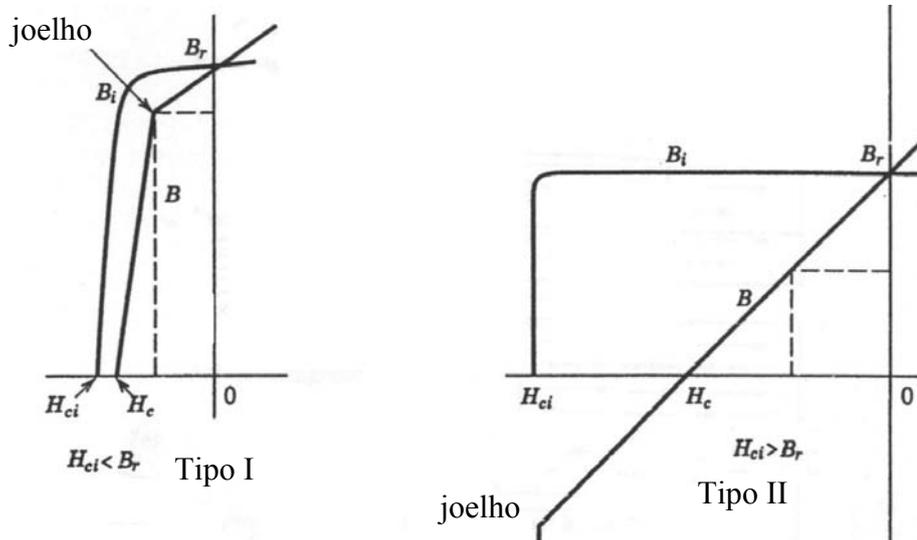


Figura 46. Dois tipos de ímãs permanentes com suas características de desmagnetização (PARKER, 1990).

Tabela 5. Comparação dos ímãs permanentes tipo I e II ou ‘brandos’ e ‘duros’ (PARKER, 1990).

Tipo I	Tipo II
O joelho fica no segundo quadrante, resulta do baixo valor do H_{ci} produzindo uma desmagnetização não linear.	O ponto de irreversibilidade R tem-se deslocado ao terceiro quadrante. Isto significa que o ímã permanente pode ser exposto a campos maiores que seu próprio campo desmagnetizante sem sofrer perdas irreversíveis.
A permeabilidade do ímã permanente (μ_2) é muito maior que a permeabilidade do espaço livre (μ_1).	Tem permeabilidade perto da unidade no sistema CGS.
A relação μ_1/μ_2 é pequena e para qualquer valor de θ_2 , θ_1 (ângulos definidos na Figura 45) será perto de zero, ou seja, as linhas de fluxo deixaram a extremidade do ímã em forma quase perpendicular. Para ímãs com μ_r de 3 ou mais a distribuição de fluxo é similar à distribuição de um pólo eletrostático.	A magnetização uniforme no ímã permanente reduz perdas por escoamento de fluxo. Todo o fluxo magnético tende a chegar aos terminais do ímã. Na Figura 45 é possível ver a inter-relação entre a permeabilidade e a perda nas extremidades. A relação μ_1/μ_2 é perto da unidade e por tanto θ_1 será um ângulo grande, isto é, as linhas de fluxo tendem à extremidade.
Os pólos do ímã permanente não estão nos extremos, mas parecem estar espaçados a 70% do comprimento do ímã. Em uma barra longa de Alnico 5, só 45% das linhas na seção neutral do ímã chegam ao final da barra.	A separação dos pólos é o comprimento total do ímã. Uma barra de ferrite tem aproximadamente 95% de seu fluxo na seção neutral alcançando o extremo do ímã permanente.
Uma grande porcentagem da energia total é armazenada em campos de fuga (dispersão) e esta porção não pode ser convertida eficientemente em outra forma de energia.	O ímã permanente armazena a energia potencial dentro de seu volume o que se traduz em uma energia útil $(BH)_u$ níveis perto de $(BH)_{max}$.
Neste grupo estão incluídos os ímãs de tipo Alnico.	São denominados em ocasiões ímãs permanentes duros (<i>hard permanent magnets</i>) e incluem aos ímãs permanentes tipo ferrites (ou ímãs cerâmicos), os de Samário-Cobalto e os de Neodímio-Ferro-Boro.

2.6 TIPOS DE MATERIAIS PARA ÍMÃS PERMANENTES

São apresentados a seguir os conceitos básicos referentes aos principais ímãs permanentes.

2.6.1 Alnico

Este ímã permanente apresenta uma alta densidade de fluxo magnético remanente, coeficientes baixos de temperatura ($0,02\%/^{\circ}\text{C}$ para Br) e uma temperatura de serviço de até 520°C . Mas, em geral pode considerar-se 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 nos pólos de ferro macio. 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.

2.6.2 Ferrites ou cerâmicos

Os ferrites de bário e de estrôncio foram inventados na década de 50. Em relação ao Alnico, os ferrites têm maior força coercitiva e menor densidade de fluxo magnético remanente. Seu desempenho com respeito à temperatura já foi apresentado.

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, altofalantes, 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.

A formulação química pode ser expressa como $\text{MOx6}(\text{Fe}_2\text{O}_3)$, onde M é Ba, Sr, ou Pb.

Os ímãs de ferrite podem estar disponíveis em tipos isotrópicos e anisotrópicos.

2.6.3 Ímãs Permanentes de Terras Raras

Terras Raras é na verdade um nome geral dado ao conjunto de 17 elementos químicos na tabela periódica: escândio, ítrio e os lantanídeos (lantânio, cério, praseodímio, neodímio, promécio, samário, európio, gadolínio, térbio, disprosio, hólmio, érbio, túlio, itérbio e lutécio). Originalmente, foram considerados “raros” porque eram desconhecidos na forma elementar, e difíceis de extrair das rochas que os continham; também eram considerados escassos quando foram descobertos. De fato, hoje são considerados muitos deles abundantes: o cério em 60 partes por milhão é o número 25 mais abundante, mais que o chumbo. Ainda o menos abundante deles, o lutécio, é 200 vezes mais abundante que o ouro. A palavra “terra” é um termo obsoleto para significar “óxido”.

2.6.3.1 Samário-Cobalto

O SmCo_5 foi descoberto em 1960 e comercializado a partir de 1970. Estes ímãs permanentes apresentam alta densidade de fluxo remanente, alta força coercitiva, alto produto energético, curva de desmagnetização linear, Figura 47, e baixo coeficiente de temperatura (0,03 a 0,045%/°C para B_r , e de 0,14 a 0,40%/°C para H_c). A máxima temperatura de serviço é de 250 a 300°C.

Seu custo é uma desvantagem. Tanto Sm como Co são ainda relativamente custosos devido às restrições de fornecimento.

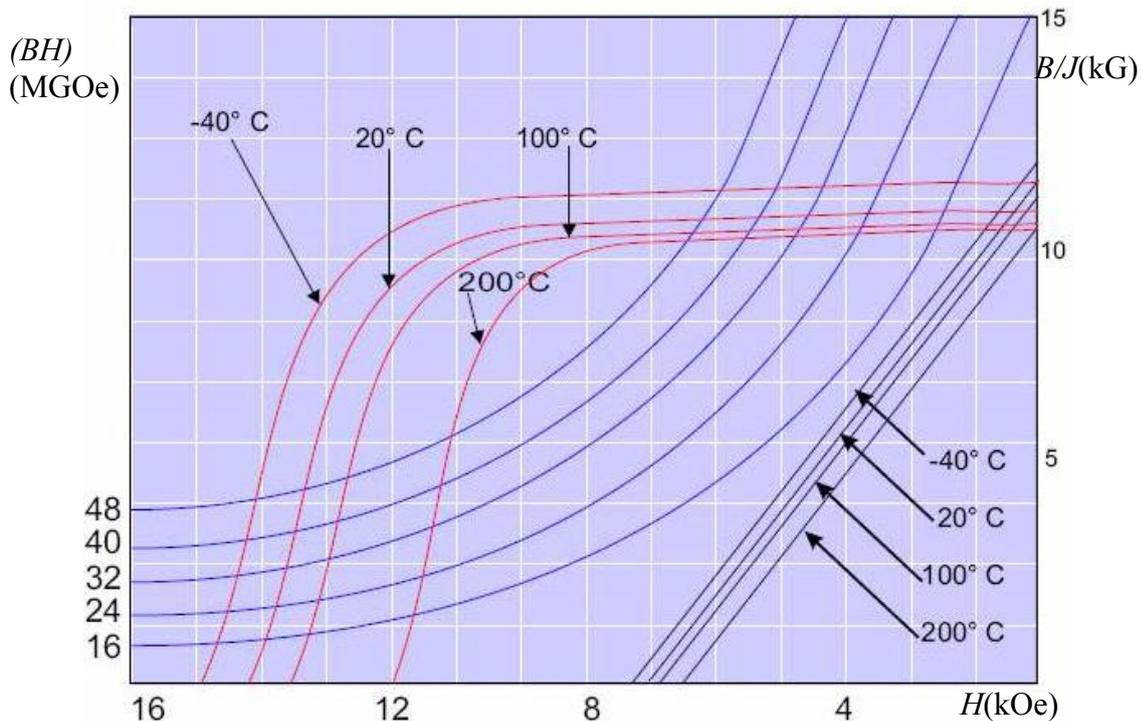


Figura 47. Curvas de desmagnetização de amostras de Samário-Cobalto (EAMAGNETICS, 2007).

2.6.3.2 Neodímio-Ferro-Boro

Uma segunda geração de ímãs permanentes foi anunciada por *Sumitomo Special Metals* em 1983 com ímãs baseados no neodímio (Nd), o qual é muito mais abundante que o Sm e mais barato.

Os ímãs de NdFeB têm melhores propriedades magnéticas que o SmCo à temperatura ambiente, Figura 48. Mas as suas curvas de desmagnetização são fortemente dependentes da temperatura.

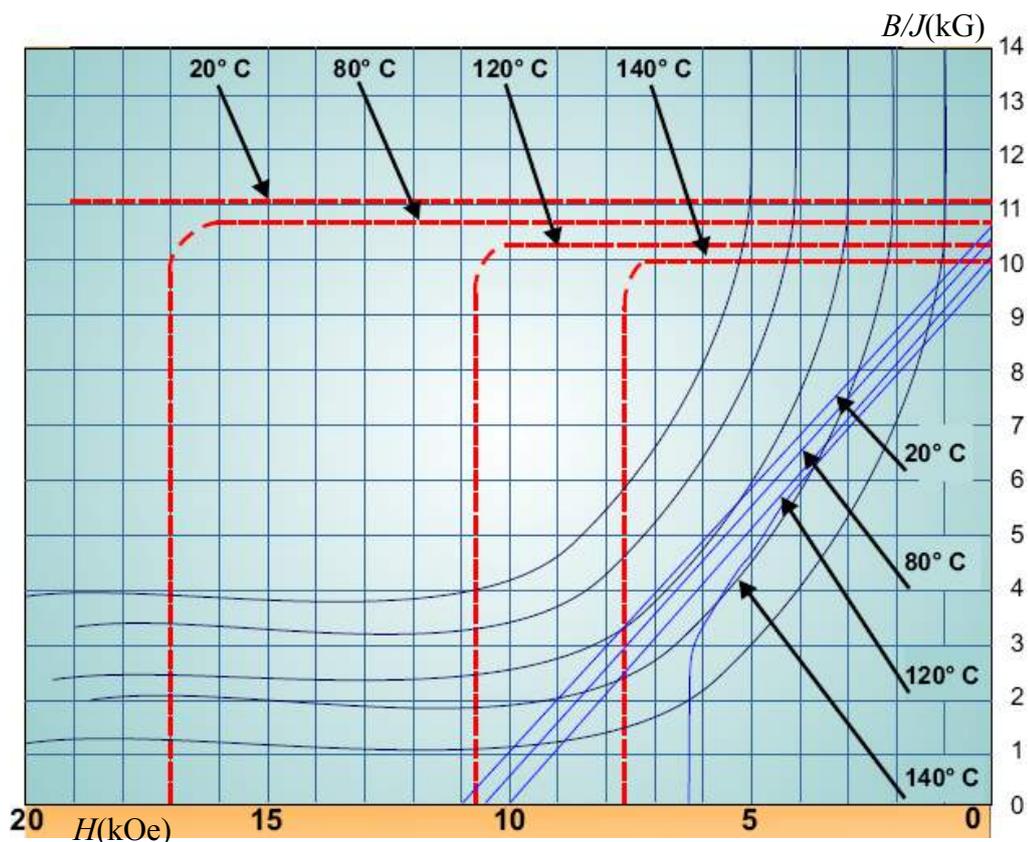


Figura 48. Curvas de desmagnetização de amostras de Neodímio-Ferro-Boro (EAMAGNETICS, 2007).

O coeficiente de temperatura para B_r é de 0,095 a 0,15%/°C, e o de H_c é de 0,40 a 0,70%/°C. A máxima temperatura de serviço é da ordem de 150°C, e a temperatura de Curie é de 310°C.

O NdFeB também é sensível à corrosão. Tem grandes possibilidades de melhorar a relação performance/custo para muitas aplicações. Os campos de magnetização para alcançar uma saturação completa estão na ordem de 1 a 4 MA/m (indução da ordem de 1,3 a 5 T) dependendo dos materiais da composição.

2.7 CARACTERÍSTICA DESMAGNETIZANTE LINEAR E NÃO LINEAR

Como já foi apresentado previamente, os fatores de mérito como coercitividade, remanência e máximo produto energético por si mesmos, em forma isolada, não proporcionam ao projetista uma visão completa para a utilização de um ímã permanente em uma determinada aplicação. Foi mencionado também que é imprescindível dispor da característica de desmagnetização do segundo quadrante e que a linearidade dela depende basicamente da desmagnetização intrínseca e se $|H_{ci}| > M_{sat}$. Ainda com essas condições, tendo um ímã permanente com $FQ = 1$ e $|H_{ci}| > M_{sat}$, a linearidade dependerá também da temperatura.

Supondo condições de trabalho à temperatura ambiente vamos deduzir as condições de linearidade de um ímã permanente duro, mostrando que ainda no caso real de ímãs permanentes com FQ um pouco menor que um, ou seja, com uma característica de desmagnetização intrínseca não tão quadrada, mas com declive linear, a característica $B - H$ ainda continua sendo linear. E com base nisto, pretende-se propor, estudar e demonstrar um sistema de caracterização de ímã permanente com esta característica baseado em um circuito magnético com entreferro variável que permita inter-relacionar os pontos ao longo de segmento de reta que se estabeleceria entre o B_r e o H_c .

Partimos inicialmente de um ímã permanente duro ideal de características $J - H$ quadrada ($J = J_r = B_r$ desde o quadrante positivo de magnetização até $-\mu_0 H_{ci}$). A curva de desmagnetização é uma relação entre B_m e H_m incluindo a magnetização M :

$$B_m = \mu_0 (H_m + M) \quad (55)$$

Diferenciando esta equação com respeito a H_m :

$$\frac{dB_m}{dH_m} = \mu_0 \left(1 + \frac{dM}{dH_m} \right) \quad (56)$$

Vemos que, se M é constante, então a inclinação da curva de desmagnetização é μ_0 (a permeabilidade do espaço livre):

$$M = \text{constante} \Rightarrow \frac{dB_m}{dH_m} = \mu_0 \quad (57)$$

Na verdade, a inclinação igual a μ_0 é sinônimo de que a magnetização do ímã permanece constante, ao passo que qualquer declive em M tende a acelerar-se com o crescimento da desmagnetização. Um declive em M é devido a uma reversão parcial da magnetização, da qual o ímã não se recupera sem re-magnetização. Conseqüentemente, quando a curva de desmagne-

tização é linear, significa que não existem perdas irreversíveis (melhor explicadas na Figura 52) e o ponto de operação poderá mover-se para cima e para baixo reversivelmente.

Para compreender melhor este aspecto, utilizamos valores reais de um ímã testado no Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) (Landgraf, 2006), (Flores Filho, 2006):

$$\mu_0 M_r = J_r = B_r = 1,217 \text{ T} \quad \mu_0 H_{ci} = 1,46 \text{ T}$$

Da equação fundamental

$$B_m = \mu_0 H_m + \mu_0 M = \mu_0 H_m + J_m \quad (58)$$

começamos a atribuir valores $\mu_0 H_m$ como se estivéssemos desmagnetizando o ímã no segundo quadrante, Tabela 6, obtendo-se uma característica desmagnetizante como a da Figura 49.

Tabela 6. Desmagnetização ideal.

$\mu_0 H_m(\text{T})$	$J_m(\text{T})$	$B_m(\text{T})$
0	1,217	1,217
-0,5	1,217	0,717
-1,0	1,217	0,217
-1,4	1,217	-0,183

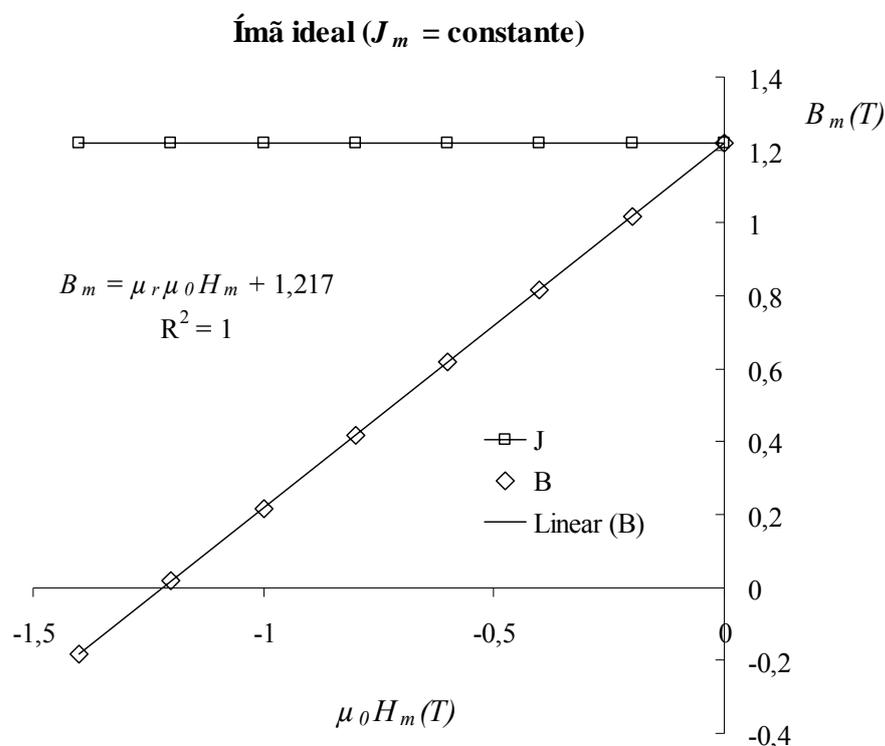


Figura 49. Característica desmagnetizante ideal.

Pela intersecção da característica $B(H)$ com a abscissa ($B = 0$) se permite obter a coercitividade de tal ímã:

$$B_r = H_c = 1,219 \text{ T}$$

Portanto a inclinação da característica é

$$\mu_r = 1$$

No caso ideal, então, a permeabilidade relativa do material é igual a 1 e igual à permeabilidade do ar.

Comprovamos, então, que, se H_{ci} é maior que J_s , como foi apresentado em 2.2.1, a característica desmagnetizante é linear em todo o segundo quadrante.

Observando os dados obtidos dos testes no IPT vemos que os ímãs não possuem uma característica ideal de J_m quadrada, mas com uma leve inclinação que pode ser traduzida em uma equação linear:

$$J_m = 0,065 \mu_0 H_m + 1,217 \quad (59)$$

Novamente introduzimos esta expressão de J_m em $B_m = \mu_0 H_m + J_m$ e obtemos a resposta do ímã como densidade de fluxo em função de $\mu_0 H_m$:

$$B_m = (1 + 0,065) \mu_0 H_m + 1,217 \quad (60)$$

Tabela 7. Desmagnetização real a temperatura ambiente.

$\mu_0 H_m(\text{T})$	$J_m(\text{T})$	$B_m(\text{T})$
0	1,217	1,217
-0,2	1,204	1,004
-0,4	1,191	0,791
-0,6	1,178	0,578
-0,8	1,165	0,365
-1	1,152	0,152
-1,2	1,139	-0,061
-1,4	1,126	-0,274

Observa-se que a característica de desmagnetização permanece sendo linear, mas muda levemente sua permeabilidade de retorno incrementando-se levemente acima da permeabilidade do ar Figura 50.

Consideremos agora a influência de um aumento da temperatura, levando o H_{ci} a um valor menor que a magnetização de saturação (por simplicidade, não considerando a diminuição do B_r): obtendo-se a Tabela 8 e a Figura 51.

Característica real de um ímã de NdFeB

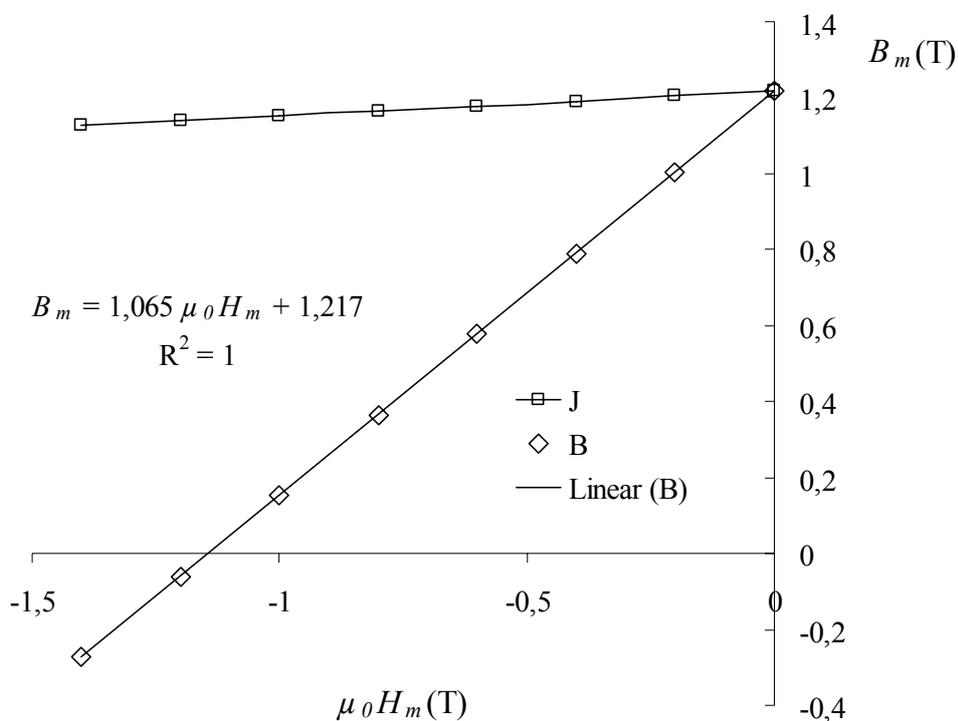


Figura 50. Característica de desmagnetização real de um ímã de NdFeB.

Observamos que a característica de desmagnetização ainda permanece linear num trecho do segundo quadrante, mas agora apresenta um joelho indicando uma diminuição do H_c e uma zona abaixo do joelho onde não é aconselhável trabalhar, Figura 51. Se o ponto de operação é forçado para baixo do joelho, então quando o campo desmagnetizante é removido o ímã se recupera através de uma linha de retorno inferior.

Tabela 8. Característica de desmagnetização com aumento de temperatura.

$\mu_0 H_m$ (T)	J_m (T)	B_m (T)
0	1,217	1,217
-0,2	1,204	1,004
-0,4	1,191	0,791
-0,6	1,078	0,578
-0,65	0,335	-0,315
-0,67	-0,474	-1,144

Desmagnetização com aumento da temperatura

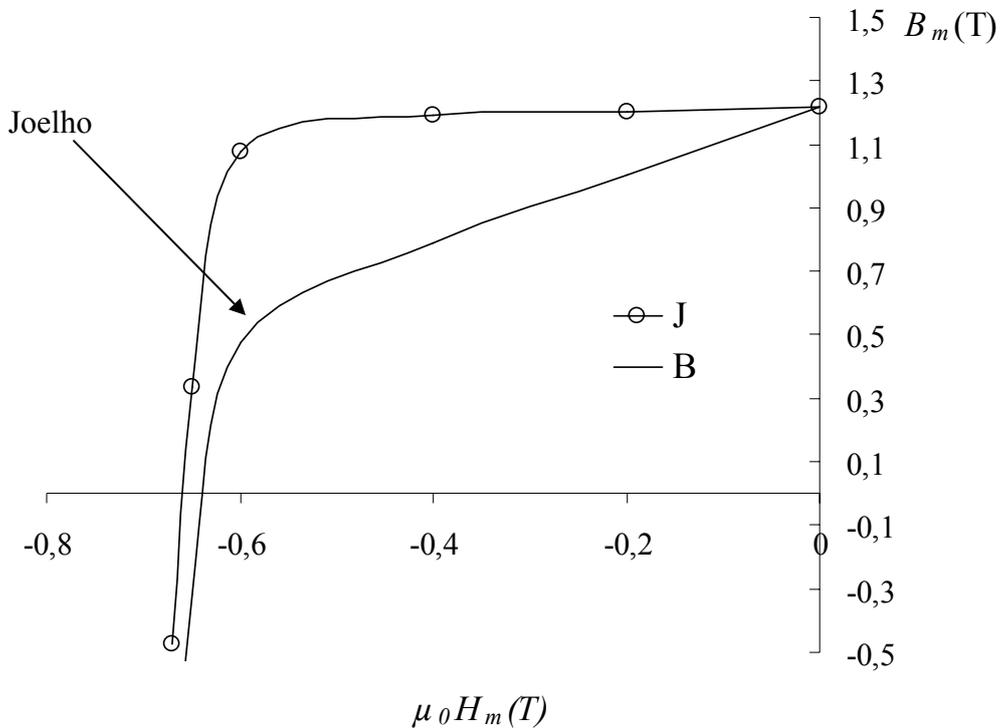


Figura 51. Característica desmagnetizante com aumento da temperatura.

Na Figura 52 o campo desmagnetizante é suficiente para reduzir B_p a zero. O ímã “retrocede” ao longo da linha de retorno deprimida, mas tem perdido quase 20% do fluxo remanente. Esta perda é irreversível até que haja uma nova remagnetização.

Nesta situação de característica parcialmente linear ou não linear em caso do Alnico, é aonde o HEV não poderia proporcionar uma característica de desmagnetização válida. Provavelmente poderia até apresentar uma boa leitura do B_r e da permeabilidade de retorno do primeiro trecho da curva, mas com certeza obteríamos uma leitura errada da coercitividade H_c .

Baseados nesta realidade de uma característica de desmagnetização linear em determinados ímãs e para determinadas temperaturas é que o circuito magnético HEV pode fornecer uma alternativa de caracterização de ímãs permanentes duros.

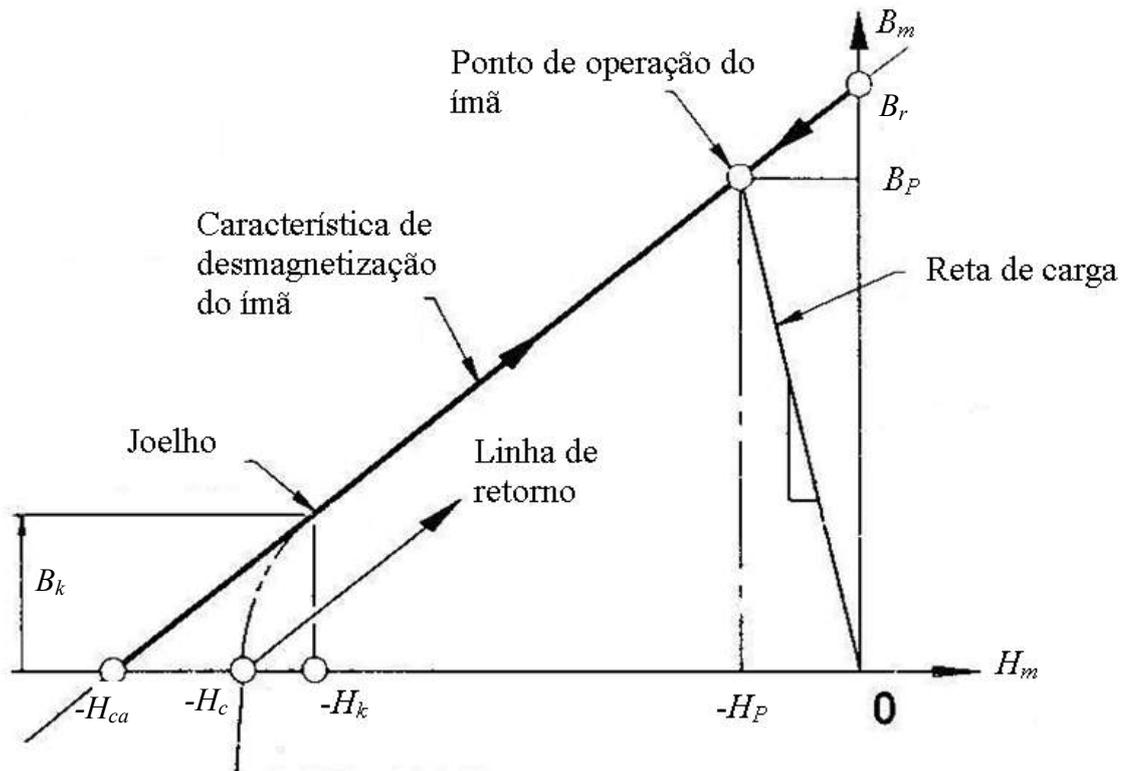


Figura 52. Detalhes da característica de desmagnetização [HENDERSHOT Jr., 1994].

2.8 CIRCUITO MAGNÉTICO COM ÍMÃ PERMANENTE

Vejamos agora um circuito magnético com um ímã permanente duro (de tipo II) como mostrado na Figura 53.

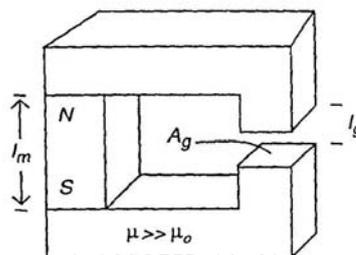


Figura 53. Circuito magnético com ímã permanente e entreferro.

Aplicando a lei de Ampère à configuração da Figura 53 ao longo da linha média e seguindo as linhas de fluxo concatenado e sabendo que não há correntes presentes:

$$\oint H dl = Ni = 0 = \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_{Fe}} H_{Fe} dl_{Fe} + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (61)$$

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

$$H_{Fe} \cong 0 \Rightarrow \int_{l_m} H_m dl_m + \int_{l_g} H_g dl_g = 0 \quad (62)$$

Assumindo H_m e H_g constantes ao longo de l_m e l_g

$$H_m l_m + H_g l_g = 0 \Rightarrow H_m = -H_g \frac{l_g}{l_m} \quad (63)$$

No entreferro temos

$$H_g = \frac{B_g}{\mu_0} \Rightarrow H_m = -\frac{B_g}{\mu_0} \frac{l_g}{l_m} \quad (64)$$

No pressuposto inicial e simplificador de que não há fluxo disperso

$$\Phi_m = \Phi_g \Rightarrow B_m A_m = B_g A_g \Rightarrow B_g = B_m \frac{A_m}{A_g} \quad (65)$$

a (64) fica

$$H_m = -\frac{B_m}{\mu_0} \frac{l_g}{l_m} \frac{A_m}{A_g} \quad (66)$$

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

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right) \quad (67)$$

Da Equação (67) vemos que a inclinação da reta de carga do ímã permanente depende das dimensões do ímã e das dimensões do entreferro.

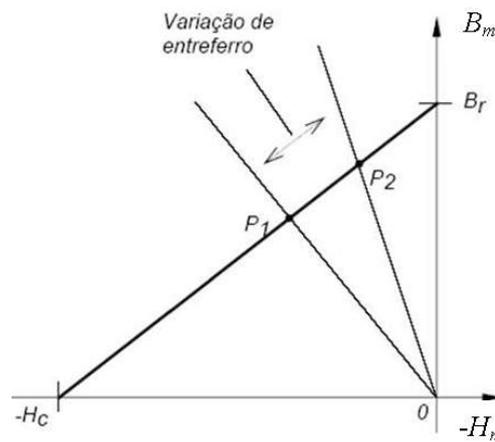


Figura 54. Característica típica de desmagnetização de ímãs de Terras Raras e retas de carga (FLORES FILHO, 2003).

O ponto de funcionamento é a interseção da reta de carga com a curva de desmagnetização:

$$B_r + \mu_m H_m = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right) H_m \quad (68)$$

O que resulta em

$$H_m = \frac{-B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right)} \quad (69)$$

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

$$-H_m l_m = \frac{B_r l_m}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right)} \quad (70)$$

Da (64), obtém-se:

$$B_g = -\mu_0 H_m \left(\frac{l_m}{l_g} \right) = \frac{\mu_0 B_r}{\frac{B_r}{H_c} + \mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{A_g}{A_m} \right)} \frac{l_m}{l_g} \quad (71)$$

2.9 CONSIDERAÇÕES SOBRE CIRCUITOS MAGNÉTICOS

Para começar a entender os aspectos existentes num circuito magnético são apresentados oito axiomas (MOSKOWITZ, 1995):

1. As linhas equipotenciais (de fluxo), como as correntes elétricas, sempre percorrem o caminho de menor resistência; em termos magnéticos, isto significa que as linhas equipotencias se estabelecem preferencialmente ao longo caminho de maior permeância, ou seja, de menor relutância;
2. As linhas equipotenciais agem como se repelisses umas de outras, se os sentidos associados aos vetores B sobre elas definidos são os mesmos;
3. Como corolário à condição (2), as linhas equipotenciais nunca podem se cruzar;
4. Como corolário da condição (1), as linhas equipotenciais sempre se estabelecem ao longo do caminho mais curto através de qualquer meio; elas, portanto podem assumir a forma unicamente de linhas retas ou curvadas, e nunca podem apresentar ângulo reto.
5. As linhas equipotenciais sempre deixam (ou entram) uma superfície de material ferromagnético com ângulo reto;

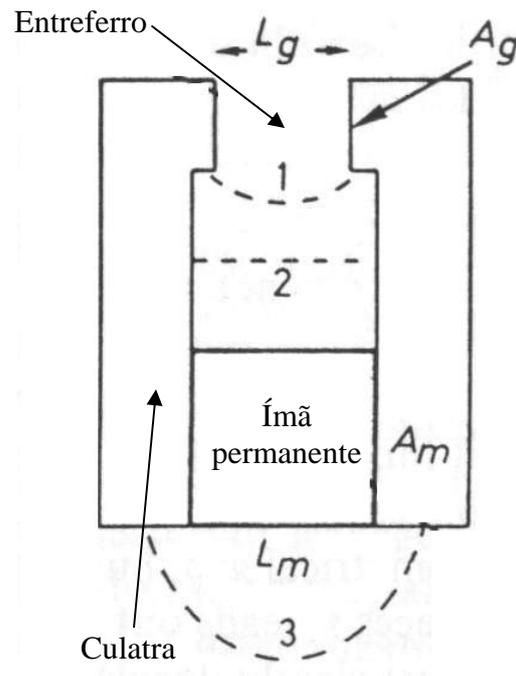


Figura 55. Perdas num circuito magnético com ímãs permanentes (McCAIG, 1987).

6. Todos os materiais ferromagnéticos têm uma capacidade limitada de estabelecer o fluxo magnético; quando este é alcançado, ficam saturados e comportam-se como se não tivessem a permeabilidade do ar;
7. As linhas equipotenciais (de fluxo) se estabelecem desde o pólo norte mais perto ao pólo sul mais perto em um trajeto que forma um laço fechado;
8. Pólos magnéticos não são pólos unitários; num circuito magnético, dois pontos quaisquer equidistantes de um eixo neutral agem como pólos; portanto o fluxo circulará entre eles desde que se cumpram as condições anteriores.

Há dois fatores que são importantes na definição da distribuição de fluxo magnético em um circuito magnético com ímã permanente: o fluxo disperso (*leakage*) e o franjamento ou espraçamento (*fringing*).

O espraçamento ou *fringing flux* é o fluxo que define a seção magnética efetiva do entreferro de interesse. Já o fluxo disperso ou *leakage flux* é o fluxo que é radiado entre os braços ou através das partes externas do circuito magnético (MOSKOWITZ, 1995), sem se estabelecer ou contribuir para o fluxo magnético no entreferro de interesse. Na Figura 55 os caminhos tracejados 2 e 3 são considerados de fluxo disperso e 1 de franjamento.

Para considerar os efeitos do fluxo disperso pode-se definir um fator de dispersão:

$$L_f = \frac{\text{Fluxo total}}{\text{Fluxo útil}} = \frac{\Phi_g + \Phi_l}{\Phi_g} = \frac{B_m A_m}{B_g A_g} \quad (72)$$

Entenda-se aqui que fluxo total será considerado como aquele produzido pela fonte de fluxo magnético, no caso, o ímã permanente. E o fluxo útil será aquele presente no entreferro de interesse.

O trabalho de (McCAIG, 1987) considera que a estimativa do fator L_f é “a mais problemática dificuldade que o projetista pode enfrentar”. L_f depende da geometria do sistema e da distribuição da permeabilidade pelo volume deste. Um outro problema é que nem sempre se sabe como definir exatamente o Φ_g . Outros autores mencionam o fator L_f como K_l e os valores que pode adotar vão de pouco mais de 1 até 20 nos primeiros magnetrons (WRIGHT, 1977).

A razão entre a área da seção magnética do entreferro e da face polar do ímã permanente pode ser considerada com sendo um fator de correção por franjamento ou espraiamento (FLORES FILHO, 2003):

$$C_f = \frac{A_g}{A_m} \quad (73)$$

Ela mostra como o fluxo no entreferro se espalha em relação ao que é produzido pelo ímã permanente. Novamente, a definição de C_f trás a dificuldade de como definir A_g , devido à dificuldade inerente à determinação da distribuição de fluxo magnético na região do entreferro. Outros autores falam desta situação com um fator C_ϕ conhecido como fator de concentração de fluxo equivalente ao inverso do C_f (HANSELMAN, 1994).

A maneira como o fluxo no entreferro se distribui depende do formato, posição relativa e das dimensões das superfícies que confinam o entreferro e, também, do comprimento deste último. Foram desenvolvidos uma grande variedade de fórmulas e métodos que tentam lidar com este problema (ROTORS, 1941), (HADFIELD, 1962), (PARKER, 1962), (SCHULER, 1970). Mas a maioria delas sofre de variadas limitações e erros quando uma geometria mais complexa é analisada. Como orientação prática, o projetista deve usar uma estimativa inicial para A_g baseada em algum critério, e procurar melhorá-la à medida que o projeto evolui (FLORES FILHO, 2003).

Um outro aspecto são as quedas de força magnetomotriz ou de potencial magnético escalar que acontecem no aço da culatra e nas junções ou nos entreferros parasitas ou construtivos. O fator usado nas referências é K_2 (McCAIG, 1987), (WRIGHT, 1977), (PARKER, 1990), e se pode considerar que é adotado um valor entre 1,1 e 1,5 para a maioria dos circuitos.

$$H_m L_m + K_2 H_g L_g = 0 \quad (74)$$

Observando então os efeitos de L_f e K_2 apreciamos que um deles equivale a incrementar a área do entreferro (L_f) e o outro equivale a incrementar o comprimento do entreferro (K_2).

A expressão da reta de carga do ímã permanente fica agora:

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{L_f C_f}{K_2} \right) \quad (75)$$

Um outro aspecto que deve ser levado em conta na distribuição do fluxo num circuito magnético com ímã permanente é a posição do ímã em relação ao entreferro como é mostrado na Figura 56. Quando mais próximo o ímã estiver do entreferro de interesse, mais próximo da unidade estará o L_f correspondente, por exemplo, a configuração em (c); quanto mais distante o ímã estiver do entreferro de interesse, maior será o L_f , como em (a).

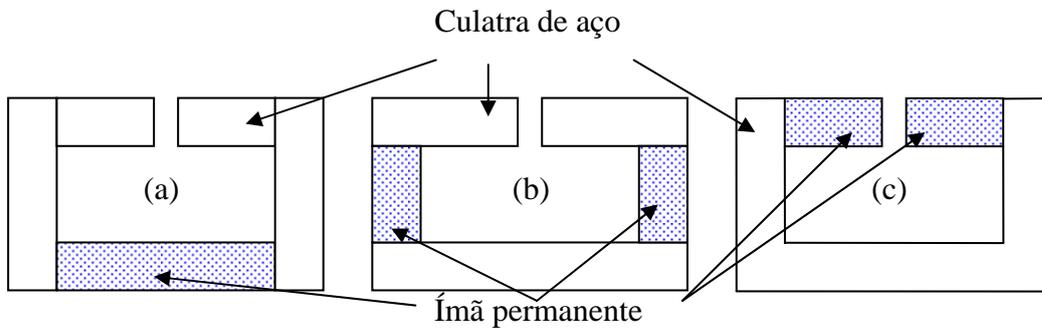


Figura 56. Diferentes configurações com ímãs permanentes (BASAK, 1996).

3 HISTERISÍMETRO DE ENTREFERRO VARIÁVEL - O HEV

3.1 INTRODUÇÃO

A determinação das principais propriedades magnéticas de um ímã permanente geralmente requer configurações de medição sofisticadas e custosas. Propõe-se um sistema de caracterização de ímãs permanentes de Terras Raras ou de característica desmagnetizante linear, à temperatura ambiente, de baixo custo e de implementação simples e rápida. Este consiste em um circuito magnético formado pelo ímã em estudo, uma culatra de aço, um entreferro variável e uma sonda de efeito Hall para a medição da intensidade do campo magnético no entreferro. Com objetivo de manter a simetria no fluxo do entreferro, a estrutura adotada é de dupla janela com entreferro e ímã no centro do dispositivo. Variando-se o entreferro, muda-se o ponto de operação do ímã permanente sobre sua característica desmagnetizante. Da correlação entre a medida do entreferro e a medição de campo magnético ou densidade de fluxo magnético no entreferro, pode-se obter a característica desmagnetizante que se busca. Diferentemente do histerisímetro tradicional, não há enrolamento para produzir uma força magneto-motriz desmagnetizante. Esse dispositivo daqui em diante será denominado **HEV**, ou seja, **histerisímetro de entreferro variável**.

3.2 DESCRIÇÃO DO HEV

A estrutura do HEV projetada e usada é retangular e feita de aço 1020, com dimensões de seu quadro externo de 320 mm x 290 mm x 40 mm, com braços de 40 mm x 40 mm e suporte central para um ímã. Neste caso particular, previu-se os cabeçotes centrais para um ímã disponível com face polar de 25,4 mm por 25,4 mm. Nos cabeçotes, a redução da seção do braço até a do ímã foi feita com ângulo de 45° como se vê na Figura 57.

Os cabeçotes de aço 1020 niquelados que ficam no entreferro com o ímã podem ser vistos na Figura 58.

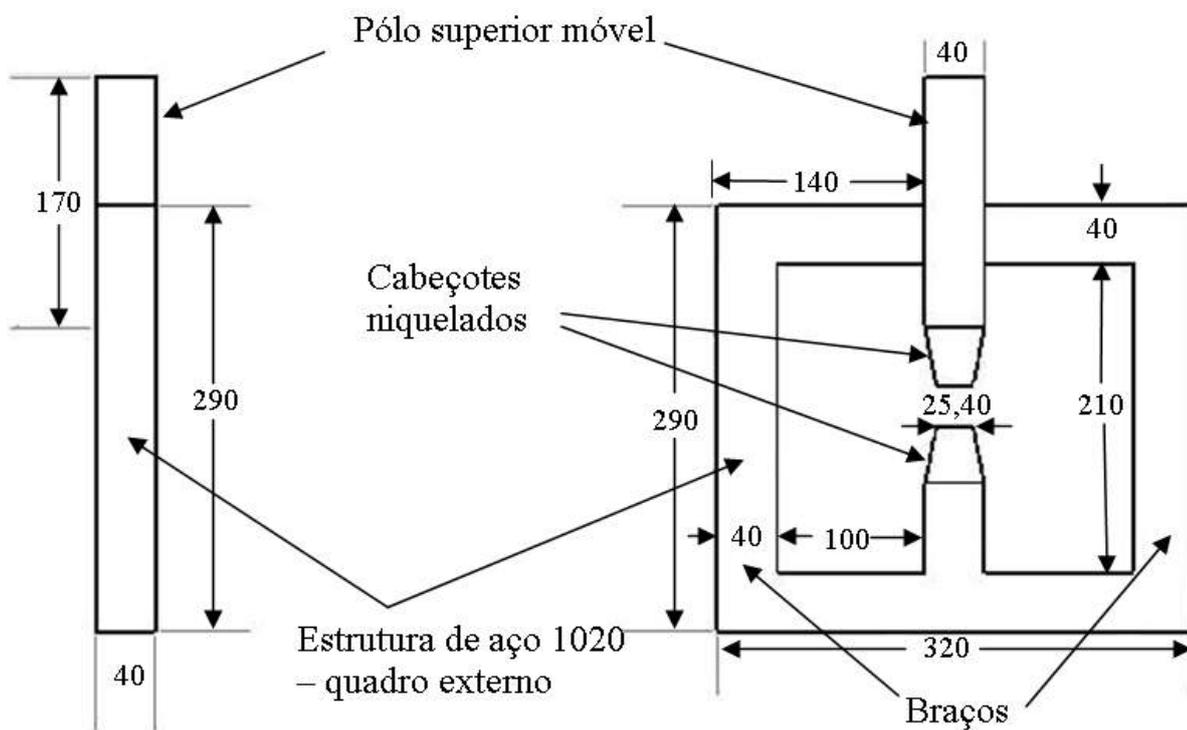


Figura 57. Vista 2D do HEV – dimensões em milímetros.

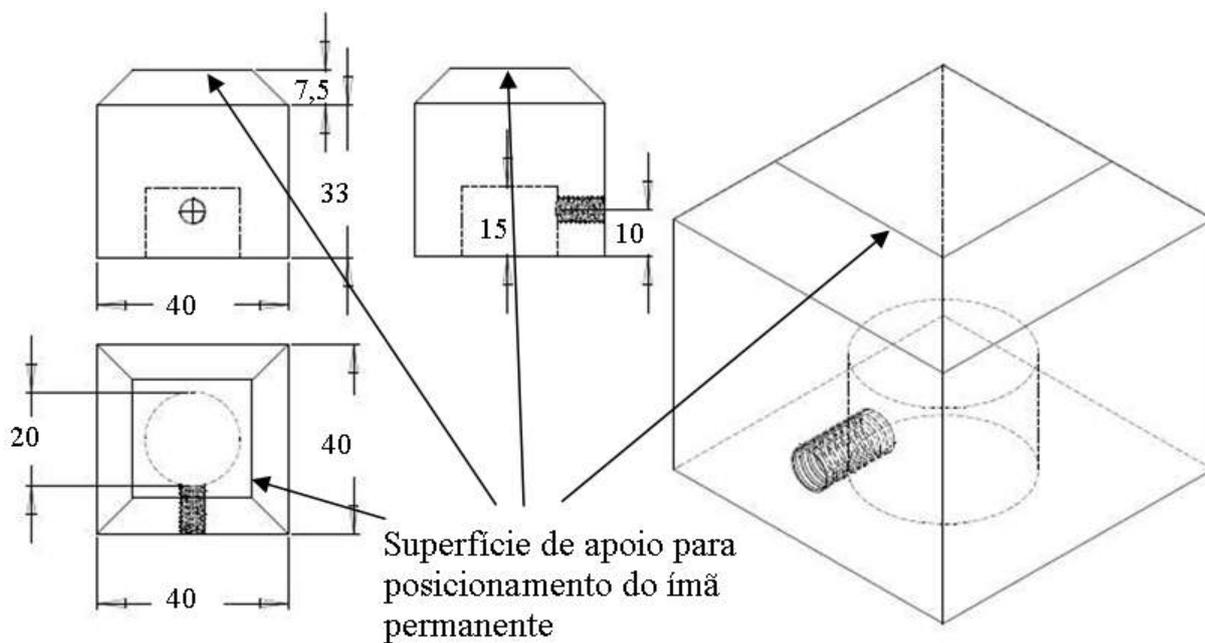


Figura 58. Detalhe dos cabeçotes niquelados – dimensões em milímetros.

Junto ao suporte central superior do braço central móvel se pode também apreciar na Figura 59 e Figura 60 o LVDT que traduz os deslocamentos do entreferro em uma tensão de CA senoidal e através de um condicionador em uma tensão de CC.

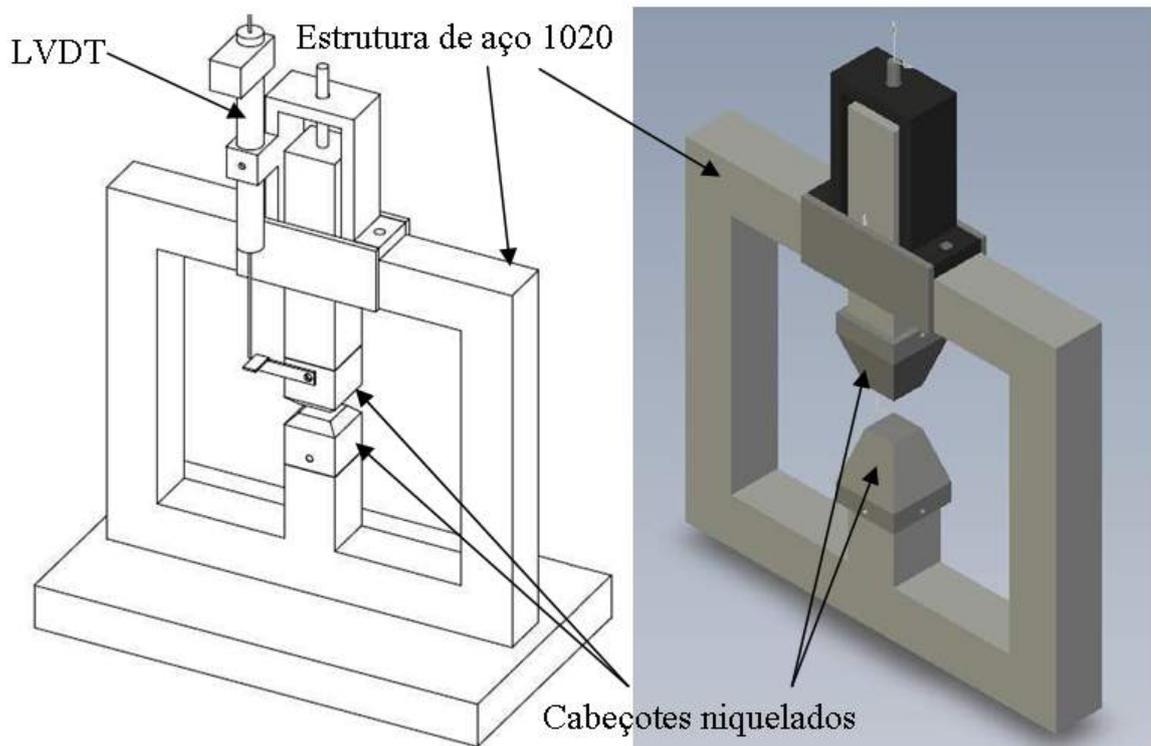


Figura 59. Vistas 3D do HEV.

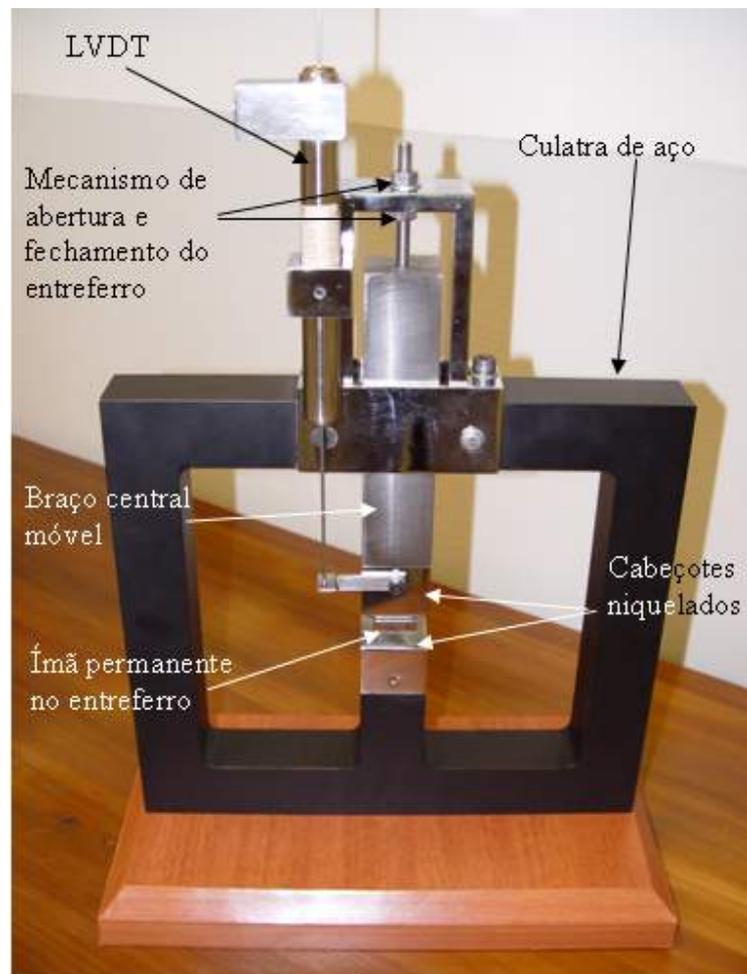


Figura 60. Imagem do primeiro protótipo do HEV.

Como sistema auxiliar de calibração do LVDT - condicionador foi usado um relógio comparador como se observa na Figura 61.

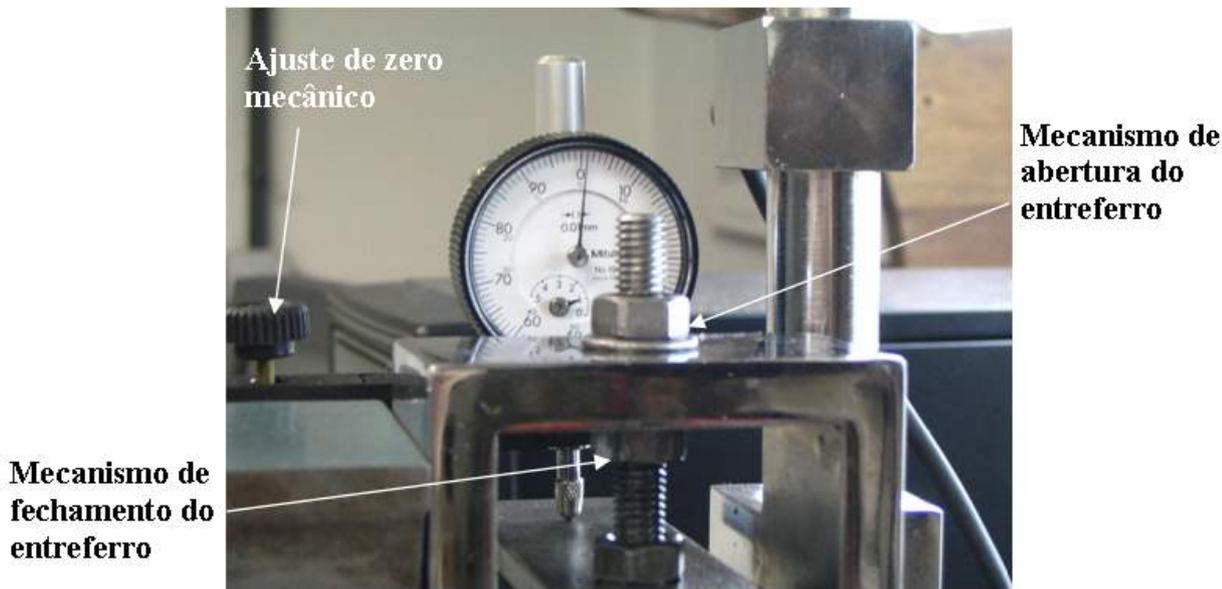


Figura 61. Detalhe da incorporação do relógio comparador para medição do deslocamento do entreferro.

Nas figuras anteriores também se pode verificar o mecanismo de fechamento e abertura do entreferro. No suporte central cromado a porca superior é usada para abrir o entreferro, e a porca inferior é para o fechamento.

3.3 ELEMENTOS CONSTITUENTES DO HEV

O aço utilizado no primeiro protótipo do HEV é o 1020 que tem as características magnéticas como mostradas na Figura 62:

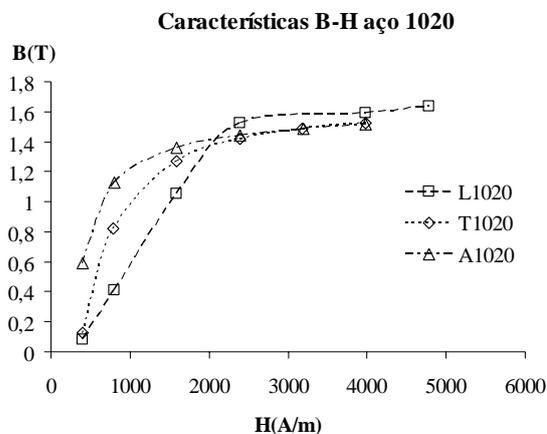


Figura 62. Características magnéticas do aço 1020 [SCHOESSOW, 1998].

O aço A1020 é recozido ou temperado com direção de laminação desconhecida. O aço L1020 é laminado a frio e paralelo à dimensão mais longa, e o aço 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.

3.4 ANÁLOGO ELÉTRICO EQUIVALENTE

Podemos representar cada braço de aço da culatra por uma relutância (R_l até R_8), o entreferro variável por uma relutância R_g , os entreferros construtivos por R_{g1} até R_{g4} , e o ímã permanente com o circuito interno já apresentado anteriormente descrito por F_m e R_m . O HEV apresenta quatro entreferros construtivos: um em cada cobertura de níquel nos pólos como se pode apreciar na Figura 58 e dois no braço móvel central, sendo estes últimos necessários à movimentação daquele braço.

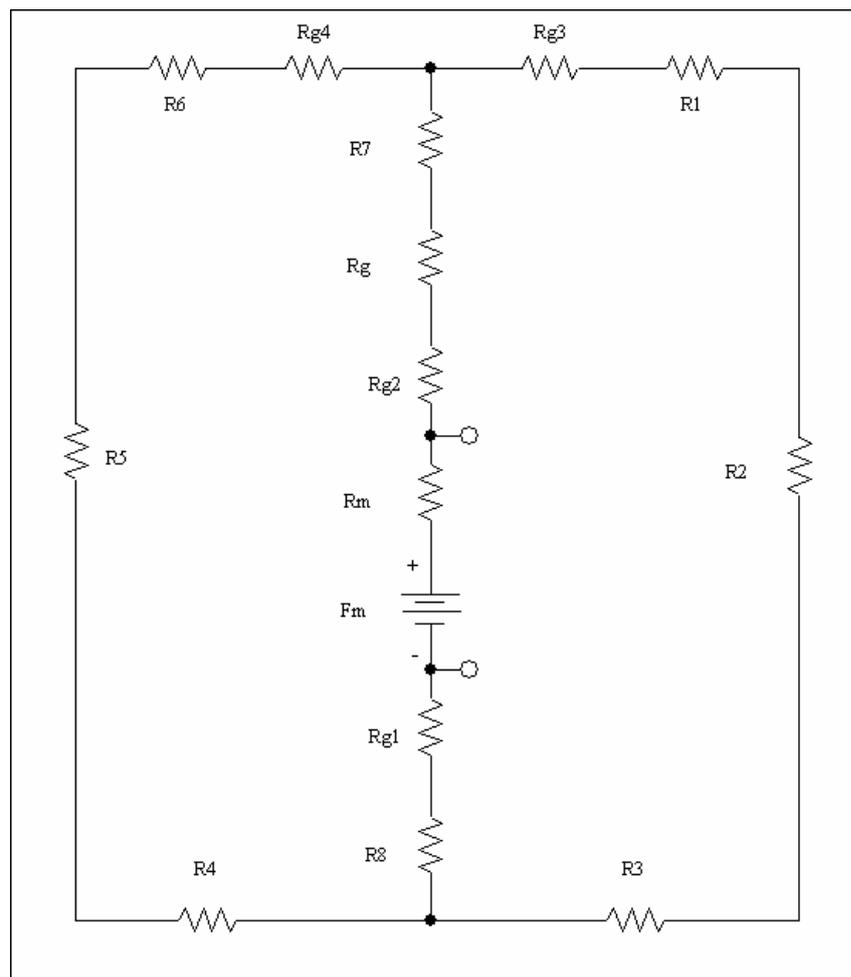


Figura 63. Circuito elétrico equivalente aproximado do HEV.

As relutâncias da culatra podem agrupar-se da seguinte maneira:

$$R_d = R_1 + R_2 + R_3 + R_{g3} \quad R_i = R_4 + R_5 + R_6 + R_{g4} \quad R_c = R_7 + R_8 + R_{g1} + R_{g2} \quad (76)$$

$$R_{id} = \frac{R_i R_d}{R_i + R_d} \quad R_{cid} = R_c + R_{id} = R_c + \frac{R_i R_d}{R_i + R_d} \quad (77)$$

$$R_{cid} = R_{g1} + R_{g2} + R_7 + R_8 + \frac{(R_1 + R_2 + R_3 + R_{g3})(R_4 + R_5 + R_6 + R_{g4})}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 + R_{g3} + R_{g4}} \quad (78)$$

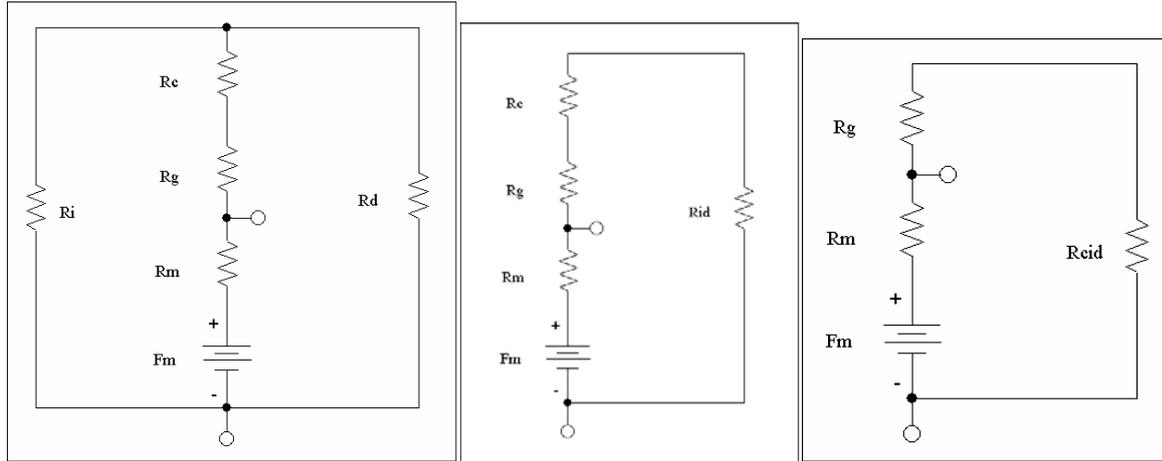


Figura 64. Circuitos elétricos equivalentes com reagrupamento de relutâncias.

As relutâncias R_1 até R_8 das equações anteriores poderiam ser calculadas como

$$R_{Fe} = \frac{L_{Fe}}{\mu_{Fe} A_{Fe}} \quad (79)$$

onde L_{Fe} é o comprimento médio de cada porção da culatra, μ_{Fe} é a permeabilidade do aço considerado e A_{Fe} é a secção da culatra. Mas quanto às relutâncias R_{g1} até R_{g4} não temos maneira de obtê-las simplesmente, desconhecendo seus comprimentos e seções associadas.

3.5 OBTENÇÃO DA CARACTERÍSTICA DESMAGNETIZANTE DO ÍMÃ PERMANENTE

Lembrando a equação obtida para a reta de carga do ímã permanente no capítulo anterior

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{L_f C_f}{K_2} \right) \quad (80)$$

e supondo que é possível obter B_m com uma medição feita no centro do ímã para cada entreferro proposto, teríamos o H_m correspondente a essa medição como:

$$H_m = -\frac{B_m}{\mu_0} \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \left(\frac{K_2}{L_f C_f} \right) \text{ em A/m} \quad \text{ou} \quad \mu_0 H_m = -B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \left(\frac{K_2}{L_f C_f} \right) \text{ em T} \quad (81)$$

Já foi mencionado que com a utilização da sonda de efeito Hall de espessura de 1 mm, o l_g não poderia ser menor, portanto este limite é o mínimo entreferro adotado de medição. A fim de compatibilizar as experiências com as simulações foram feitas medições cada 0,5 mm. No outro extremo, de máxima abertura, confluem alguns aspectos que estabelecem uma situação de compromisso como: uma abertura crescente produz uma maior perda por fluxo disperso, a determinação do H_c por extrapolação poderia ocasionar erros elevados. Finalmente, adotou-se a faixa disponível no relógio comparador de 5,5 mm, e com este entreferro é suficiente para levar aos ímãs mais potentes aproximadamente ao ponto de máximo produto energético, ou seja, metade da excursão da característica de desmagnetização.

Teremos assim um par de valores (H_m, B_m) para cada entreferro (10 valores para uma faixa de 1 mm até 5,5 mm mudando de 0,5 mm). Esses pares de valores conformarão uma característica desmagnetizante obtida por regressão linear. O fator K_2 contempla as quedas magnéticas no aço e nos entreferros construtivos, e equivale a incrementar o entreferro efetivo. Os fatores L_f e C_f contemplam os aspectos de fluxo disperso e de franjamento, o que equivale a incrementar a área efetiva do entreferro variável.

Embora seja possível estimar as quedas magnéticas no aço e do fluxo disperso no entreferro mediante medições sobre o ímã e sobre a superfície oposta do entreferro, é quase impossível estimar as quedas nos entreferros construtivos. A estratégia adotada para obter uma aproximação destes fatores é agrupando-os em um fator só, obtido das medições no HEV com um ímã padrão e obtendo o valor deste fator de calibração para cada entreferro. Vamos chamar de K_c a este fator de calibração e aplicar à equação (80).

$$\frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) \left(\frac{L_f C_f}{K_2} \right) = -\mu_0 \left(\frac{l_m}{l_g} \right) K_c \quad \text{ou} \quad \mu_0 H_m = -B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \frac{1}{K_c} \quad (82)$$

onde

$$K_c = \frac{L_f C_f}{K_2} \quad (83)$$

é o fator de perdas do HEV.

Conhecendo do ímã permanente padrão de NdFeB que $B_m = \mu_0 \mu_r H_m + B_r$, podemos escrever:

$$B_m = -\mu_r B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \frac{1}{K_c} + B_r \Rightarrow K_c = \frac{\mu_r l_g B_m}{l_m (B_r - B_m)} \quad (84)$$

Na rotina de medição no HEV descrevem-se os passos para determinar o fator K_c e os parâmetros do ímã permanente.

3.6 ROTINA DE MEDIÇÃO NO HEV

A seguir descrevem-se os passos seguidos para a determinação dos parâmetros característicos de um ímã permanente, começando pela determinação da densidade de fluxo das diferentes medições com diferentes entreferros e posições do ímã no HEV. Os passos um a um são apresentados em detalhe e a seguir sintetizados em diagrama de blocos, Figura 66, 67 e 68:

1. Abertura do entreferro numa extensão maior que a espessura do ímã permanente (12 a 13 mm dependendo do ímã). Ação realizada liberando primeiro a porca inferior de feche e a seguir, girando em sentido horário a porca de abertura;
2. Inserção do ímã no entreferro do HEV, no que chamamos posição 1 no sentido da magnetização, Figura 65;
3. É preciso aproveitar a abertura máxima para adequar a sonda e o suporte numa altura e orientação adequada; é também o momento de inserir o gabarito e marcar a posição do suporte da sonda numa folha milimetrada; uma vez isso feito retiramos a sonda, o gabarito e o suporte;
4. Descemos o braço central até encostar sobre o ímã permanente fazendo o zero mecânico do relógio comparador. Para fazer isto liberamos primeiro a porca de abertura e logo giramos a porca de fechamento em sentido anti-horário. Para evitar danificar o ímã permanente se leva o dispositivo de ajuste até uma posição em que não se aprecia retorno da agulha do relógio comparador, quando se libera o mecanismo de fechamento (girando meia volta em sentido horário)

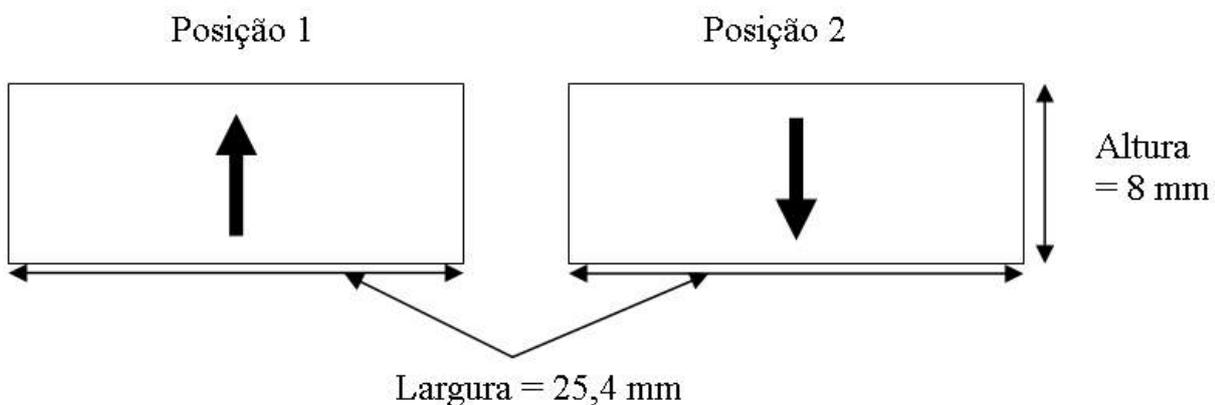


Figura 65. Posicionamento do ímã permanente nas medições no HEV, as setas indicam o sentido da magnetização.

5. Com o mecanismo de abertura levamos o entreferro até 1 mm de leitura no relógio comparador;
6. Fazemos o zero do gaussímetro com o dispositivo provido pelo seu fabricante;
7. Inserimos a sonda com seu dispositivo de suporte, novamente inserimos o gabarito e checamos a posição do suporte com a marca feita no passo 3. Visualmente checamos que a sonda encoste no ímã permanente;
8. Lemos e registramos a indicação do gaussímetro para o entreferro atual;
9. Liberamos a porca de fechamento em sentido horário e abrimos o entreferro com a porca de abertura 0,5 mm na leitura do relógio comparador;

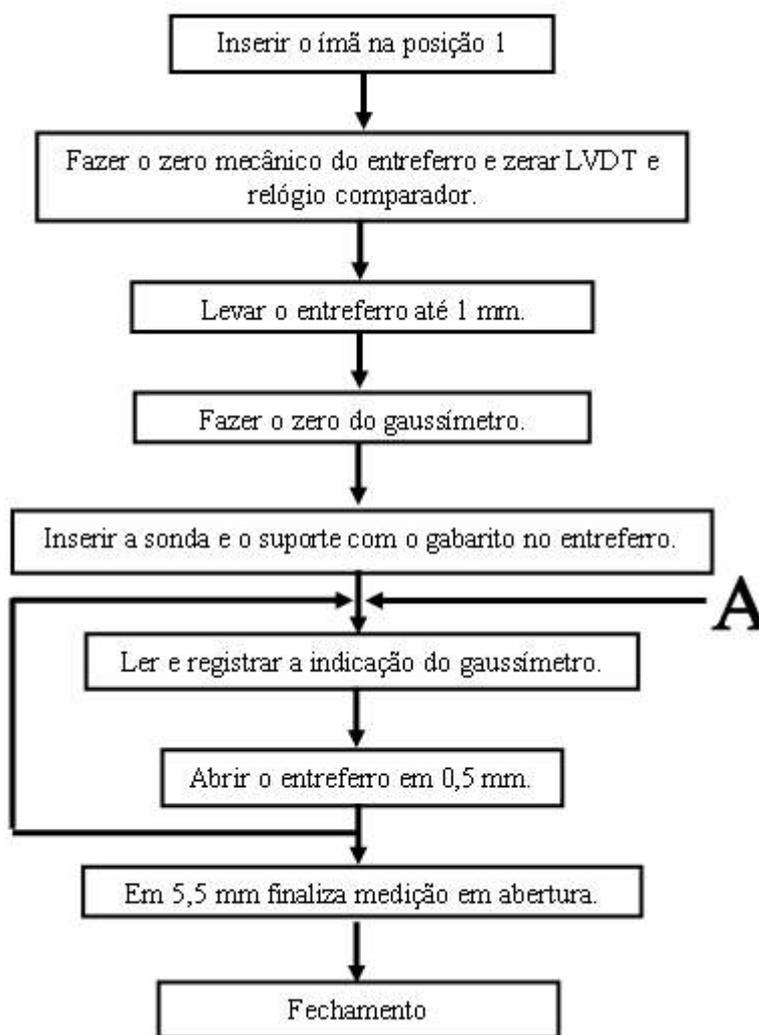


Figura 66. Diagrama de blocos da medição de densidade de fluxo em abertura (continua na Figura 67).

10. Os passos 8 e 9 se repetem até a máxima abertura de 5,5 mm no entreferro;

11. Liberamos a porca de abertura e fechamos o entreferro 0,5 mm;
12. Lemos e registramos a indicação do gaussímetro para o entreferro atual;

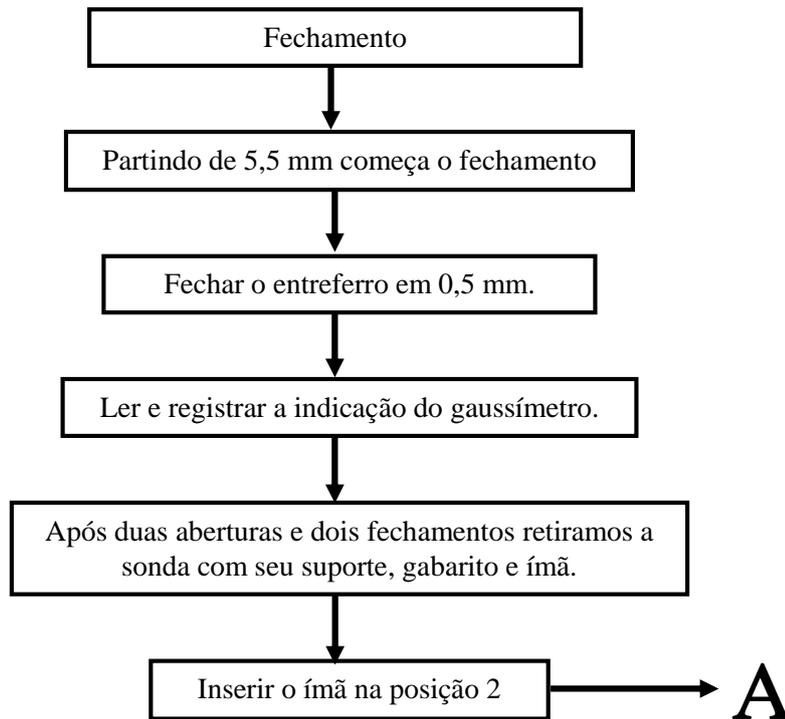


Figura 67. Diagrama de blocos da medição de densidade de fluxo em fechamento (é continuação da Figura 66).

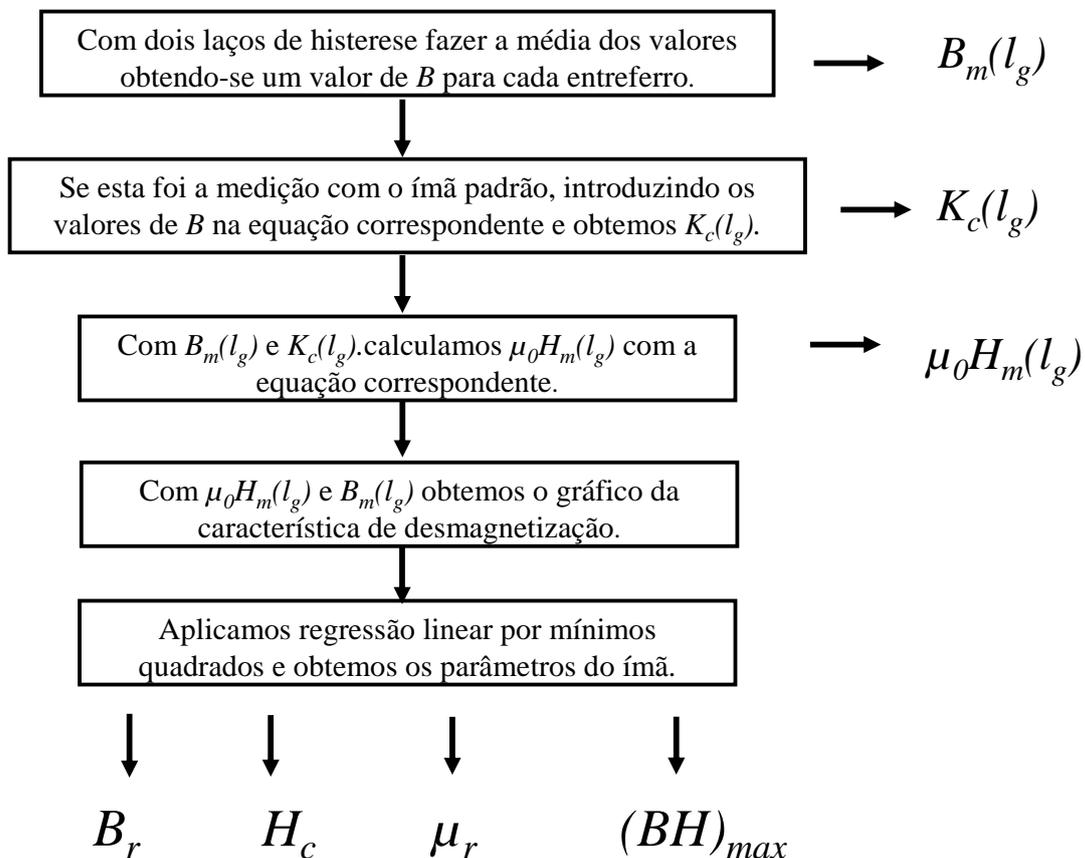


Figura 68. Diagrama de blocos da determinação dos parâmetros do ímã.

13. Os passos 11 e 12 se repetem até o mínimo entreferro de 1 mm;
14. Para ter suficientes dados estatísticos, é recomendável fazer um mínimo de duas aberturas e dois fechamentos repetindo os passos 8 a 13;
15. Retiramos a sonda, o gabarito e o suporte, e logo retiramos também o ímã permanente;
16. Checamos que o zero de gaussímetro longe do HEV permaneça inalterado;
17. Inserimos agora o ímã permanente na posição 2, ou seja, com sua direção de magnetização invertida em relação àquela testada anteriormente. Desta maneira é possível cancelar as assimetrias do ímã permanente e do HEV;
18. Repetimos os passos 6 até 16;
19. Temos agora no mínimo dois laços de histerese do ímã permanente com os quais fazemos a média dos valores de B_m registrados na posição 1 e na posição 2;
20. Com os valores de densidade de fluxo do ímã permanente calcula-se agora os correspondentes valores $\mu_0 H_m = -B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \frac{1}{K_c}$ da equação (81) com o fator de perdas K_c achado para o ímã permanente padrão;
21. Com os pares de valores $\mu_0 H_m$ e B_m achados fazemos um gráfico da característica de desmagnetização e aplicando regressão linear por quadrados mínimos achamos a melhor expressão linear $y = mx + b$ para a característica de segundo quadrante do ímã permanente medido.

Desta expressão tiramos os principais parâmetros: B_r , a densidade de fluxo de remanência é o valor de intersecção com o eixo de ordenadas igual ao b da expressão, μ_r a permeabilidade de retorno é a inclinação na expressão igual ao m e a coercitividade normal, por ser a intersecção com o eixo das abscissas, pode ser computada fazendo-se $y = 0$, ou seja, $H_c = B_r / \mu_r$.

3.7 DETERMINAÇÃO DO K_c

Mediante a rotina de medição e com o ímã padrão adotado fazemos as medições e obtemos as primeiras leituras de densidade de fluxo mostradas na Tabela 9, onde o primeiro sub-índice é do ímã número 1, o segundo sub-índice é a posição, a letra A de abertura, F de fechamento e o número que acompanha é o índice de quantidade de aberturas ou fechamentos. Por exemplo B_{11A2} é a densidade de fluxo do ímã 1 na posição 1 na segunda abertura.

Tabela 9. Medição de B no ímã padrão na posição 1.

$l_g(\text{mm})$	$B_{11A1}(\text{T})$	$B_{11F1}(\text{T})$	$B_{11A2}(\text{T})$	$B_{11F2}(\text{T})$	$B_{11av}(\text{T})$
1	1,073	1,072	1,072	1,072	1,072
1,5	1,013	1,006	1,009	1,006	1,008
2	0,958	0,951	0,958	0,953	0,956
2,5	0,908	0,901	0,907	0,901	0,904
3	0,864	0,856	0,864	0,856	0,860
3,5	0,822	0,818	0,824	0,820	0,822
4	0,782	0,778	0,782	0,779	0,781
4,5	0,748	0,746	0,750	0,747	0,749
5	0,718	0,717	0,719	0,717	0,718
5,5	0,693	0,693	0,695	0,695	0,695

Fazemos agora as medições com o ímã permanente invertido e obtemos os resultados da Tabela 10.

Tabela 10. Medições de B no ímã padrão na posição 2.

$l_g(\text{mm})$	$B_{12A1}(\text{T})$	$B_{12F1}(\text{T})$	$B_{12A2}(\text{T})$	$B_{12F2}(\text{T})$	$B_{12av}(\text{T})$
1	-1,096	-1,081	-1,081	-1,080	-1,081
1,5	-1,030	-1,016	-1,021	-1,016	-1,019
2	-0,979	-0,967	-0,969	-0,965	-0,967
2,5	-0,919	-0,910	-0,917	-0,910	-0,914
3	-0,878	-0,866	-0,874	-0,866	-0,870
3,5	-0,836	-0,826	-0,831	-0,827	-0,829
4	-0,795	-0,786	-0,791	-0,786	-0,789
4,5	-0,764	-0,759	-0,759	-0,758	-0,759
5	-0,730	-0,725	-0,730	-0,725	-0,728
5,5	-0,705	-0,705	-0,704	-0,704	-0,704

Dos resultados das tabelas anteriores podemos calcular as densidades de fluxo para o HEV com o ímã permanente na posição 1 e na posição 2. Para obter finalmente as densidades de fluxo definitivas para o ímã permanente 1 usado como padrão faremos o valor médio dos resultados obtendo então a Tabela 11. Tanto B_{11av} como B_{12av} foram calculadas do último laço de histerese. Finalmente, B_{1av} é resultado da média dos resultados das medições na posição 1 e 2.

Tabela 11. Valores finais de densidade de fluxo do ímã permanente 1.

$l_g(\text{mm})$	$B_{11av}(\text{T})$	$B_{12av}(\text{T})$	$B_{1av}(\text{T})$
1	1,072	-1,081	1,076
1,5	1,008	-1,019	1,013
2	0,956	-0,967	0,961
2,5	0,904	-0,914	0,909
3	0,860	-0,870	0,865
3,5	0,822	-0,829	0,826
4	0,781	-0,789	0,785
4,5	0,749	-0,759	0,754
5	0,718	-0,728	0,723
5,5	0,695	-0,704	0,700

Utilizamos agora a equação (84) onde $K_c = \frac{\mu_{rec1} l_g B_{1av}}{l_m (B_{r1} - B_{1av})}$ e calculamos para cada entreferro o valor correspondente obtendo a Tabela 12.

Tabela 12. Obtenção do fator K_c do HEV.

$l_g(\text{mm})$	$B_{1av}(\text{T})$	K_c
1	1,076	1,004
1,5	1,013	0,982
2	0,961	0,993
2,5	0,909	0,975
3	0,865	0,976
3,5	0,826	0,977
4	0,785	0,961
4,5	0,754	0,970
5	0,723	0,969
5,5	0,700	0,986

É possível observar dos valores adotados por K_c que, neste protótipo HEV, as perdas por fluxo disperso são aproximadamente balanceadas pela combinação das perdas nos entreferros construtivos e as quedas magnéticas no aço.

3.8 ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DO HEV

O HEV foi desenvolvido pensando em aproveitar as características eminentemente lineares de desmagnetização dos ímãs permanentes duros. É assim que a primeira especificação e limitação é que o HEV trabalha com ímãs permanentes de Terras Raras ou cerâmicos.

A segunda especificação é que, para limitar ao máximo o fluxo disperso e o franjamento, os cabeçotes foram feitos no formato de tronco de cone e compatíveis com a medida de um tipo de ímã específico de 25,4 mm x 25,4 mm. Sabendo que o máximo B de remanência dos ímãs de Terras Raras é em torno de 1,2 T, foi escolhido um aço adequado (1020) com uma secção tentativa de 40 mm x 40 mm de maneira de permitir testes com diferentes dimensões de ímãs (modificando o cabeçote). A elevada permeabilidade do aço escolhido (maior de 4000 considerando que ele trabalharia sempre com entreferro de 1 mm ou mais) permite considerar quedas magnéticas muito baixas e o ponto de operação sempre ficará abaixo do ponto de saturação.

As medições iniciais de deslocamento do entreferro foram feitas com o relógio comparador e LVDT, ambos com resolução de 0,01 mm, e a densidade de fluxo magnético com gaussímetro de 1% de exatidão e resolução de 1 mT.



Figura 69. Configuração de medição da densidade de fluxo no entreferro.

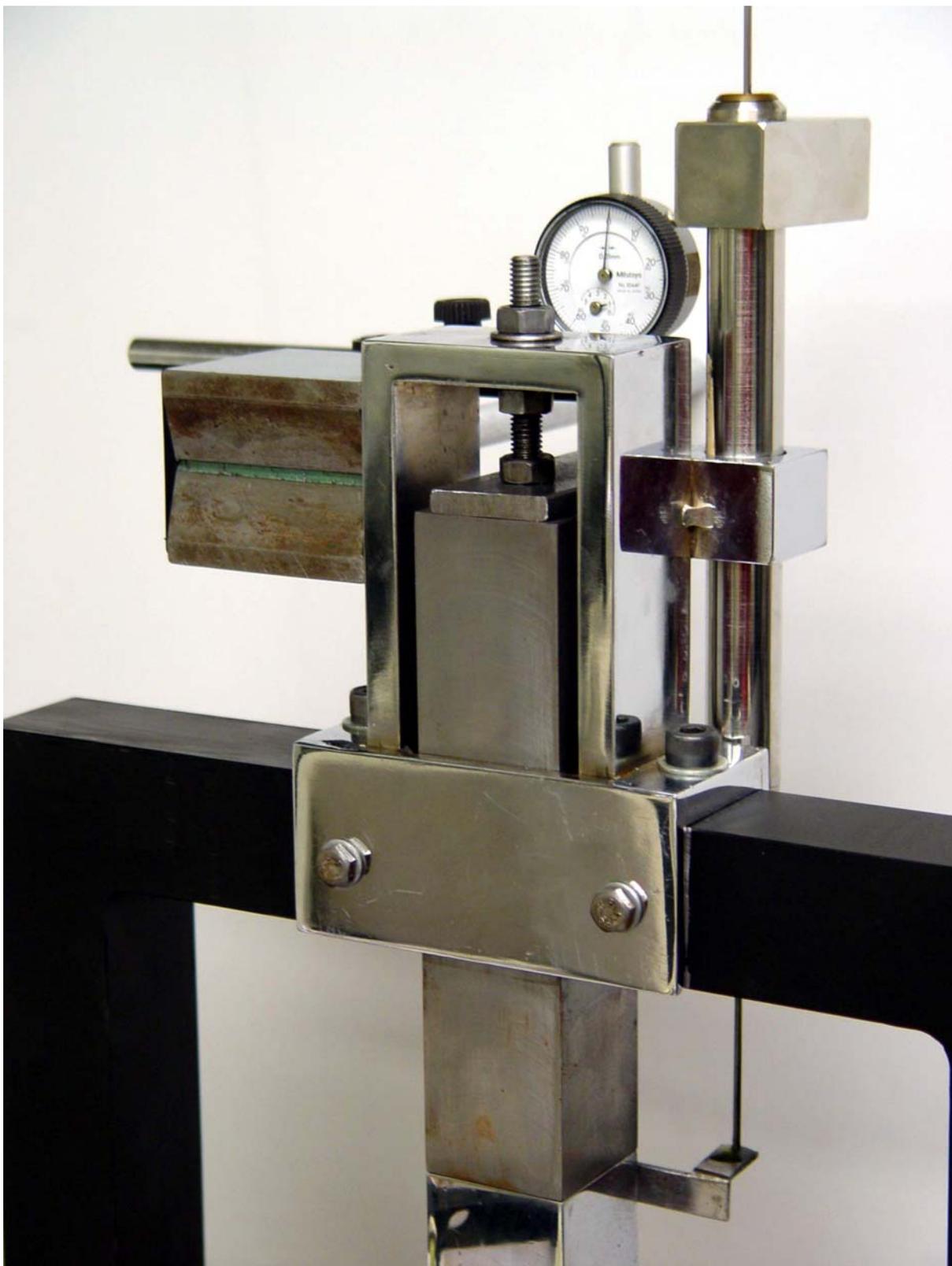


Figura 70. Detalhe do sistema de abertura e fechamento do entreferro do HEV.

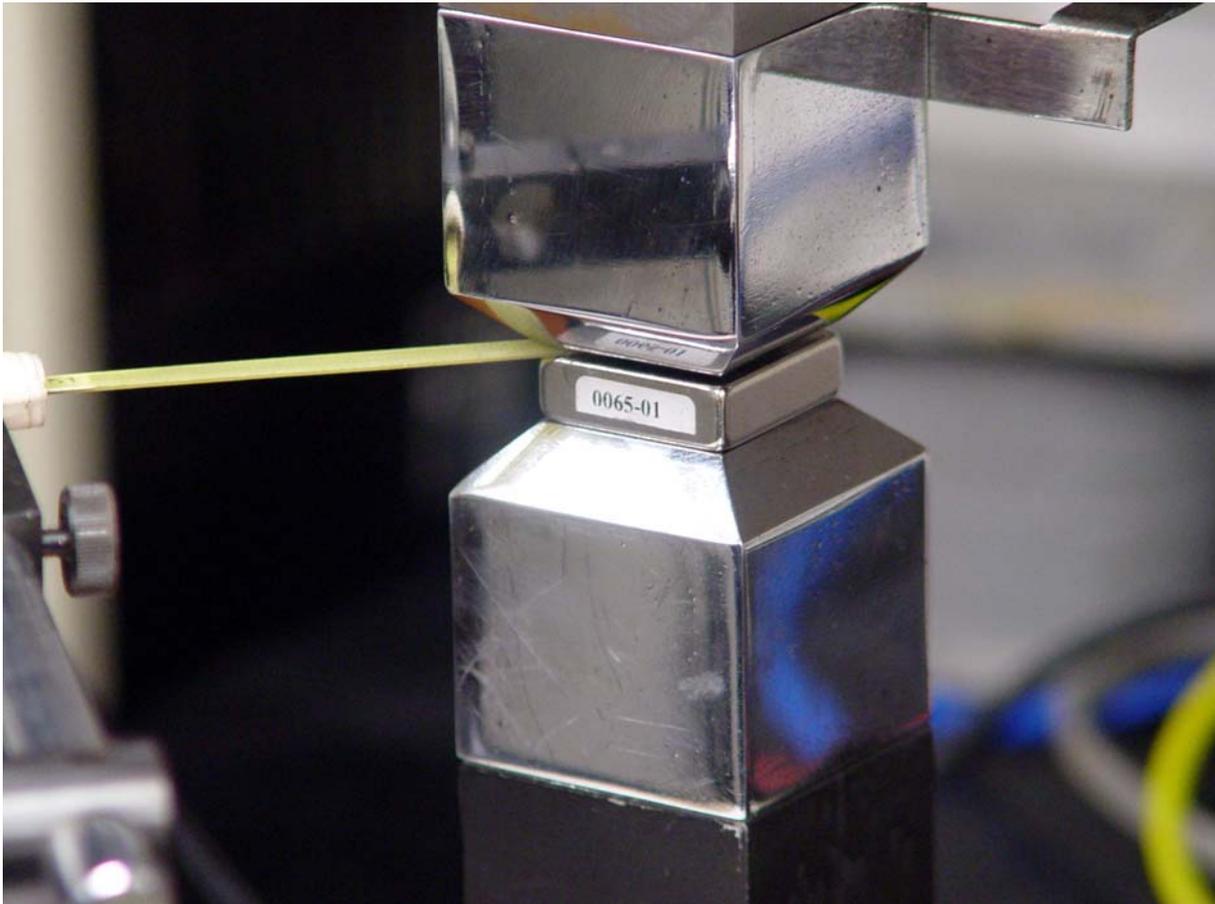


Figura 71. Detalhe do entreferro com o ímã permanente de NdFeB em posição de mínimo entreferro.

4 SIMULAÇÕES

4.1 INTRODUÇÃO

Para analisar o desempenho dos dispositivos eletromagnéticos é importante ter um conhecimento detalhado da distribuição do campo. Isto é particularmente verdade nos casos de geometrias complexas, de distribuição volumétrica do campo magnético, na presença de meios magnéticos com propriedades diversas e não linearidades, na existência de espriamento e dispersão de fluxo magnético.

As equações básicas que governam os dispositivos são representadas pelas equações de Maxwell. A complexidade que surge da geometria e das propriedades não lineares do material magnético faz com que seja às vezes difícil encontrar a solução exata ou analítica das equações diferenciais resultantes da modelagem. No entanto, os métodos de aproximação numérica como diferenças finitas, elementos finitos e outros permitem uma solução conveniente. Dos métodos de análise numérica disponíveis para resolução de equações de campo eletromagnético, o método de elementos finitos alcançou proeminência (GUPTA, 1990). É com base nele que serão feitas as simulações para modelagem da distribuição de campo magnético abordadas neste trabalho. Desta forma, tem-se o modelo de simulação como elemento auxiliar de análise e de realimentação ao processo de projeto do dispositivo.

4.2 O MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Os problemas com valores de contorno formulados por equações diferenciais parciais apropriadas podem ser resolvidos seja por procedimento variável ou por 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, 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. Com tudo 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 generalidade é muito utilizado (SALON, 1995).

O método de elementos finitos, *finite element method* ou FEM, é realmente útil no sentido em que se pode obter resultados muito próximos daqueles que se verificam em um protótipo real mas agora através de um protótipo virtual usado na modelagem. Isto permite poupar uma grande quantidade de tempo e dinheiro devido às dificuldades no projeto que podem ser detectadas e retificadas em um estágio prévio à construção do dispositivo. Isto permite deixar de lado a prática de fazer os protótipos reais com base no método de tentativa e erro. A análise FEM também ajuda na seleção do material correto para o projeto ao inserir os seus dados característicos no programa (SHIRAZEE, 1997).

A etapa de pesquisa em 2D é inicialmente importante, pois esta análise informa ao usuário se seu projeto tem possibilidades de funcionar ou não e se requer melhorias. Então se pode continuar com 3D, onde o desenho pode ser totalmente otimizado até as mais altas capacidades.

4.3 PACOTE DE ANÁLISE POR ELEMENTOS FINITOS MEGA

Em (YODER, 1993) temos a seguinte definição de *Ferramentas EDA (Electronic Design Automation Tools)*: uma ferramenta em engenharia é um meio pelo qual se estendem as capacidades de uma pessoa para além do que normalmente pode realizar, ou secundariamente, para diminuir o esforço empregado na resolução de um problema. Em nosso caso particular, o programa de elementos finitos MEGA é esta ferramenta.

O programa MEGA foi desenvolvido na Universidade de Bath como parte de um trabalho de pesquisa no campo da modelagem de dispositivos eletromagnéticos.

O MEGA consiste em dois programas: MEGAVIEW e MEGASOLVE:

- a. O MEGAVIEW é o pré e pós-processador o qual prove ao usuário o ambiente interativo para definir, processar e editar elementos eletromagnéticos;
- b. O MEGASOLVE é o *solver*; já quando o problema está definido com o MEGAVIEW, o solver faz seu trabalho; o arquivo gerado nesta etapa é lido pelo MEGAVIEW para o pós-processamento interativo.

Este programa pode resolver as equações de Maxwell especialmente em baixa frequência, usando o método de elementos finitos para análise estática e transitória.

As seguintes equações são as básicas usadas pelo MEGA na resolução dos problemas:

$$\nabla \times H = J \quad (85)$$

$$\nabla \times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0 \quad (86)$$

$$B = B(H) \quad (87)$$

$$J = \sigma E \quad (88)$$

Como o presente trabalho baseia-se num estudo de um circuito magnético com ímã permanente, apresentam-se as equações básicas do MEGA que são aplicadas:

$$B = \mu_0(\mu_r H + M) \quad (89)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H + B_{rem} \quad (90)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \nabla \times A + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} = J_s + \nabla \times \frac{1}{\mu} B_{rem} \quad (91)$$

4.4 MODELAGEM POR ELEMENTOS FINITOS DO HEV

O primeiro passo no desenho de um modelo é a construção do plano base. Este é de facto uma malha de duas dimensões que é extrudada ao longo da terceira dimensão (eixo z) de forma a se gerar o modelo 3D.

A malha básica pode ser considerada como formada por um conjunto de nós e elementos. As variáveis desconhecidas ou incógnitas são associadas com os nós, e as aproximações numéricas são interpoladas nos elementos. Conclui-se que a malha deveria ser suficientemente fina para modelar o campo flutuante, do contrário poderíamos ter grandes erros nos cálculos. Se o dispositivo é complexo, é difícil estimar o tamanho ótimo de um elemento. Recomenda-se então começar com uma malha grossa e refinar as áreas nas quais o campo tem variações abruptas ou de maior gradiente. Como uma consequência do anterior, é considerado aceitável fazer uma malha cada vez mais esparsa à medida que se afasta da região de interesse.

No caso da modelagem do HEV através de elementos finitos, foram criadas e testadas várias malhas com diferentes níveis de discretização; os resultados foram comparados entre si e com os valores experimentais para determinar a precisão adequada da solução numérica. Finalmente, a malha do plano base usada foi feita com elementos retangulares que permitiram discretizar a culatra toda com elementos de 8 mm por elemento. O braço central foi refinado

com elementos retangulares de 4 mm por elemento e a área do entreferro com o ímã foi refinada até 0,5 mm por elemento. Permitindo desta maneira uma seqüência de medições virtuais com passos de 0,5 mm no entreferro e uma adequada leitura da densidade de fluxo e queda magnética no circuito magnético do HEV simulado.

Sendo que a área lateral do ímã é 8 mm x 25,4 mm, então temos uma densidade de 4 elementos retangulares por mm². O tipo de análise ao qual será submetido o circuito magnético e a resolução com a qual se desejam os resultados são os fatores que permitem, com a devida prática, estabelecer a densidade de elementos adequada. Com o mesmo critério foi estendida a grade regular em 40 mm para a seguir se fazer uma malha com elementos irregulares com áreas que incrementam-se com o afastamento do HEV, Figura 72 e 73.

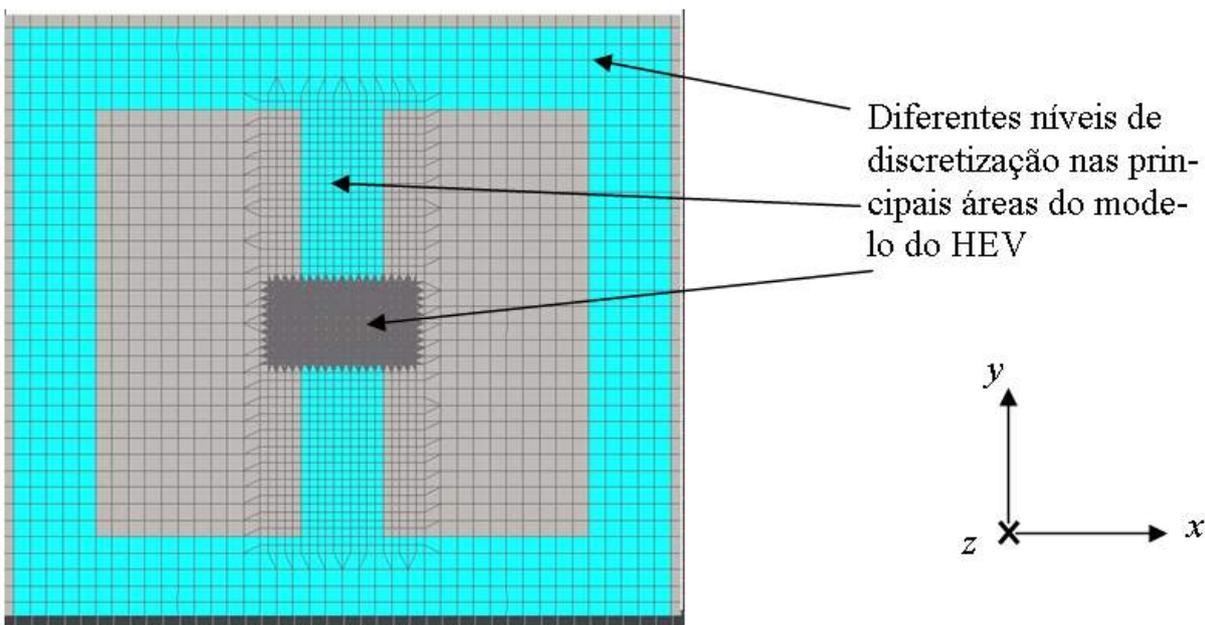


Figura 72. Discretização da malha base do modelo do HEV.

A extensão total da malha é aconselhada ser de 3 a 6 vezes o tamanho do elemento a ser simulado, o HEV neste caso. No entanto, isto não pode ser considerado uma regra rígida, e, como foi dito anteriormente, as características de cada configuração circuital e os resultados da análise estabelecem as pautas de desenho. Foi experimentada uma malha base com extensão total de 3 vezes e os resultados medidos não mudaram; portanto, esta última disposição foi adotada como se pode ver na Figura 73.

Para a obtenção do HEV em 3D foi feita a extrusão em 51 níveis, 11 no ímã permanente, 30 na culatra e 10 fora do HEV, Figura 74.

Após fornecer ao MEGA os dados principais do ímã permanente e da culatra de aço e as condições de contorno, é preciso sair do pré-processador e permitir ao *solver* calcular as equações do sistema em estudo.

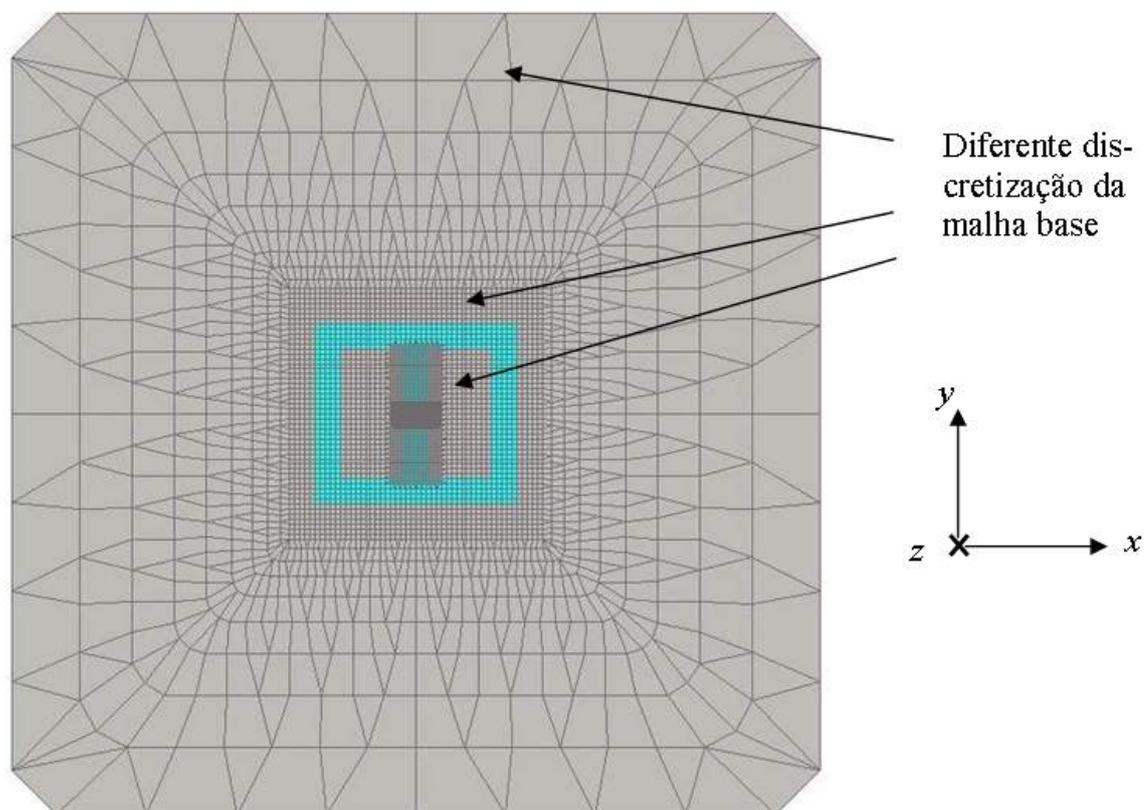


Figura 73. Extensão total da malha base do HEV.

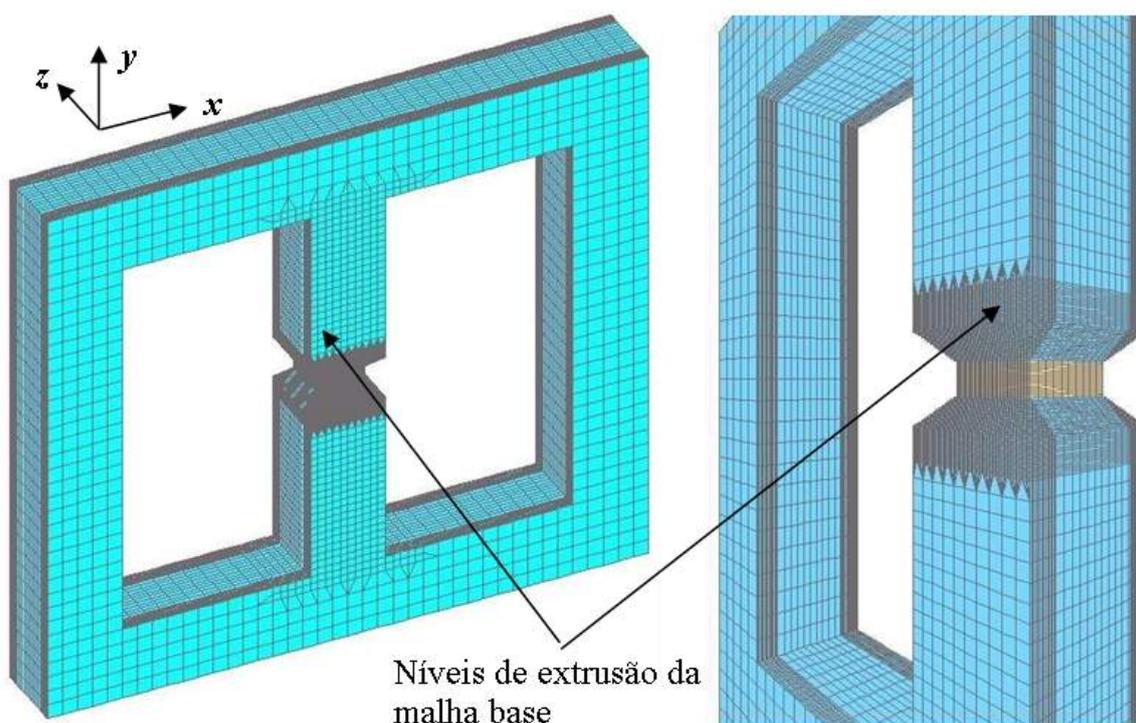


Figura 74. HEV em 3D resultado da extrusão do modelo em 2D mostrado na figura anterior.

4.4.1 Resultados da simulação

O nível de exatidão e o tempo (recursos computacionais) são aspectos que definem uma situação de compromisso na escolha da discretização do modelo: uma malha muito densa pode produzir resultados com muita exatidão, mas demanda mais tempo e memória do computador do que seria conveniente. De forma a comprovar se a discretização adotada para a malha do modelo é adequada, foram construídos modelos com discretização crescente. A partir de certo nível de discretização, os valores das medições virtuais de densidade de fluxo mudarão menos que 0,1% o que permite verificar que o modelo atual tem uma discretização adequada, Tabela 13.

Tabela 13. Resultados para dois diferentes discretizações no modelo do HEV.

	Modelo 1	Modelo 2
Nº total de nós	815745	938043
Nº total de elementos	818000	949800
Nº de nós por nível	15995	18393
Nº de elementos por nível	16360	18996
Numero de níveis	51	51
Numero de equações	815745	938043

Uma outra comprovação a ser feita é em relação aos níveis de densidade de fluxo atingidos na culatra de aço a fim de comprovar a existência ou não de saturação. Ainda que o HEV não trabalhe com entreferro nulo, foi feita a simulação nessa situação em que o ímã permanente fornece aproximadamente a densidade de fluxo de remanência B_r , Figura 75, Figura 76, Figura 77, Figura 78 e Figura 79.

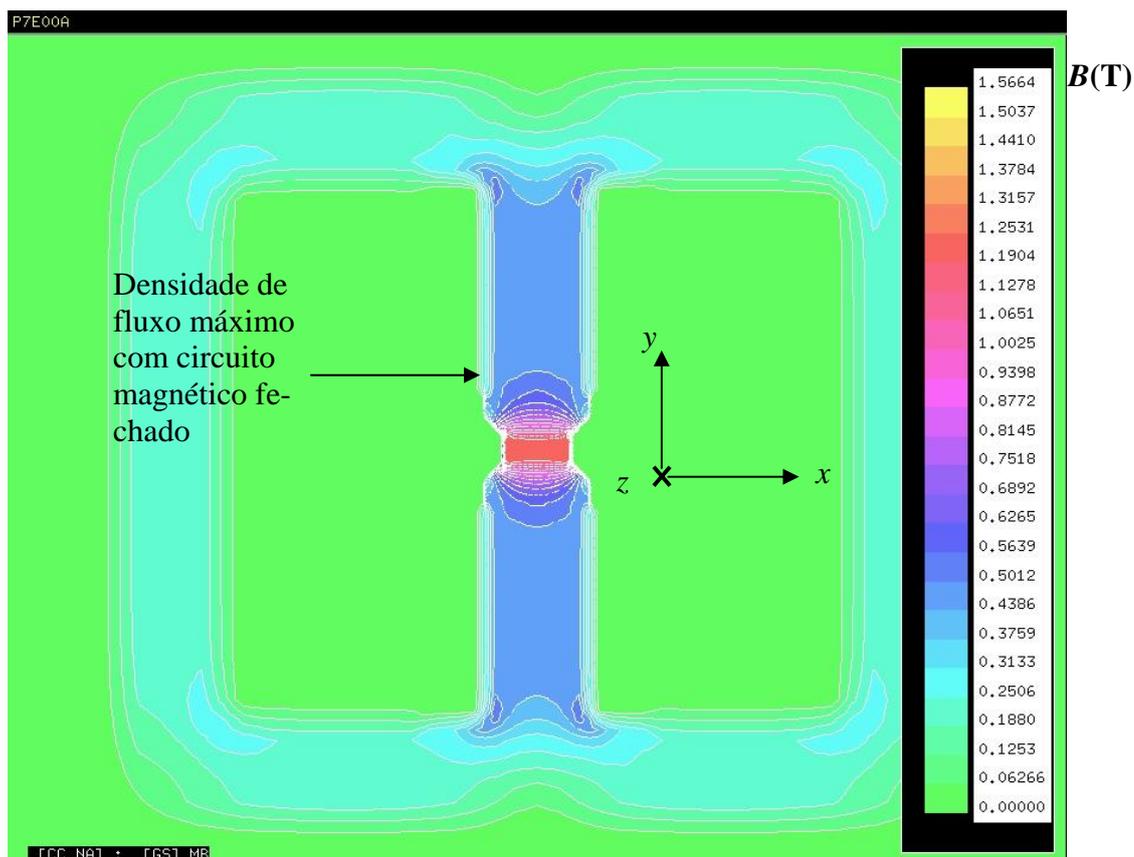


Figura 75. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV sem entreferro.

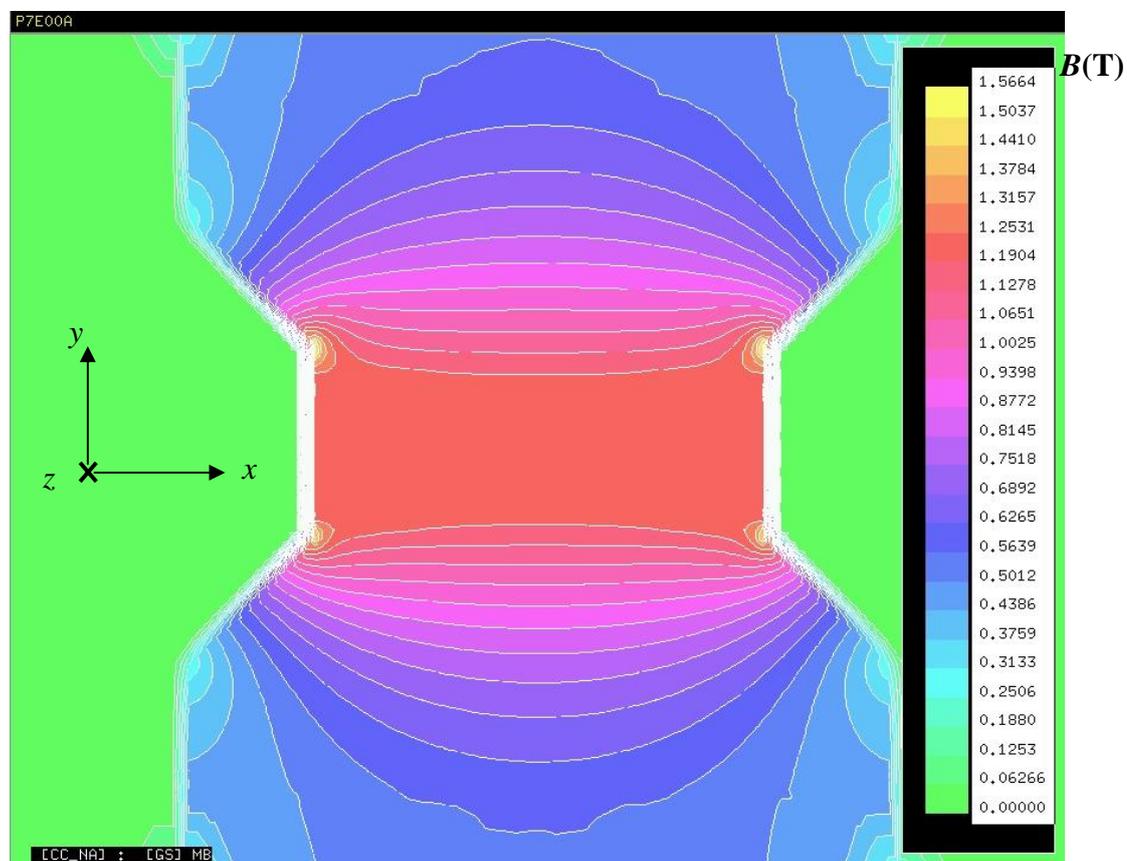


Figura 76. Detalhe do B no centro do HEV onde se encontra o ímã permanente.

P7E00

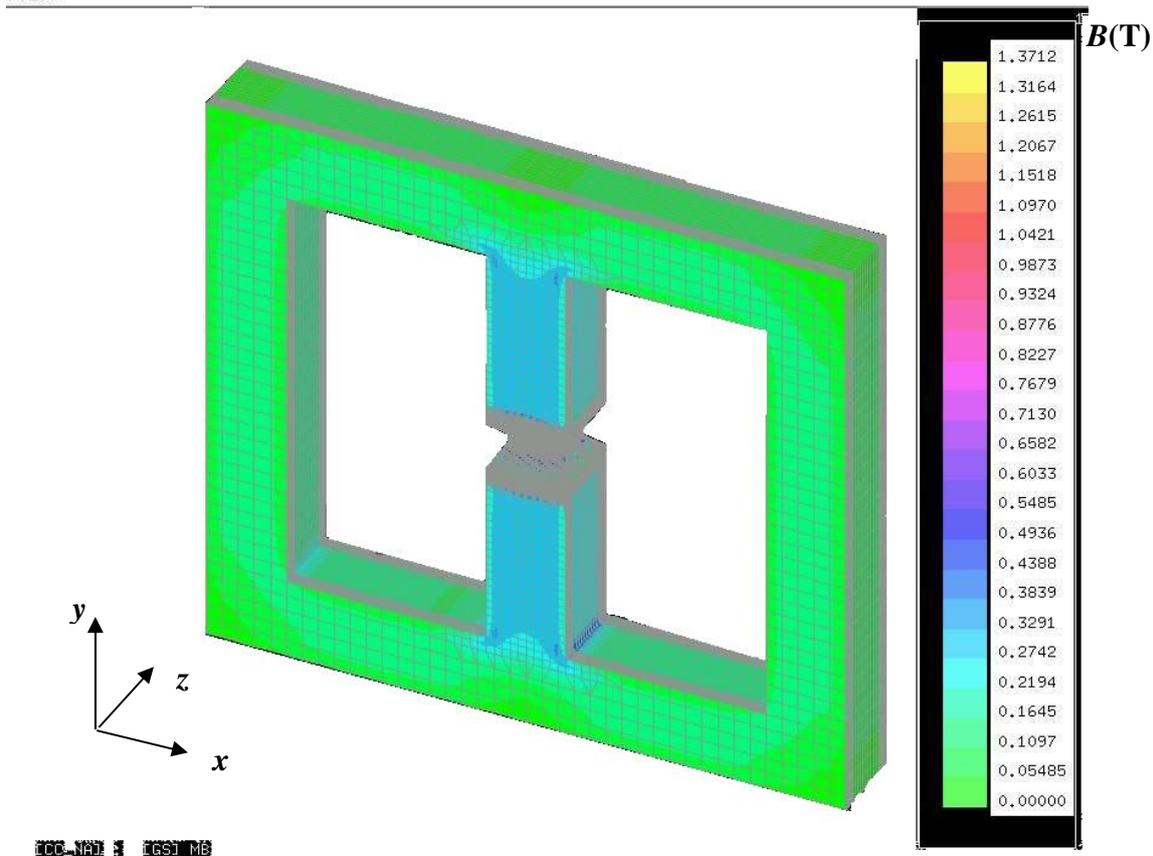


Figura 77. Distribuição do B no HEV sem entreferro em 3D.

P7E00

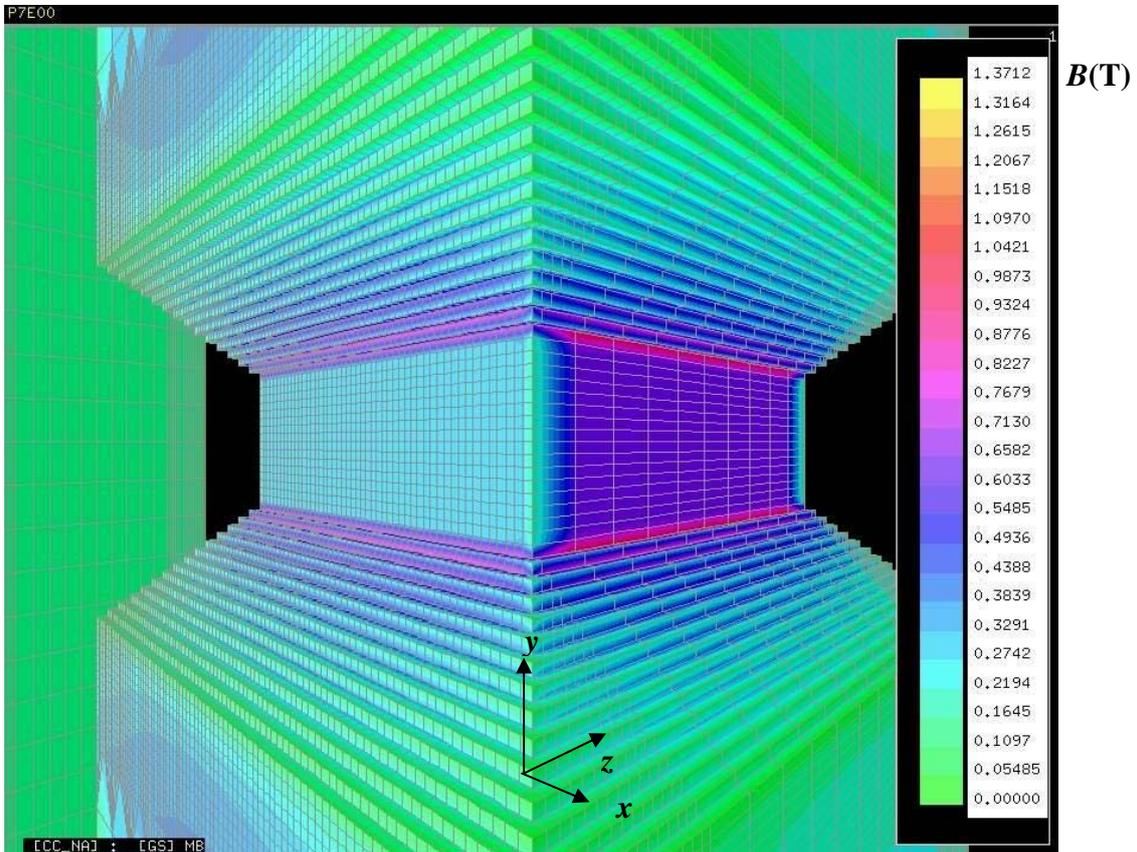


Figura 78. Detalhe em 3D do B no centro do HEV onde se encontra o ímã permanente.

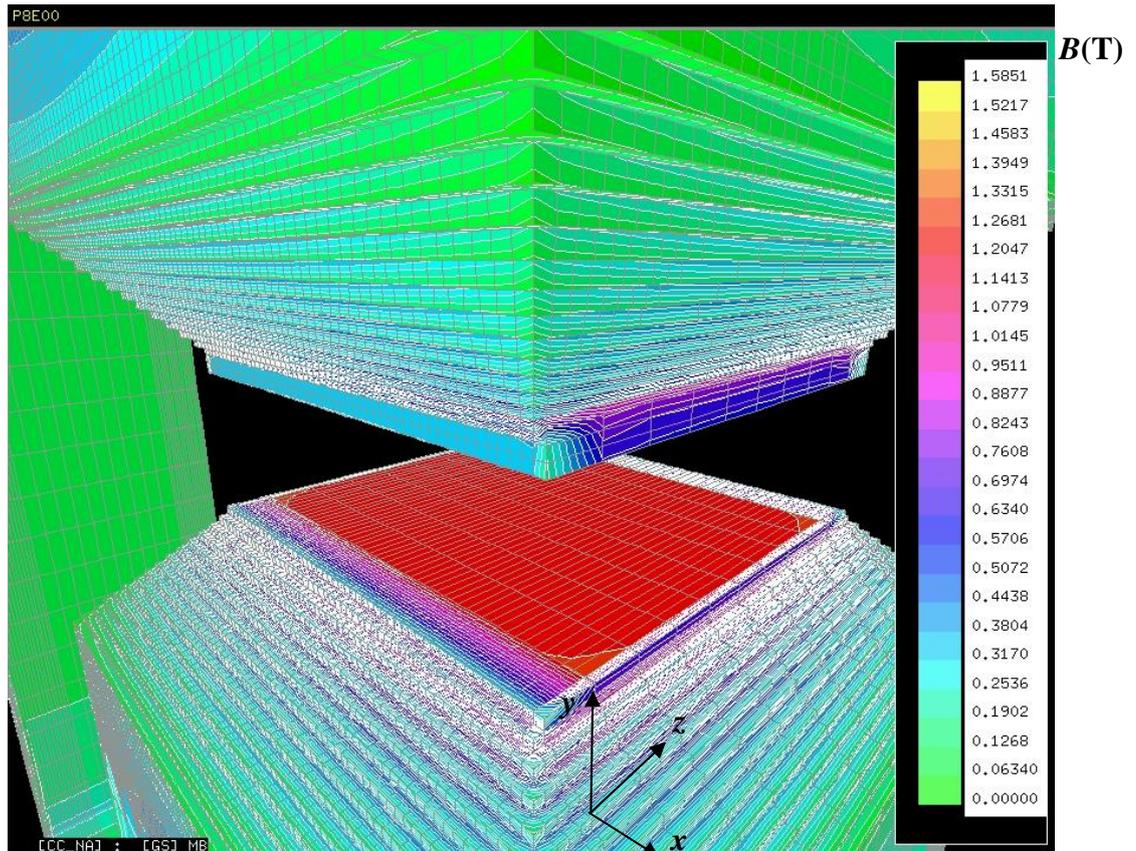


Figura 79. Detalhe em 3D do B no centro do HEV sem o ímã permanente.

Da coloração das zonas críticas que estariam em torno do ímã permanente é possível estimar que o máximo B que existiria sem entreferro poderia alcançar aproximadamente 1,2 T. É um valor inferior ao máximo B de saturação dos aços 1010 – 1020 cuja permeabilidade relativa ficaria em torno de 4000.

Na configuração real de medição, se apresentam os resultados com o menor entreferro possível em que a sonda virtual pode ser inserida, Figura 80, Figura 81, Figura 82, Figura 83 e Figura 84.

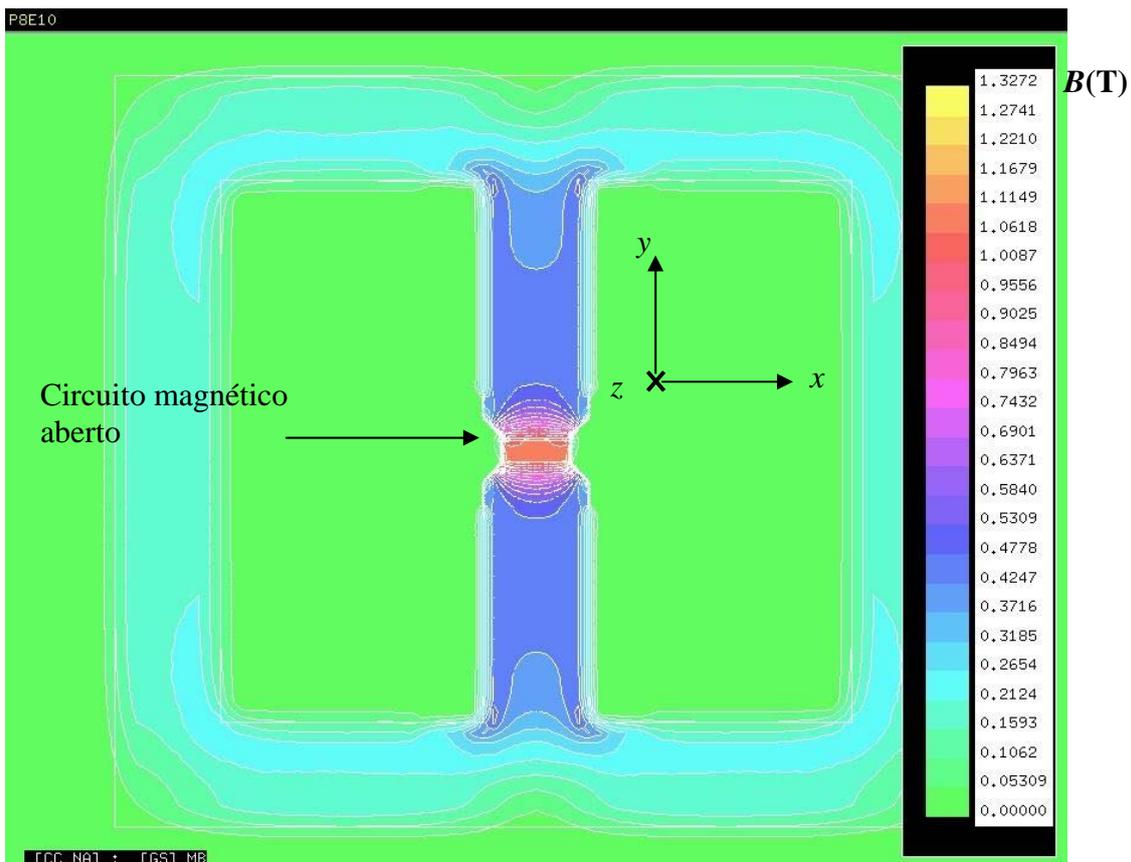


Figura 80. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV com entreferro de 1 mm.

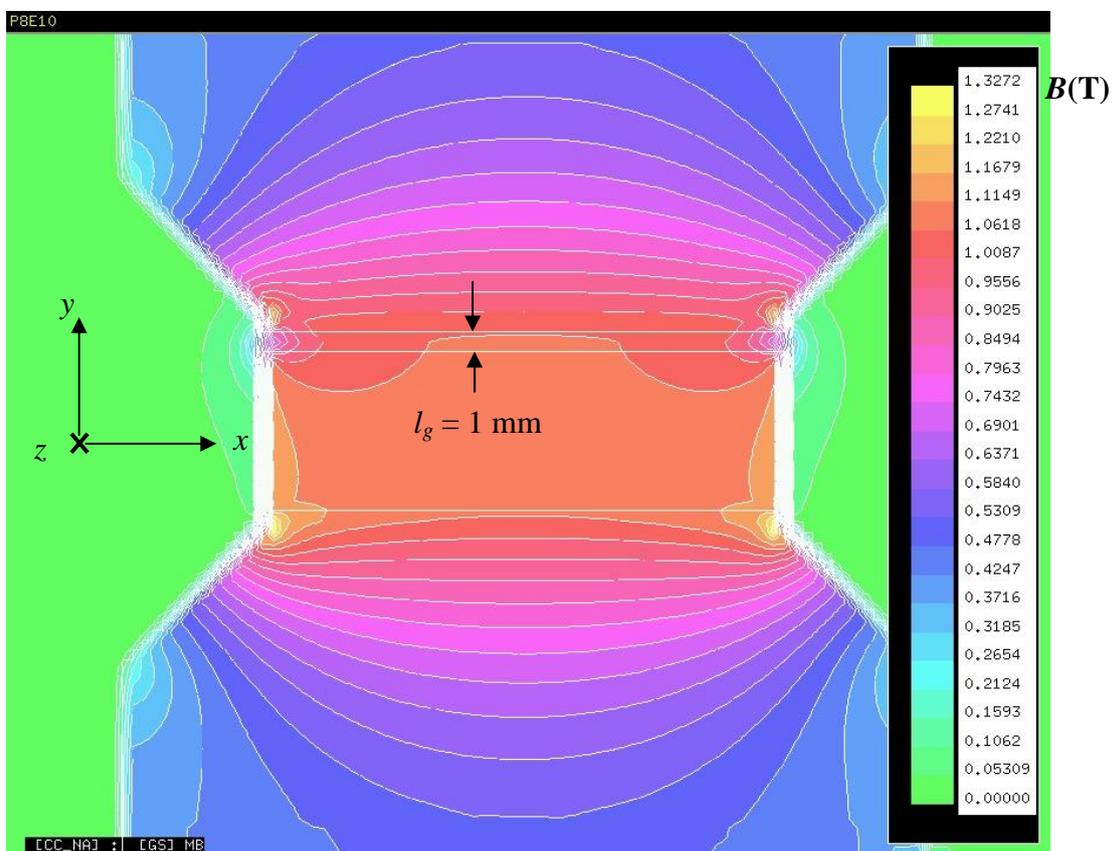


Figura 81. Detalhe do B no centro do HEV com 1 mm de entreferro.

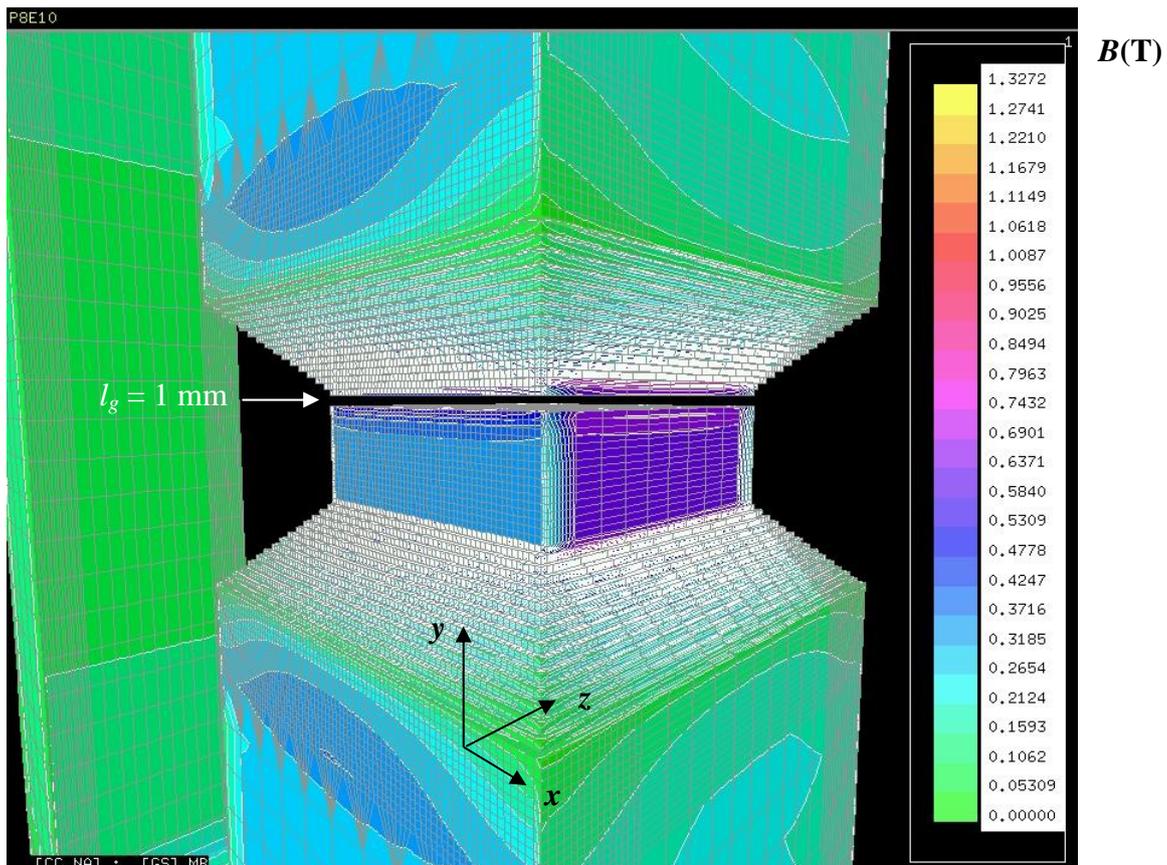


Figura 82. Detalhe em 3D do B no centro do HEV com 1 mm de entreferro.

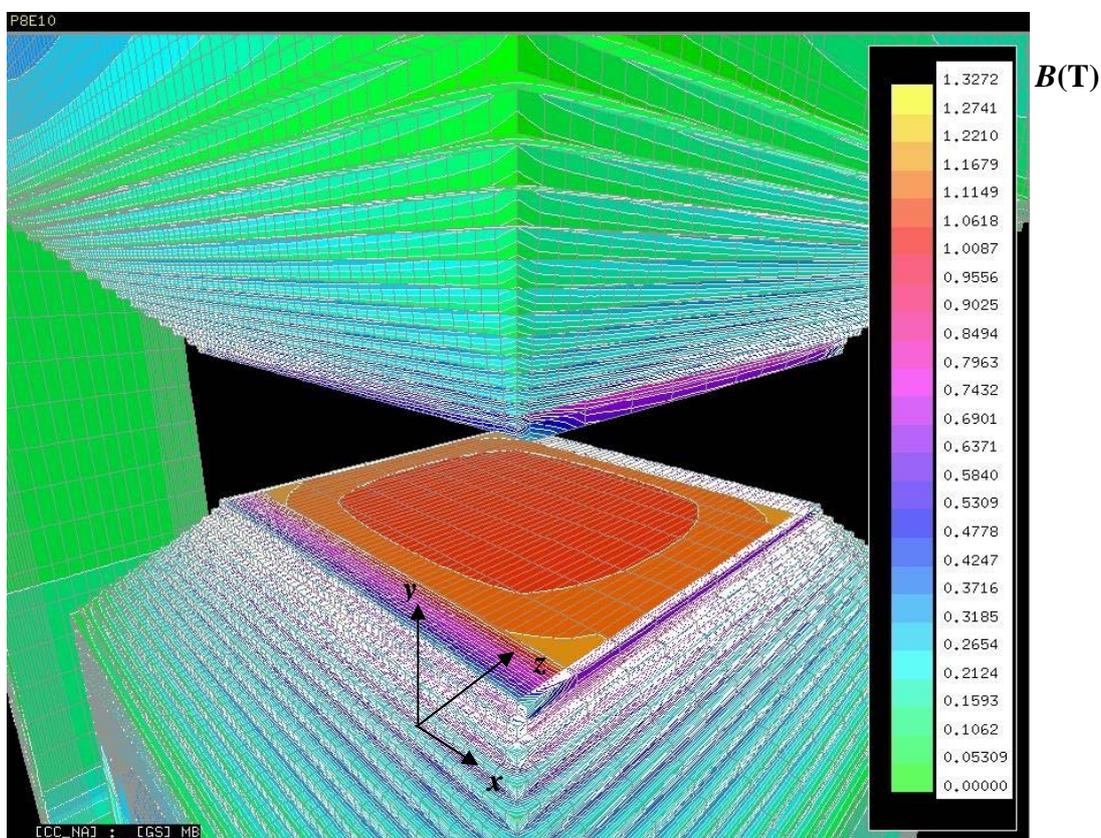


Figura 83. Detalhe em 3D do B no centro do HEV sem o ímã permanente para 1 mm de entreferro.

Na Figura 84 vemos a característica de B em 3D no entreferro de 1 mm.

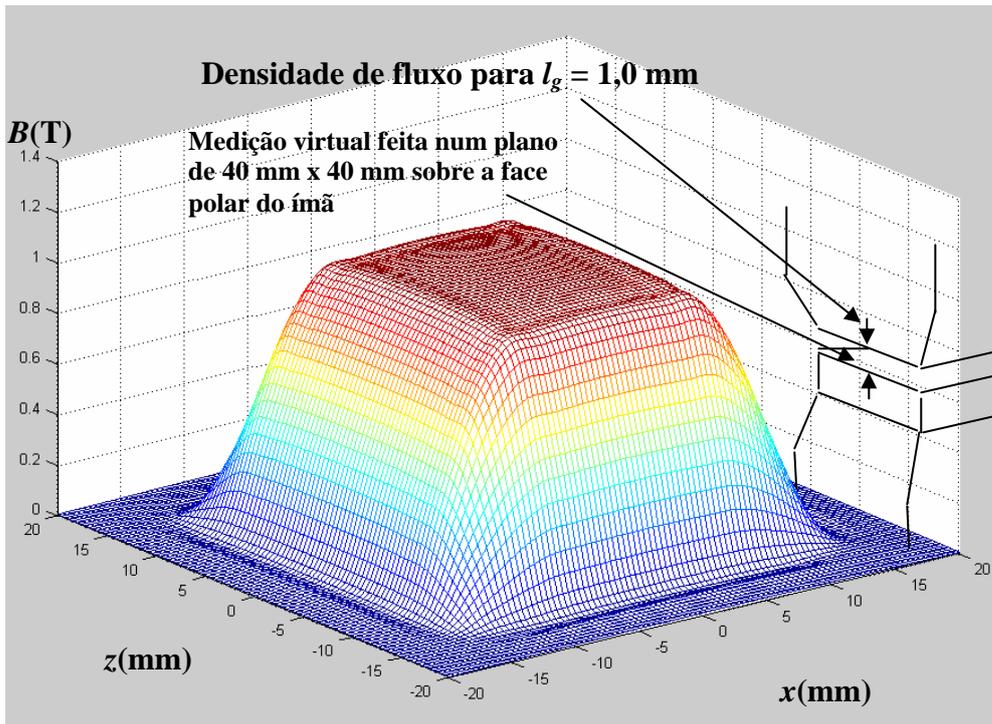


Figura 84. Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de 1 mm.

O maior entreferro ensaiado foi de 5,5 mm e os resultados são apresentados nas Figura 85; Figura 86; Figura 87; Figura 88 e Figura 89.

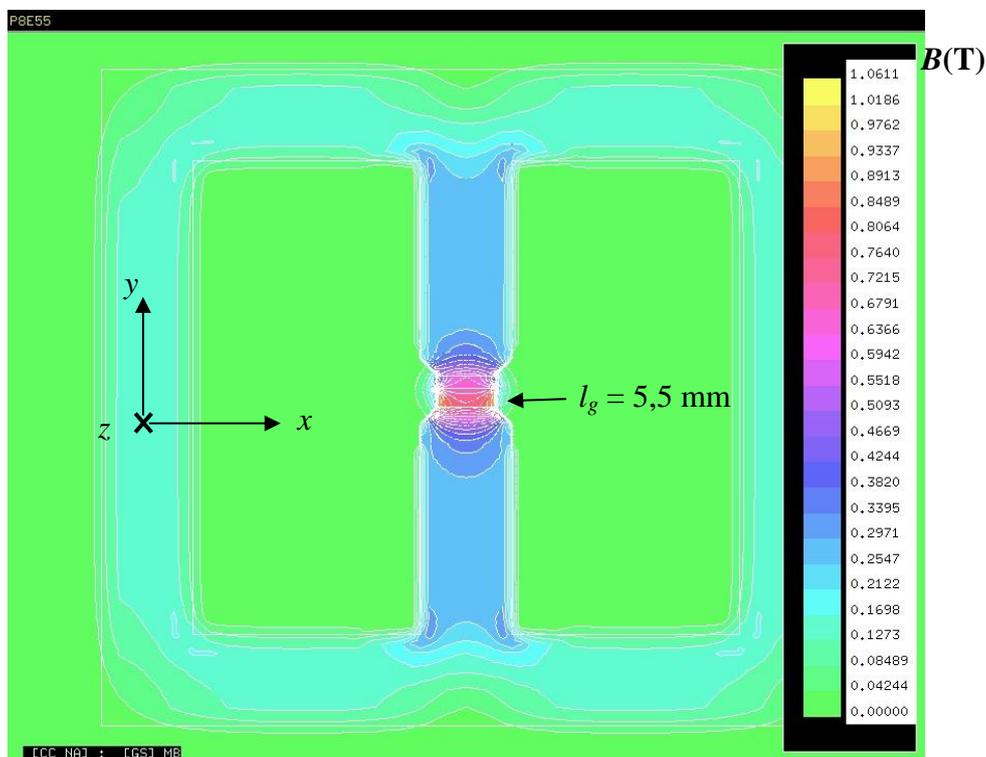


Figura 85. Distribuição da densidade de fluxo em todo o HEV com entreferro de 5,5 mm.

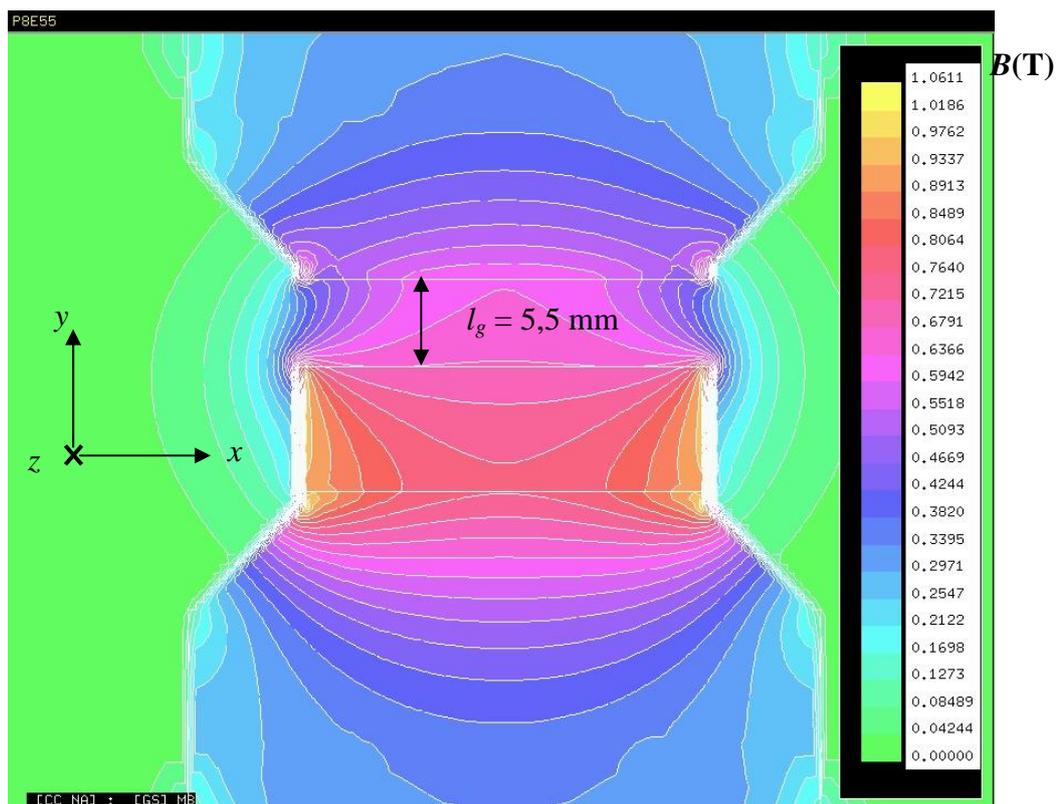


Figura 86. Detalhe do B no centro do HEV com 5,5 mm de entreferro.

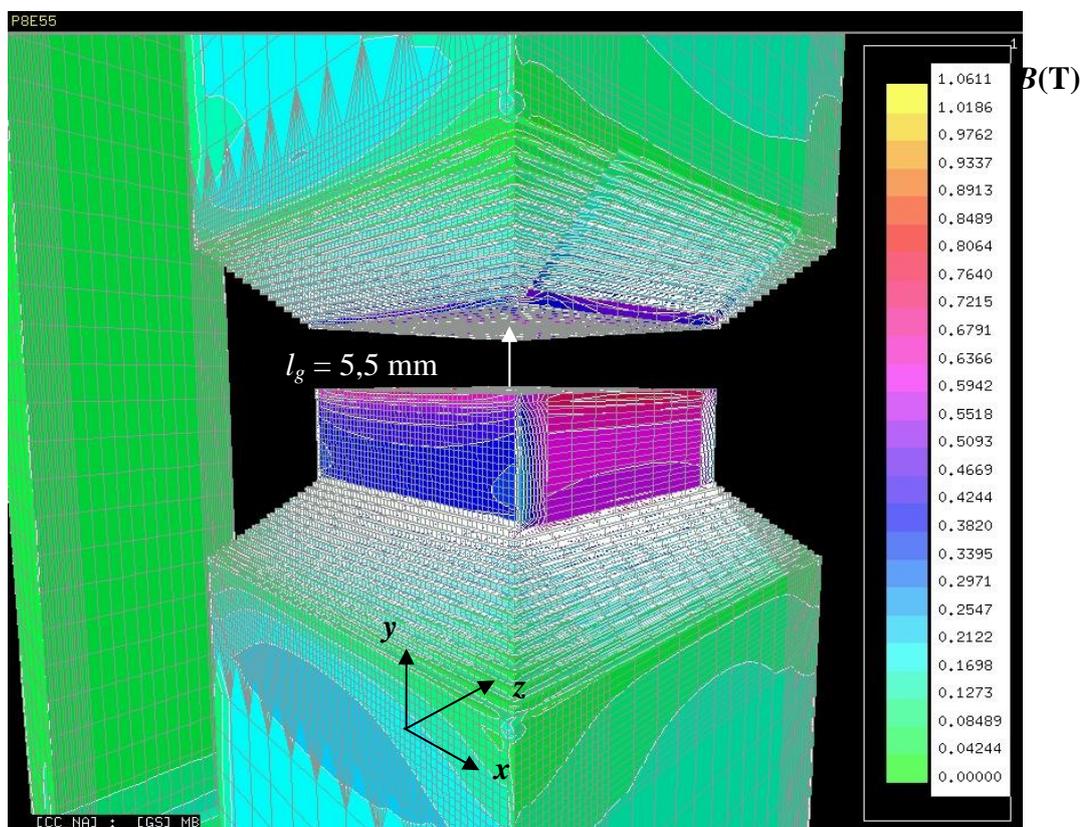


Figura 87. Vista central do HEV com entreferro de 5,5 mm em 3D.

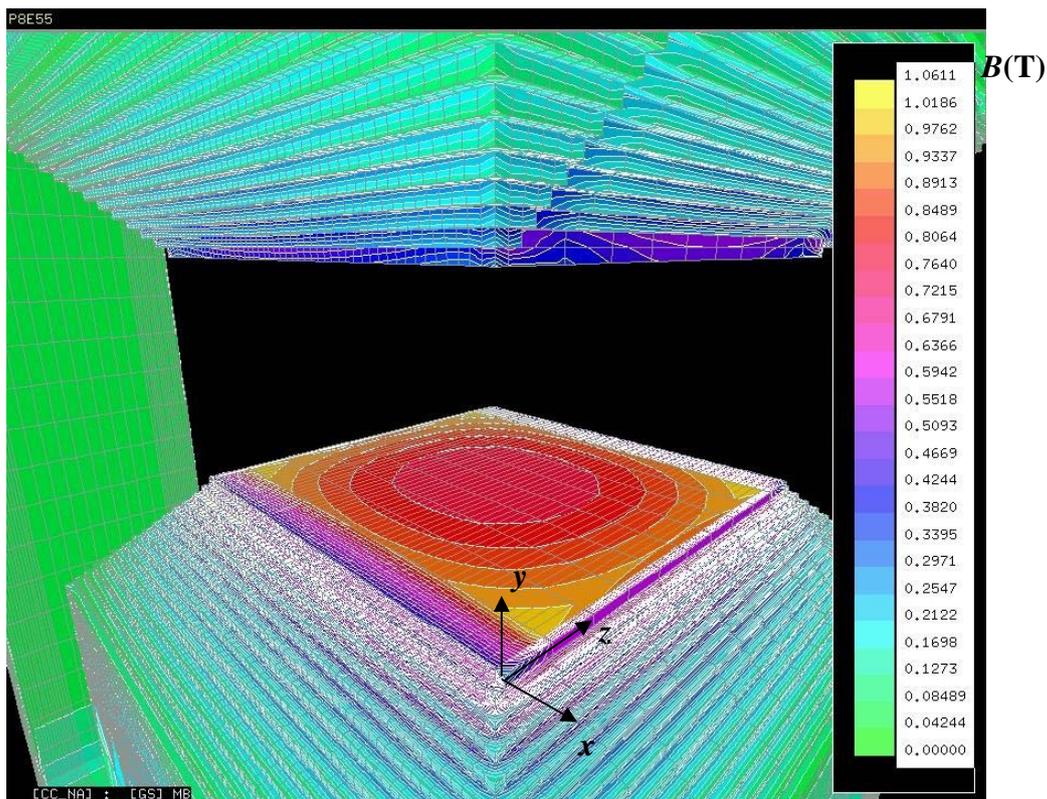


Figura 88. Vista da base do pólo interior sem o ímã para 5,5 mm de entreferro.

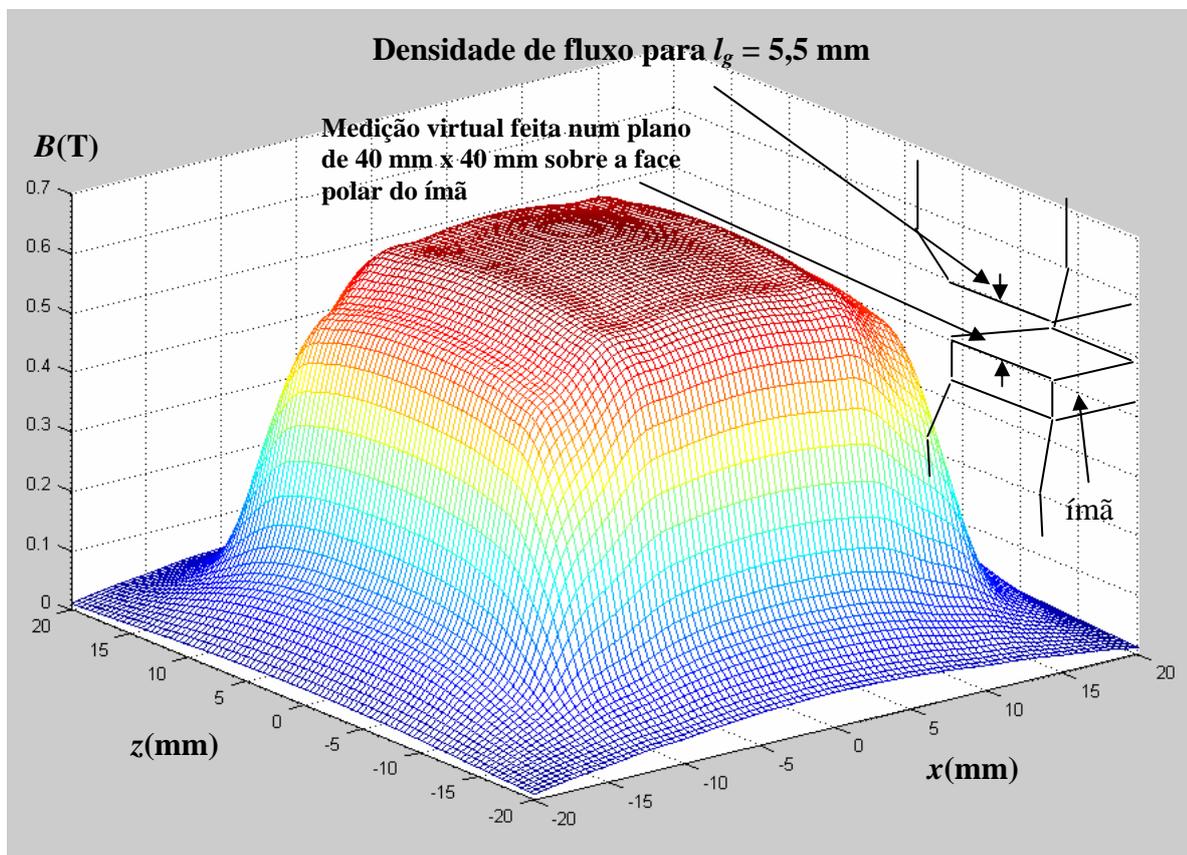


Figura 89. Distribuição da densidade de fluxo no entreferro de 5,5 mm.

Nas Figuras 91 e 92 são apresentados os gráficos das diferentes simulações para cada entreferro. A queda magnética é plotada por comodidade em Tesla, havendo multiplicado os respectivos valores de A/m por μ_0 . Nesse gráfico, o ímã permanente fica na origem de coordenadas e seus extremos vão desde -4 até +4 mm lembrando que ele tem um comprimento no sentido da magnetização de 8 mm, Figura 90.

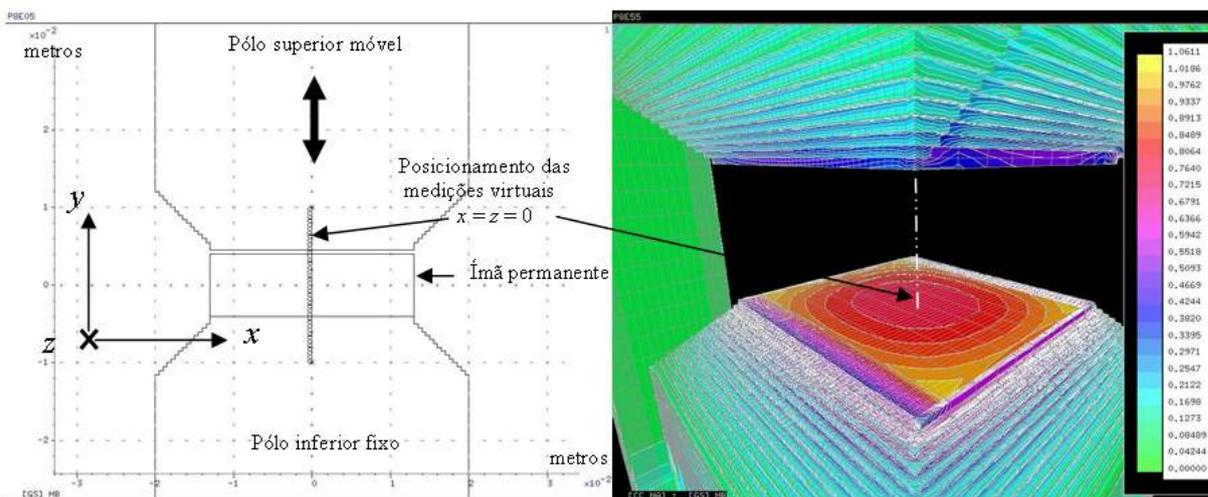


Figura 90. Posicionamento das medições virtuais mostradas nas figuras 91 e 92.

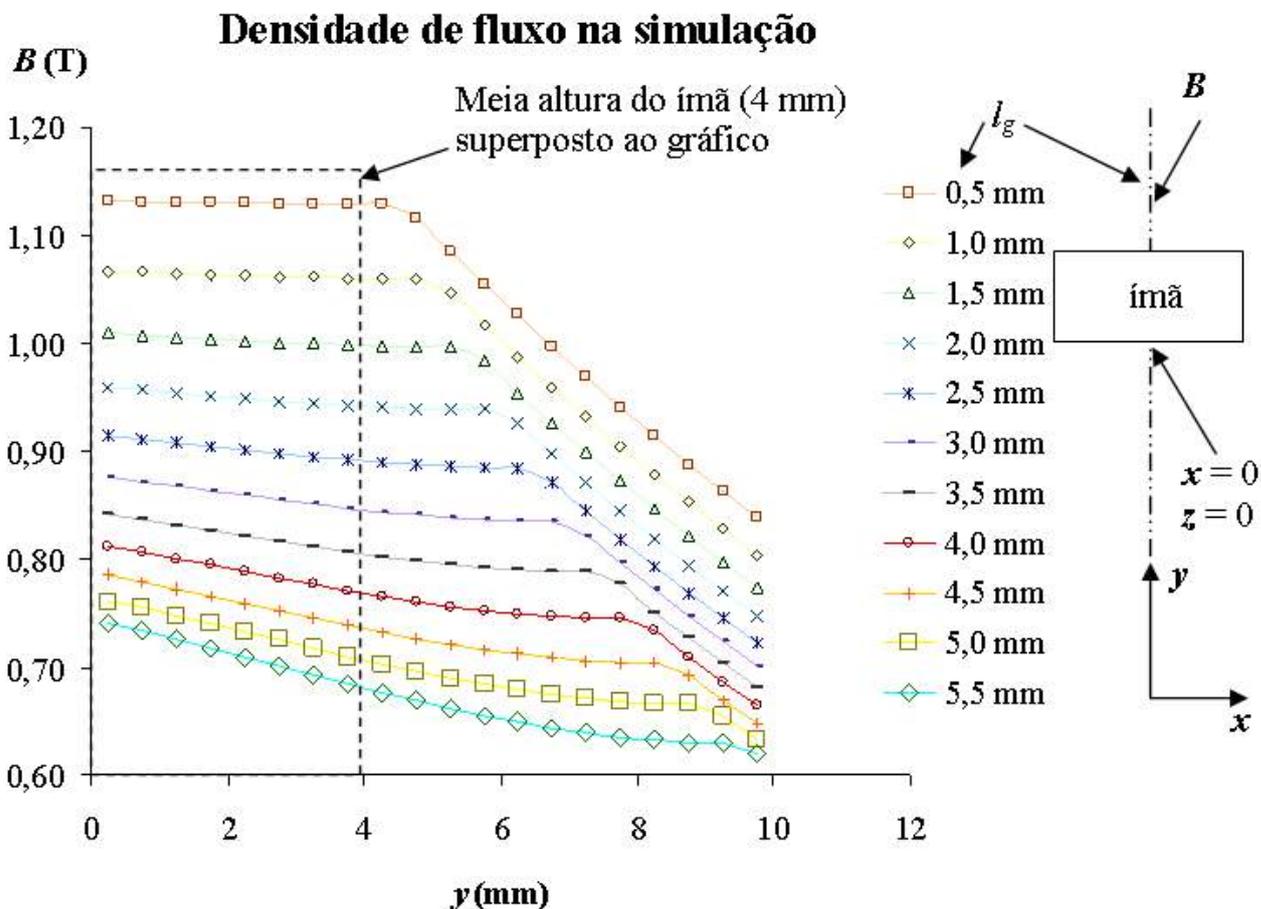


Figura 91. Medição de B em $x=z=0$ ao longo de y para diferentes entreferros.

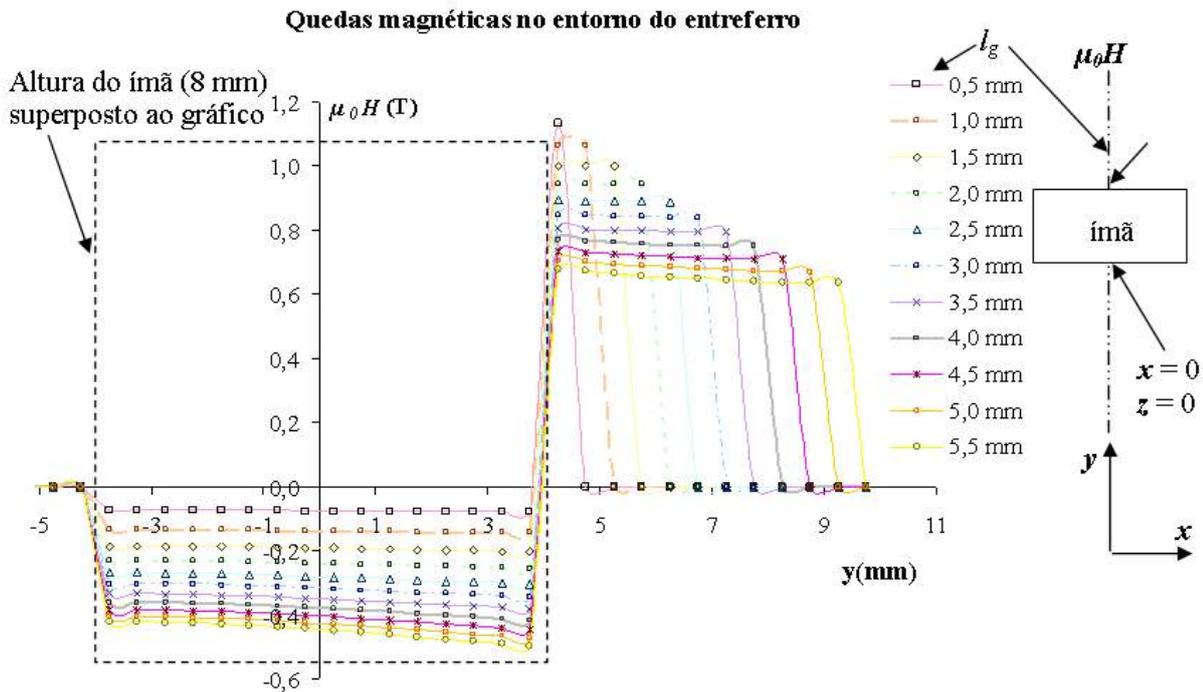


Figura 92. Medição de $\mu_0 H$ em $x=z=0$ ao longo de y para diferentes entreferros.

4.5 CONCLUSÕES DA SIMULAÇÃO

Através das figuras apresentadas anteriormente foi possível verificar que a espessura definida para a culatra é suficiente para evitar a saturação do material ferromagnético, a permeabilidade relativa de 4000 proporcionou resultados similares aos do HEV. Desta forma, a análise numérica permitiu validar as características geométricas de projeto definidas para a construção dele. Também foi possível verificar que o fluxo magnético distribuiu-se de forma simétrica e uniforme através do circuito magnético do HEV e no entreferro. As estimativas de fluxo disperso obtidas com medições na base do ímã e no topo do entreferro também apresentaram valores concordantes.

Os resultados numéricos das medições virtuais da densidade de fluxo no entreferro serão logo utilizadas na comparação com as medições reais feitas no HEV.

5 TESTES

Descrevem-se as amostras e os diferentes testes levados a cabo sobre elas para a determinação de seus parâmetros básicos.

5.1 AMOSTRAS UTILIZADAS

Um total de três amostras de NdFeB foram utilizadas nos diferentes ensaios com as especificações apresentadas na Tabela 14:

Tabela 14. Dados das amostras de NdFeB utilizadas nos testes.

Característica ¹	Dimensão	Tolerância
Altura ²	8,00 mm	±0,1 mm
Largura	25,40 mm	±0,1 mm
Comprimento	25,40 mm	±0,1 mm
$(BH)_{max}$	36 MGOe = 286,48 kJ/m ³	±10%
B_r	12.100 G = 1,21 T	±5%
H_c	10.900 Oe = 867,4 kA/m	NE ³
H_{ci}	12.000 Oe = 955 kA/m	NE

¹ Dados fornecidos pela DICOMAG.

² Orientação magnética no sentido desta dimensão.

³ Valor não especificado.

5.2 TESTES NO IPT

O padrão utilizado de medição e geração de campo magnético foi o Histerisímetro IS-300, fabricado pelo Laboratório Eletrofísico Engineering SRL com certificado de calibração válido até julho de 2007, rastreabilidade ao INMETRO (Eletricidade) e operado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, o IPT. Como acessório principal foram usados um par de bobinas de compensação LJT-42 com par de pólos magnéticos LP-80.

As condições ambientais dos testes foram de $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ de temperatura ambiente e $(65\pm 5)\%$ de umidade relativa do ar.

As medições foram efetuadas colocando-se o ímã entre as faces das peças polares do IS-300. As bobinas compensadoras envolvendo o ímã são conectadas a dois fluxímetros digitais. Uma das bobinas mede o campo magnético H , e a outra mede a polarização magnética J . O IS-300 realiza o controle do campo magnético e a aquisição de dados de forma autônoma por meio de um software de controle.



Figura 93. Culatra do histerisímetro usado para testar os ímãs permanentes.



Figura 94. Equipamento de aquisição de dados e controle do histerisímetro do IPT.



Figura 95. Magnetizador pulsante do IPT.

5.2.1 Procedimento utilizado no IPT

O ímã foi inserido no IS-300 da Figura 93 tal como foi levado e gerado um conjunto de dados no módulo da Figura 94 que conformaram a primeira característica desmagnetizante $J-H$ e $B-H$. No final deste primeiro teste o ímã fica quase desmagnetizado; a seguir o ímã é re-magnetizado com campo pulsante maior que 30 kOe (aprox. 2,4 MA/m) no magnetizador da Figura 95. Nestas condições, o ímã é novamente submetido ao teste, gerando-se uma segunda característica desmagnetizante e é novamente re-magnetizado, o que deve deixar o ímã nas mesmas condições iniciais.

Os resultados das medições (incorporados nos anexos) são reportados em conformidade com o documento “Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration” EA-4/20 (European co-operation for Accreditation), apresentando-se como exemplo a determinação da densidade de fluxo magnético de remanência do ímã N° 1(0065-01).

As duas leituras obtidas do IS-300 correspondentes ao B_r do ímã são $(1,217 \pm 0,012)T$ e $(1,220 \pm 0,012)T$ respectivamente. O resultado deve ser expresso como V.V.C. \pm U, sendo V.V.C. o Valor Verdadeiro Convencional obtido das medições e U a Incerteza Expandida de

Medição que é obtida multiplicando-se a incerteza padrão combinada u_c por um fator de abrangência k :

$$U = ku_c(y) \quad (92)$$

Para uma distribuição normal e uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95% corresponde um valor de k igual a 2. Por sua vez, a incerteza padrão combinada u_c , representa o desvio padrão estimado do resultado que é obtido combinando as incertezas padrões individuais u_i , sejam provenientes de uma avaliação de Tipo A (com auxílio de métodos estatísticos) ou por avaliação de Tipo B (com auxílio de outros meios que não sejam estatísticos), empregando o método usual para combinar desvios padrões. Este método é freqüentemente denominado *lei de propagação de incertezas* e em palavras simples é a raiz quadrada da soma dos quadrados:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \quad (93)$$

Baseada na aproximação de primeira ordem da série de Taylor da equação

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (94)$$

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. Como não é possível determinar o valor exato destas grandezas, trabalhamos com estimativas; assim a estimativa da saída y pode escrever-se como:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (95)$$

Considerando que as medições feitas foram independentes sob as mesmas condições, podemos avaliar a incerteza como sendo de tipo A. Portanto, a melhor estimativa disponível da esperança ou valor esperado da grandeza y que varia aleatoriamente é a média aritmética ou média

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_k \quad (96)$$

No caso do ímã N° 1(0065-01):

$$V.V.C.(B_r) = \frac{1,217 + 1,220}{2} = 1,2185 \text{ T}$$

A variância experimental das observações é dada por

$$s^2(y_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (y_k - \bar{y})^2 \quad (97)$$

Já a variância da média é:

$$s^2(\bar{y}) = \frac{s^2(y_k)}{n} \quad (98)$$

O desvio padrão experimental da média é:

$$s(\bar{y}) = \sqrt{\frac{s^2(y_k)}{n}} \quad (99)$$

No entanto, podemos escrever nosso experimento através de uma equação que enlaça uma avaliação de Tipo A e uma outra de Tipo B, tendo os dados de incerteza providos pelo fabricante do sistema IS-300:

$$y = \bar{y} \pm \Delta y \quad (100)$$

Pode-se obter a incerteza padrão associada com as especificações do fabricante a partir de uma avaliação do Tipo B, supondo que a exatidão declarada fornece fronteiras simétricas para uma correção aditiva ao valor médio de B_r , ΔB_r , de esperança igual a zero e com igual probabilidade de estar em qualquer parte dentro das fronteiras. A meia-largura a da distribuição retangular simétrica de valores possíveis de ΔB_r é então:

$$a = 0,012 \text{ T}$$

A variância associada é

$$u^2(\Delta y) = \frac{(a_+ - a_-)^2}{12} = \frac{(2a)^2}{12} = \frac{a^2}{3} = u^2(\Delta B_r) \quad (101)$$

A incerteza padrão associada às especificações do fabricante do IS-300 é então

$$u(\Delta B_r) = \frac{a}{\sqrt{3}} = 6,93 \times 10^{-3} \text{ T}$$

A variância combinada da equação (93) aplicada ao caso atual de $B_r = \bar{B}_r \pm \Delta B_r$:

$$\begin{aligned} u_c^2(B_r) &= \left(\frac{\partial B_r}{\partial \bar{B}_r} \right)^2 u^2(\bar{B}_r) + \left(\frac{\partial B_r}{\partial \Delta B_r} \right)^2 u^2(\Delta B_r) = u^2(\bar{B}_r) + u^2(\Delta B_r) = \\ &= \left(1,5 \times 10^{-3} \right)^2 T^2 + \left(6,93 \times 10^{-3} \right)^2 T^2 \end{aligned} \quad (102)$$

A incerteza padrão combinada é $u_c(B_r) = 7,09 \times 10^{-3} \text{ T}$.

Finalmente, a melhor estimativa da indução remanente do ímã permanente N° 1 fica como:

$$B_r = (1,2185 \pm 0,0142) \text{ T}$$

Com idêntico raciocínio pode se obter a melhor estimativa do H_c que no caso do ímã permanente 1 foi de $(910.8 \pm 15.8) \text{ kA/m}$ e com os outros parâmetros listados na Tabela 15.

Tabela 15. Resultados dos testes realizados no IPT.

Ímã	$B_r(\text{T})$	$H_c(\text{kA/m})$	$H_{cJ}(\text{kA/m})$	$BH_{max}(\text{kJ/m}^3)$	$H_k(\text{kA/m})$	μ_r
0065-01	$1,219 \pm 0,014$	911 ± 16	1.164 ± 20	$276,3 \pm 6,4$	1.101 ± 20	$1,065 \pm 0,022$
0065-02	$1,221 \pm 0,014$	910 ± 16	1.162 ± 20	$276,1 \pm 6,4$	1.099 ± 19	$1,067 \pm 0,022$
0065-03	$1,219 \pm 0,014$	912 ± 16	1.146 ± 20	$277,3 \pm 7,2$	1.088 ± 19	$1,064 \pm 0,023$

Incluem-se em Anexos os resultados dos testes feitos no IPT (copia do relatório).

5.3 ENSAIOS E SIMULAÇÃO

Adotou-se o ímã permanente N° 2 (0065-02) para trabalhar no simulador e no HEV. Assim, seus valores de B_r e μ_r foram introduzidos no programa MEGA com o modelo utilizado para o HEV.

Para cada entreferro do modelo foram obtidas leituras virtuais da densidade de fluxo magnético no centro geométrico do entreferro como mostram a Figura 96 e 97. A informação da Tabela 16 gerada pelo simulador é logo convertida em um gráfico como se mostra na Figura 98. Observando a Figura 96 e 97 vemos que o centro de coordenadas foi estabelecido no centro geométrico do ímã permanente, portanto o começo do entreferro é a face superior do ímã (a uma distância $y = 4 \text{ mm}$ do centro).

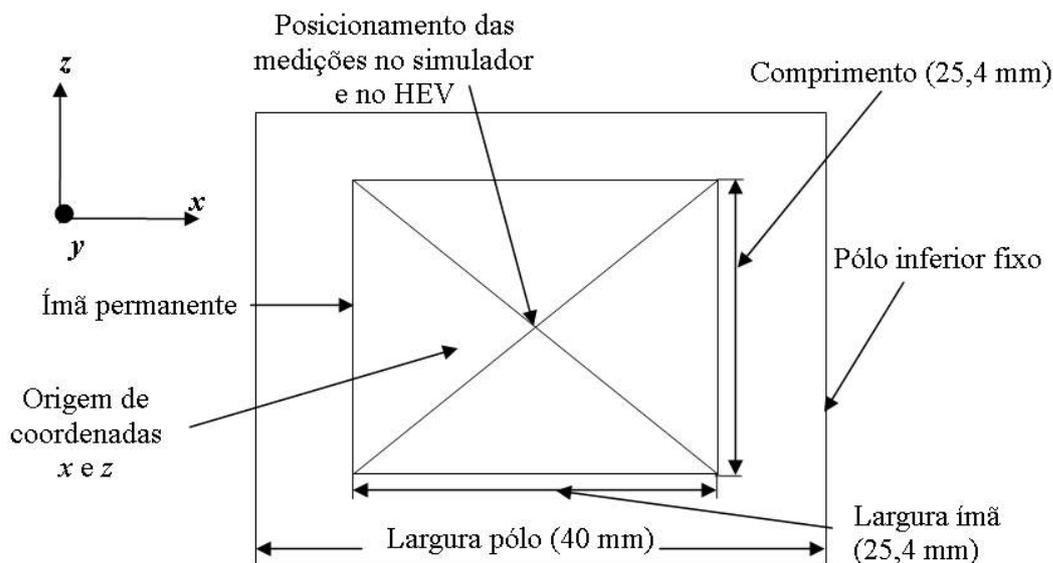


Figura 96. Vista superior desde o entreferro.

As medições virtuais feitas com a citada figura são todas em $x = z = 0$. Na Tabela 16 também se pode observar sublinhadas as medições virtuais que ficarão dentro do entreferro.

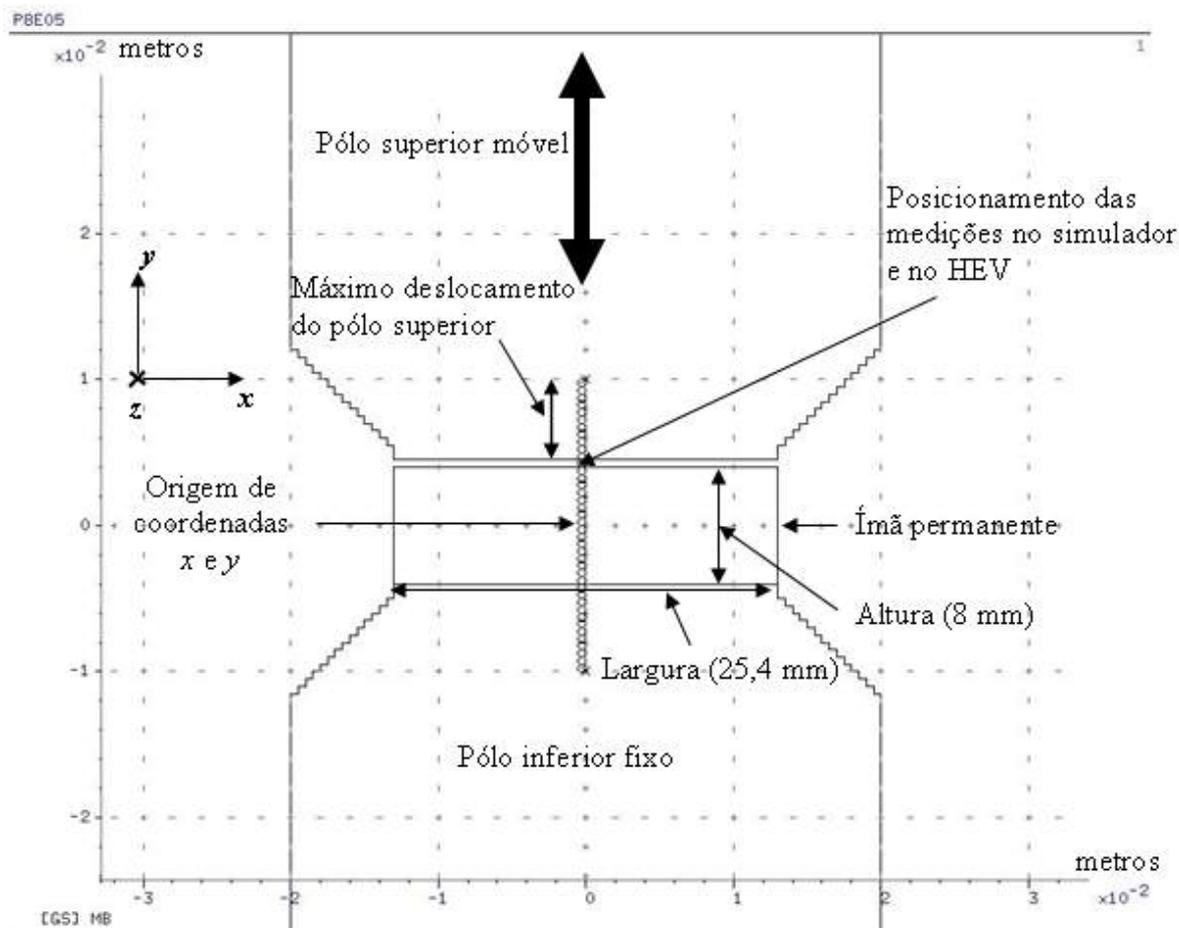


Figura 97. Posicionamento das medições virtuais.

Tabela 16. Densidade de fluxo em HEV simulado com 0,5 a 5,5 mm de entreferro (sublinhadas medições no entreferro).

y(mm)	B0,5(T)	B1,0(T)	B1,5(T)	B2,0(T)	B2,5(T)	B3,0(T)	B3,5(T)	B4,0(T)	B4,5(T)	B5,0(T)	B5,5(T)
3,75	1,14	1,07	1,00	0,95	0,90	0,85	0,81	0,78	0,74	0,71	0,69
4,25	<u>1,14</u>	<u>1,07</u>	<u>1,00</u>	<u>0,95</u>	<u>0,89</u>	<u>0,85</u>	<u>0,81</u>	<u>0,77</u>	<u>0,74</u>	<u>0,71</u>	<u>0,68</u>
4,75	1,12	<u>1,07</u>	<u>1,00</u>	<u>0,95</u>	<u>0,89</u>	<u>0,85</u>	<u>0,80</u>	<u>0,77</u>	<u>0,73</u>	<u>0,70</u>	<u>0,67</u>
5,25	1,09	1,05	<u>1,00</u>	<u>0,94</u>	<u>0,89</u>	<u>0,84</u>	<u>0,80</u>	<u>0,76</u>	<u>0,73</u>	<u>0,69</u>	<u>0,67</u>
5,75	1,07	1,03	0,99	<u>0,94</u>	<u>0,89</u>	<u>0,84</u>	<u>0,80</u>	<u>0,76</u>	<u>0,72</u>	<u>0,69</u>	<u>0,66</u>
6,25	1,04	1,00	0,96	0,93	<u>0,89</u>	<u>0,84</u>	<u>0,80</u>	<u>0,76</u>	<u>0,72</u>	<u>0,68</u>	<u>0,65</u>
6,75	1,01	0,97	0,94	0,91	0,88	<u>0,84</u>	<u>0,79</u>	<u>0,75</u>	<u>0,72</u>	<u>0,68</u>	<u>0,65</u>
7,25	0,98	0,94	0,91	0,88	0,85	0,83	<u>0,79</u>	<u>0,75</u>	<u>0,71</u>	<u>0,68</u>	<u>0,64</u>
7,75	0,96	0,92	0,88	0,85	0,83	0,80	0,78	<u>0,75</u>	<u>0,71</u>	<u>0,67</u>	<u>0,64</u>
8,25	0,93	0,89	0,86	0,83	0,80	0,78	0,76	0,74	<u>0,71</u>	<u>0,67</u>	<u>0,64</u>
8,75	0,91	0,87	0,84	0,81	0,78	0,76	0,74	0,72	0,70	<u>0,67</u>	<u>0,64</u>
9,25	0,88	0,84	0,81	0,78	0,76	0,73	0,71	0,69	0,68	0,66	<u>0,64</u>
9,75	0,86	0,82	0,79	0,76	0,74	0,71	0,69	0,67	0,66	0,64	0,63

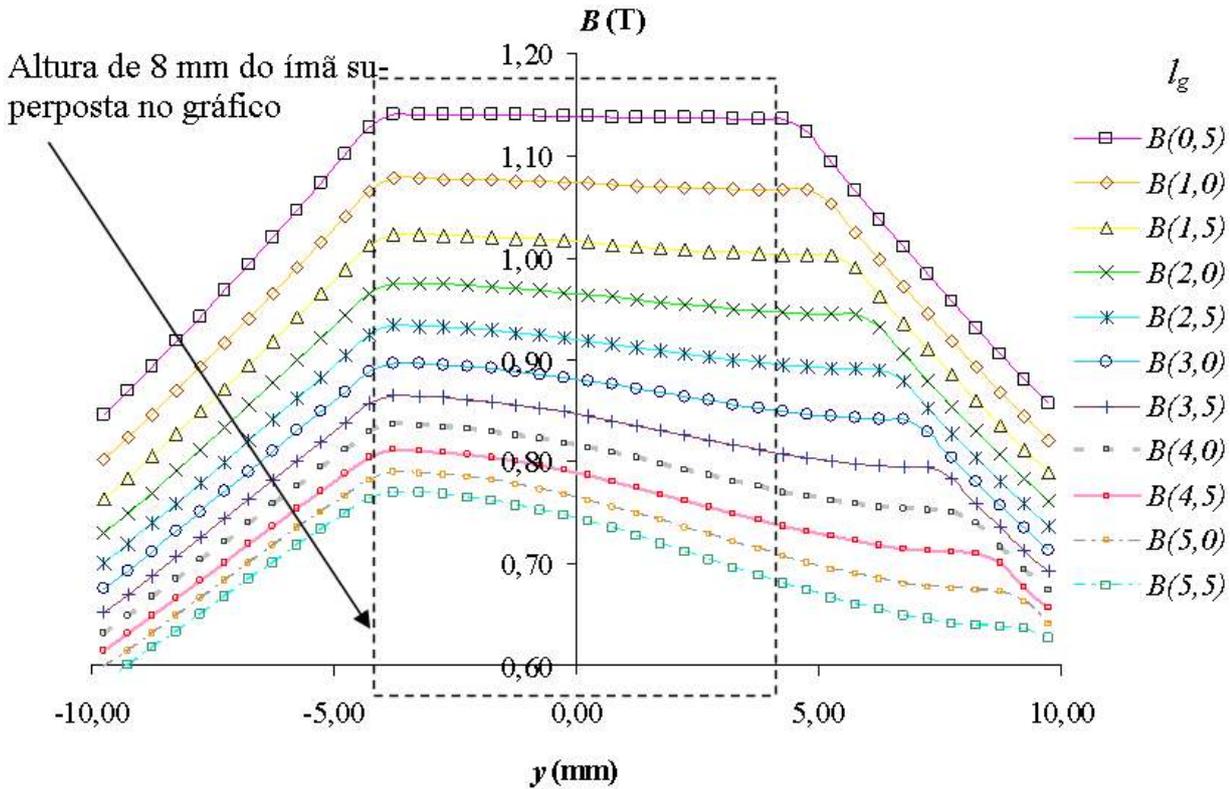


Figura 98. Densidade de fluxo no HEV simulado para vários entreferos.

5.4 ENSAIOS NO HEV

No HEV foi contemplado o funcionamento de um LVDT que através de um condicionador que produz uma tensão de CC proporcional à variação do entreferro. No entanto, foi utilizado inicialmente em paralelo um relógio comparador Mitutoyo com faixa de 0 a 5,5 mm e resolução de 0,01 mm.

O instrumento utilizado para medição da densidade de fluxo no entreferro é um gaussímetro Hirst GM05 de quatro dígitos, 1% de exatidão e resolução de 1 mT na faixa de 3 T. A sonda transversa de efeito Hall do instrumento tem uma espessura de 1 mm, portanto esse é o mínimo entreferro ensaiado, Figura 99.

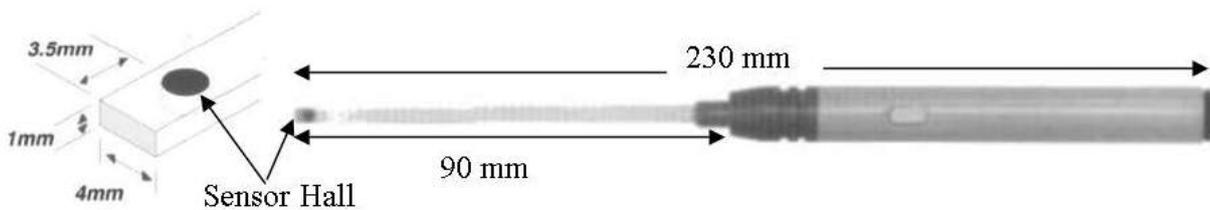


Figura 99. Sonda utilizada na medição de densidade de fluxo no HEV (HIRST, 2007).

Inicialmente não foi contemplada a utilização de um sistema de posicionamento da sonda com exatidão comparável à medição do entreferro. Foi implementado um mais simples com gabarito de posicionamento no centro geométrico do ímã que permite a inserção da sonda numa posição conhecida, Figura 100. A espessura do papelão utilizado como gabarito é aproximadamente a mesma espessura da sonda. Uma vez posicionada a sonda não foi necessário modificar sua posição para cada medição; só foi necessário re-posicionar o entreferro de acordo com o processo de medição proposto.

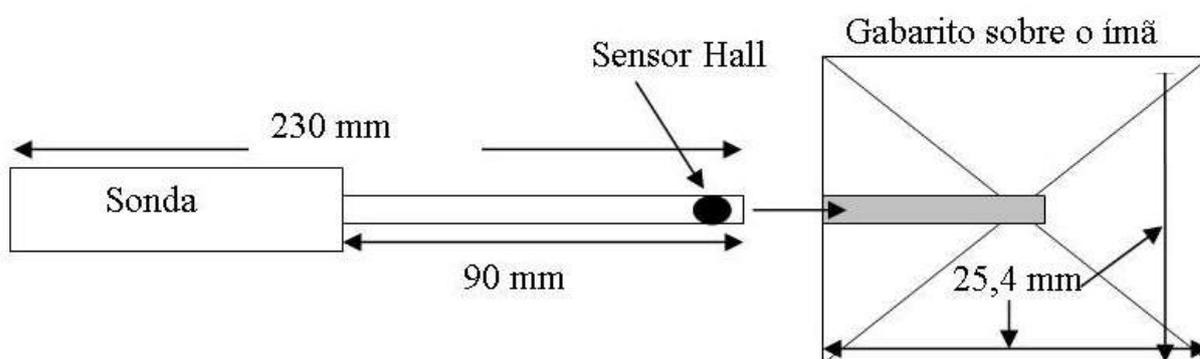


Figura 100. Posicionamento da sonda no centro geométrico do ímã e do entreferro.

As medições foram feitas a uma temperatura de $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ e a uma umidade relativa de $(53 \pm 1)\%$. De um total de três ímãs permanentes de NdFeB ensaiados e certificados pelo IPT, um, o 0065-01, foi adotado como padrão e os outros dois serão considerados como elementos desconhecidos. A metodologia de medição foi descrita no capítulo 3 e como exemplo foram apresentadas as medições feitas para esse ímã padrão. Os outros dois ímãs permanentes foram testados da mesma maneira, e os resultados são apresentados a seguir.

5.4.1 Resultados para o Ímã permanente N° 2 (0065-02)

A forma de individualizar as medições da Tabela 17 é a mesma utilizada com o ímã permanente padrão no capítulo 3: o primeiro sub-índice pertence ao ímã, o segundo à posição no sentido da magnetização, logo uma letra indicando abertura ou fechamento do entreferro e um outro número índice em relação às quantidades de aberturas ou fechamentos; por exemplo B_{21F2} significa densidade de fluxo do ímã N° 2 na posição 1 e no segundo fechamento ($F2$). B_{21av} por sua vez significa a média dos valores de densidade de fluxo do ímã 2 na posição 1. Na Figura 101 se observam os resultados das medições realizadas com o ímã permanente 2 na posição 1. Dada a proximidade das curvas, é apresentado somente um par delas.

Tabela 17. Medição da densidade de fluxo no entreferro do HEV com ímã 2 em posição 1.

$l_g(\text{mm})$	$B_{21A1}(\text{T})$	$B_{21F1}(\text{T})$	$B_{21A2}(\text{T})$	$B_{21F2}(\text{T})$	$B_{21av}(\text{T})$
1,0	1,072	1,067	1,067	1,065	1,066
1,5	1,016	1,003	1,010	1,003	1,007
2,0	0,962	0,954	0,959	0,954	0,957
2,5	0,911	0,901	0,908	0,902	0,905
3,0	0,866	0,856	0,865	0,854	0,860
3,5	0,824	0,814	0,822	0,815	0,819
4,0	0,782	0,777	0,783	0,777	0,780
4,5	0,751	0,748	0,751	0,749	0,750
5,0	0,721	0,716	0,721	0,716	0,719
5,5	0,694	0,694	0,695	0,695	0,695

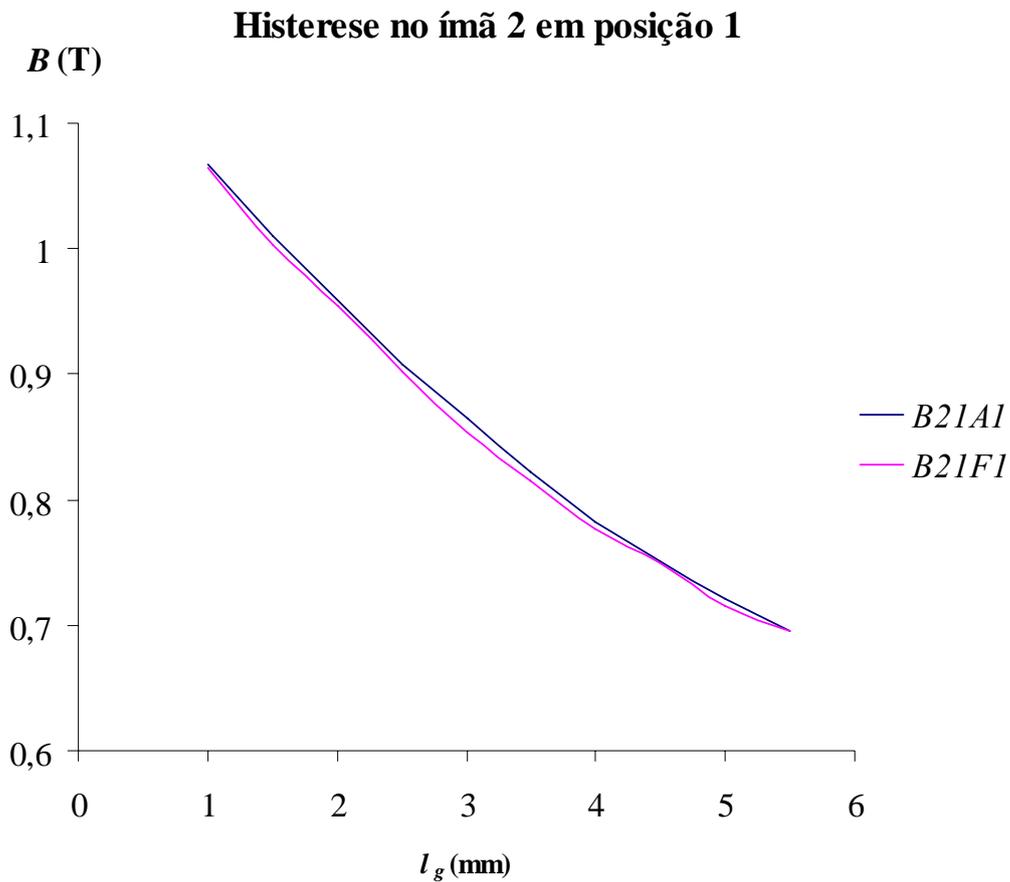


Figura 101. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 2 em posição 1.

Fazemos agora as medições com o ímã permanente 2 invertido e obtemos os resultados da Tabela 18 e na Figura 102.

Tabela 18. Medições de B no ímã 2 na posição 2.

$l_g(\text{mm})$	$B_{22A1}(\text{T})$	$B_{22F1}(\text{T})$	$B_{22A2}(\text{T})$	$B_{22F2}(\text{T})$	$B_{22av}(\text{T})$
1	-1,088	-1,077	-1,077	-1,078	-1,078
1,5	-1,026	-1,011	-1,022	-1,011	-1,017
2	-0,972	-0,962	-0,967	-0,963	-0,965
2,5	-0,920	-0,909	-0,916	-0,909	-0,913
3	-0,872	-0,861	-0,872	-0,861	-0,867
3,5	-0,831	-0,821	-0,827	-0,823	-0,825
4	-0,786	-0,782	-0,788	-0,782	-0,785
4,5	-0,758	-0,754	-0,757	-0,754	-0,756
5	-0,727	-0,722	-0,725	-0,723	-0,724
5,5	-0,700	-0,700	-0,700	-0,700	-0,700

Densidade de fluxo com ímã 2 em posição 2

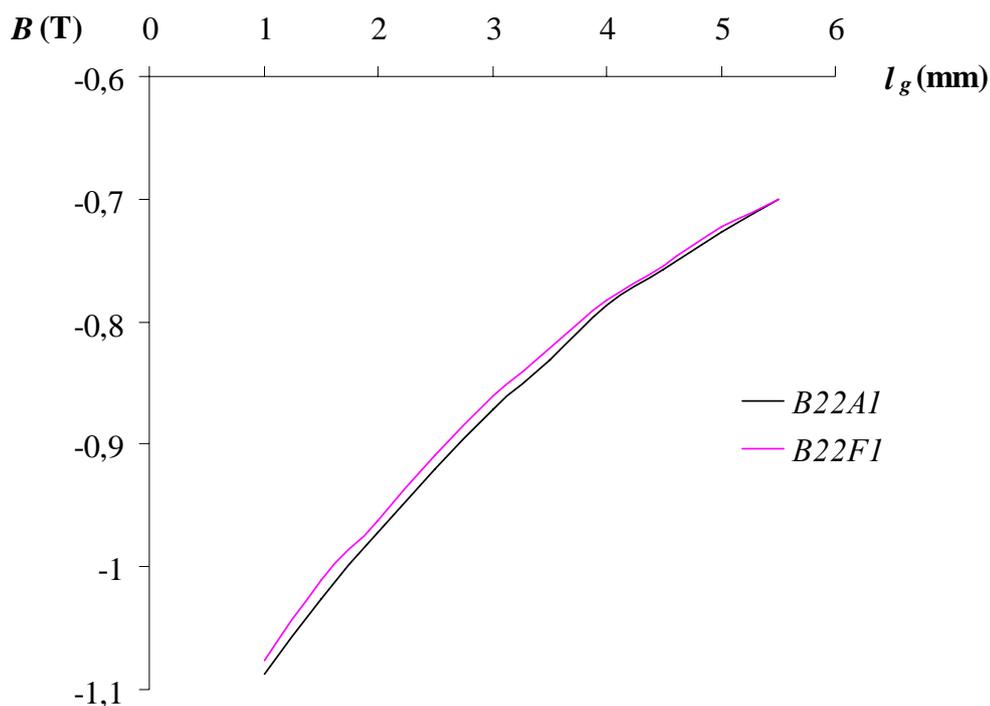


Figura 102. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 2 em posição 2.

Dos resultados das tabelas anteriores podemos calcular as densidades de fluxo fornecidas pelo ímã permanente 2. Para obter finalmente as densidades de fluxo definitivas para o ímã permanente 2 faremos o valor médio dos resultados, obtendo então a Tabela 19.

Tabela 19. Valores finais de densidade de fluxo do ímã permanente 2.

$l_g(\text{mm})$	$B_{21av}(\text{T})$	$B_{22av}(\text{T})$	$B_{2av}(\text{T})$
1	1,066	-1,078	1,072
1,5	1,007	-1,017	1,012
2	0,957	-0,965	0,961
2,5	0,905	-0,913	0,909
3	0,860	-0,867	0,864
3,5	0,819	-0,825	0,822
4	0,780	-0,785	0,783
4,5	0,750	-0,756	0,753
5	0,719	-0,724	0,722
5,5	0,695	-0,700	0,698

Havendo calculado no capítulo 3 o fator K_c com o ímã permanente 1 utilizado como padrão, vamos agora a utilizar esse fator para calcular $\mu_0 H_m$ e obter a característica de desmagnetização do segundo quadrante. Como foi detalhado na rotina de medição e obtenção da característica de desmagnetização, inserimos os valores calculados e os dados em

$$\mu_0 H_m = -B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \frac{1}{K_c} \quad (103)$$

e obtemos a Tabela 20 e a Figura 103:

Tabela 20. Obtenção de $\mu_0 H_m$ para o ímã 2 a partir do K_c .

$l_g(\text{mm})$	$B_{2av}(\text{T})$	K_c	$\mu_0 H_m(\text{T})$	$H_m(\text{kA/m})$
1	1,072	1,004	-0,133	-106,218
1,5	1,012	0,982	-0,193	-153,697
2	0,961	0,993	-0,242	-192,492
2,5	0,909	0,975	-0,291	-231,821
3	0,864	0,976	-0,332	-263,899
3,5	0,822	0,977	-0,368	-292,69
4	0,783	0,961	-0,407	-323,833
4,5	0,753	0,970	-0,437	-347,478
5	0,722	0,969	-0,465	-370,032
5,5	0,698	0,986	-0,486	-387,064

Característica de desmagnetização do ímã 2

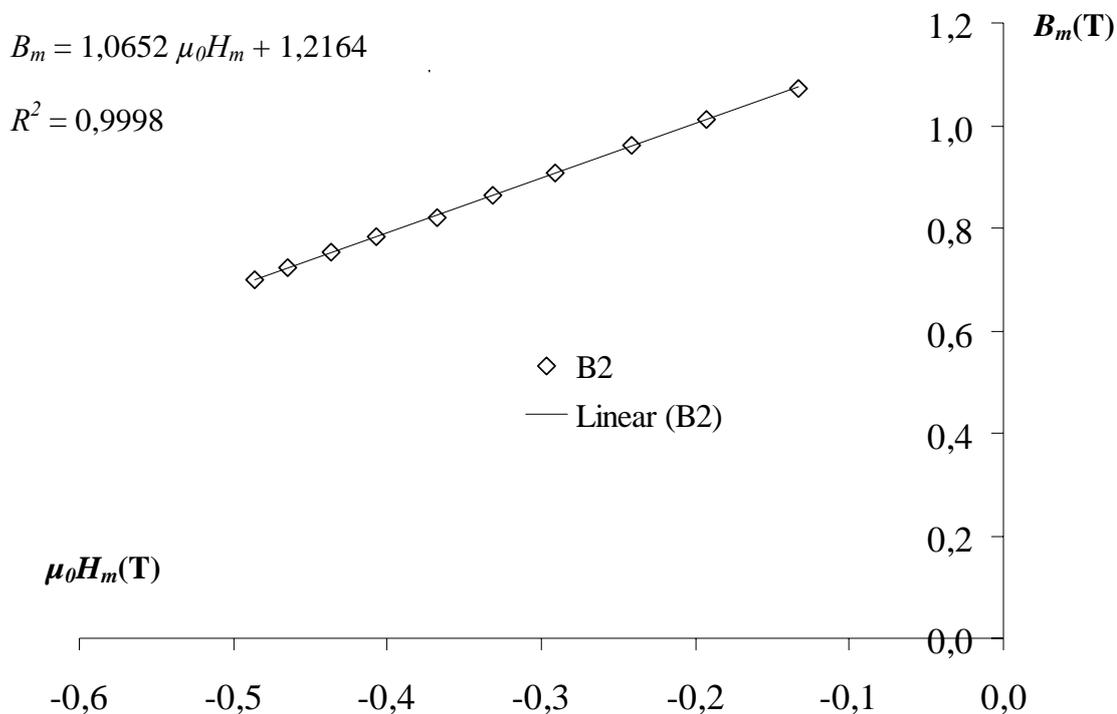


Figura 103. Característica de desmagnetização do ímã permanente 2 utilizando o fator K_c .

5.4.2 Resultados para o Ímã permanente N° 3 (0065-03)

São apresentados os resultados das medições no HEV com o ímã permanente 3. Na Tabela 21 e Figura 104 para a posição 1.

Tabela 21. Valores de densidade de fluxo do ímã permanente 3 em posição 1.

$l_g(\text{mm})$	$B_{31A1}(\text{T})$	$B_{31F1}(\text{T})$	$B_{31A2}(\text{T})$	$B_{31F2}(\text{T})$	$B_{31av}(\text{T})$
1,0	1,082	1,073	1,073	1,072	1,073
1,5	1,021	1,012	1,015	1,011	1,013
2,0	0,972	0,962	0,966	0,962	0,964
2,5	0,917	0,910	0,913	0,908	0,911
3,0	0,874	0,862	0,872	0,862	0,867
3,5	0,831	0,820	0,829	0,821	0,825
4,0	0,790	0,782	0,788	0,783	0,786
4,5	0,758	0,754	0,757	0,753	0,755
5,0	0,726	0,722	0,725	0,722	0,724
5,5	0,701	0,701	0,700	0,700	0,700

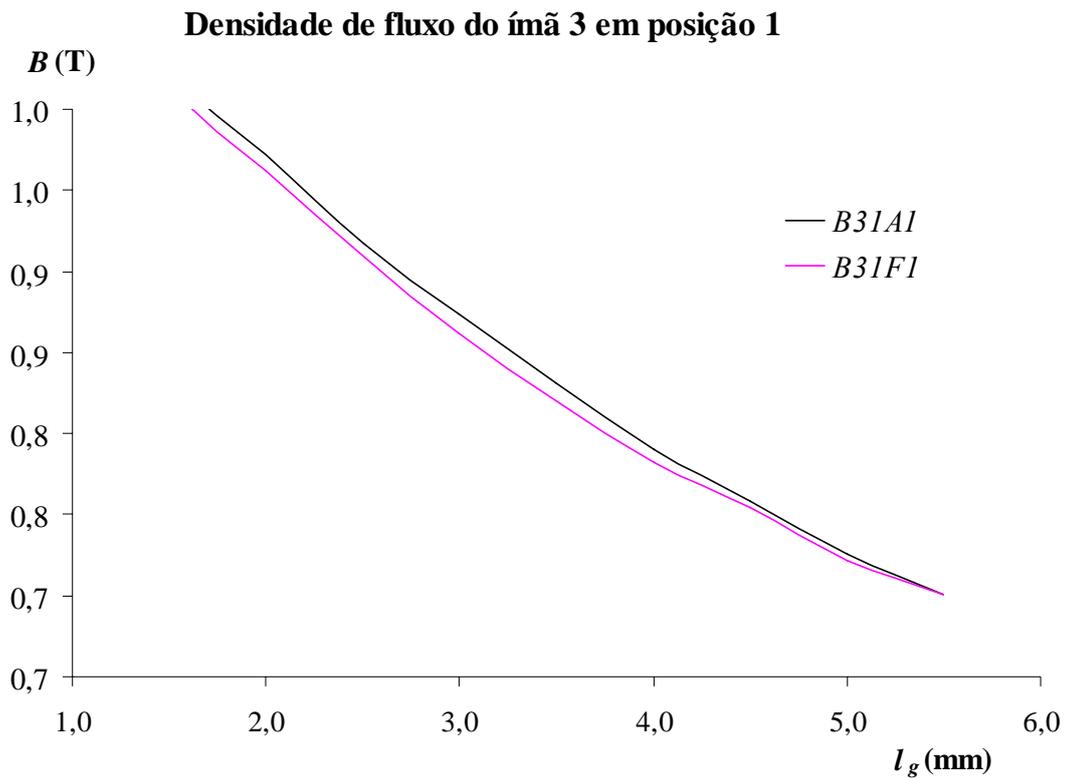


Figura 104. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 3 em posição 1.

Invertamos o ímã permanente na sua direção de magnetização e fazemos as medições na posição 2, obtendo-se os dados que se apresentam na Tabela 22 e Figura 106.

Tabela 22. Valores de densidade de fluxo do ímã permanente 3 em posição 2.

l_g (mm)	B_{32A1} (T)	B_{32F1} (T)	B_{32A2} (T)	B_{32F2} (T)	B_{32av} (T)
1,0	-1,095	-1,090	-1,090	-1,089	-1,090
1,5	-1,034	-1,024	-1,029	-1,024	-1,027
2,0	-0,982	-0,974	-0,978	-0,974	-0,976
2,5	-0,931	-0,920	-0,926	-0,920	-0,923
3,0	-0,883	-0,874	-0,882	-0,874	-0,878
3,5	-0,840	-0,831	-0,838	-0,833	-0,836
4,0	-0,799	-0,792	-0,797	-0,793	-0,795
4,5	-0,767	-0,763	-0,766	-0,763	-0,765
5,0	-0,736	-0,730	-0,735	-0,732	-0,734
5,5	-0,710	-0,710	-0,710	-0,710	-0,710

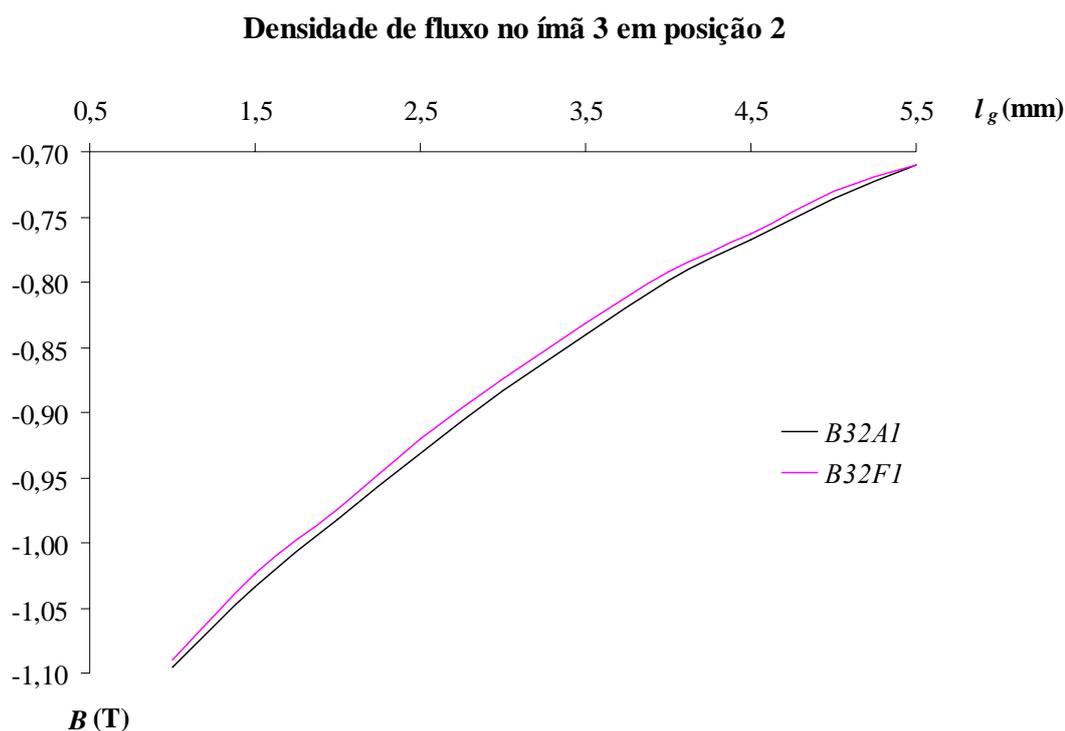


Figura 105. Densidade de fluxo no HEV com ímã permanente 3 em posição 2.

Das medições de densidade de fluxo nas posições 1 e 2 obtemos os resultados finais para o ímã 3.

Aplicando agora o fator de correção K_c podemos obter informação para a característica de desmagnetização como se mostra na Tabela 23 e na Figura 106.

Tabela 23. Valores finais de densidade de fluxo e obtenção de $\mu_0 H_m$ para o ímã 3 a partir do K_c .

$l_g(\text{mm})$	$B_{3av}(\text{T})$	K_c	$\mu_0 H_m(\text{T})$	$H_m(\text{kA/m})$
1	1,081	1,004	-0,135	-107,134
1,5	1,020	0,982	-0,195	-154,95
2	0,970	0,993	-0,244	-194,346
2,5	0,917	0,975	-0,294	-233,862
3	0,873	0,976	-0,335	-266,804
3,5	0,830	0,977	-0,372	-295,718
4	0,790	0,961	-0,411	-327,041
4,5	0,760	0,970	-0,441	-350,71
5	0,729	0,969	-0,470	-373,751
5,5	0,705	0,986	-0,492	-391,226

Característica de desmagnetização do ímã 3

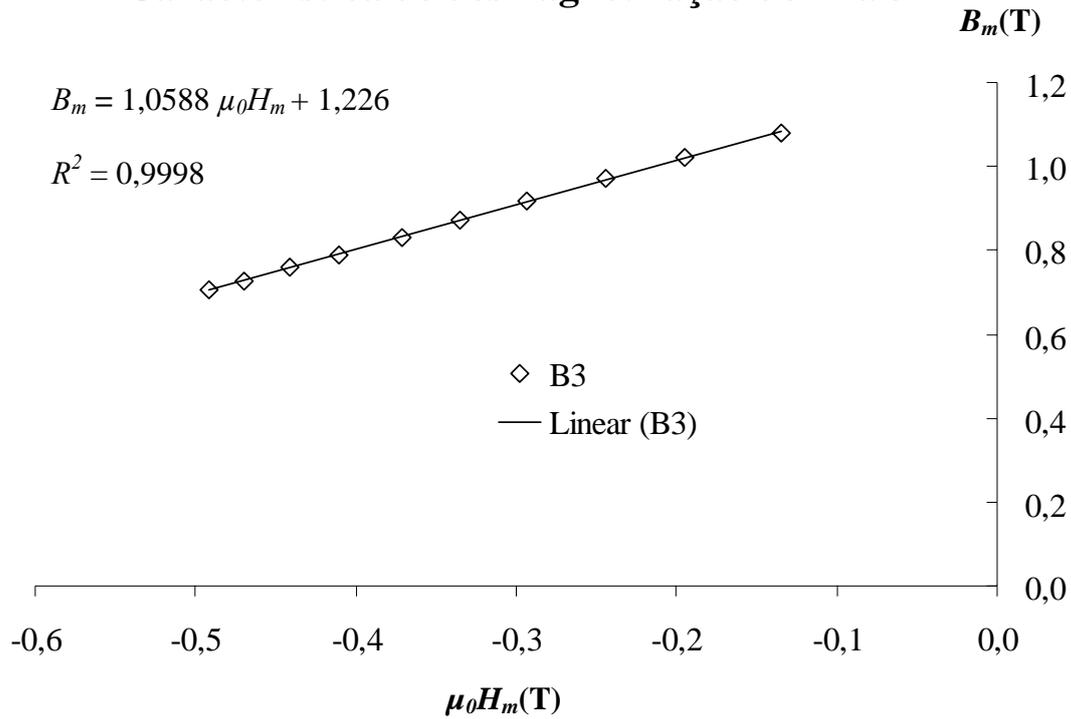


Figura 106. Característica de desmagnetização do ímã permanente 3 utilizando o fator K_c .

Da Figura 101; Figura 102; Figura 104 e Figura 105 é possível visualizar a histerese dos ímãs permanentes 2 e 3 na faixa de funcionamento de 1 a 5,5 mm de entreferro em as duas posições 1 e 2.

Da Figura 103 e Figura 106 é possível apreciar o bom grau de alinhamento dos pontos dado pelo fator $R^2 = 0,9998$.

6 ANÁLISE DE RESULTADOS

São apresentados e analisados comparativamente os resultados da simulação e das medições experimentais no HEV.

6.1 COMPARAÇÃO DAS DENSIDADES DE FLUXO OBTIDAS POR SIMULAÇÃO E MEDIDAS

Na Tabela 16 do capítulo 4 foram apresentados os resultados obtidos com o simulador no modelo do HEV empregando dados do ímã permanente N°. 2 (IPT 0065-02). Na Tabela 11 do capítulo 3 foram apresentados os resultados das medições experimentais feitas no HEV com o ímã permanente N°. 1 (IPT 0065-01). Já na Tabela 19 do capítulo 5 foram apresentados os resultados das medições experimentais feitas no HEV com o ímã permanente N°. 2 e na Tabela 23 do capítulo 5 os correspondentes ao ímã permanente N°. 3 (IPT 0065-03). Estes resultados são apresentados juntos agora na Tabela 24 com B_s indicando os resultados de simulação para o ímã N°. 2, B_{1av} a densidade de fluxo medida experimentalmente no HEV com o ímã N°. 1, B_{2av} com o ímã N°. 2 e B_{3av} com o ímã N°. 3.

Tabela 24. Comparação dos resultados da simulação (B_s) com as medições no HEV.

$l_g(\text{mm})$	$B_s(\text{T})$	$B_{1av}(\text{T})$	$B_{2av}(\text{T})$	$B_{3av}(\text{T})$
1,0	1,066	1,076	1,072	1,081
1,5	1,003	1,013	1,012	1,020
2,0	0,946	0,961	0,961	0,970
2,5	0,895	0,909	0,909	0,917
3,0	0,849	0,865	0,863	0,873
3,5	0,807	0,826	0,822	0,830
4,0	0,770	0,785	0,783	0,790
4,5	0,736	0,754	0,753	0,760
5,0	0,707	0,723	0,721	0,729
5,5	0,680	0,700	0,698	0,705

Os resultados em formato de gráficos se apresentam na Figura 107 comparando somente as medições que envolvem ao ímã permanente 2 na simulação e nas medições experimentais no HEV.

Observa-se da comparação que existe uma conformidade geral dos resultados, considerando que o modelo no MEGA foi feito com simplificações do circuito magnético.

Com um entreferro de 5,5 mm é possível apreciar uma diferença máxima de 2,6% na densidade de fluxo da simulação com respeito ao medido experimentalmente. Essas diferenças podem ser devidas às condições do HEV real que não foram incluídas no modelo: entreferros construtivos, imperfeição na discretização dos cabeçotes, variações na curva do aço e etc.

Comparação resultados do MEGA com o HEV para o ímã 2

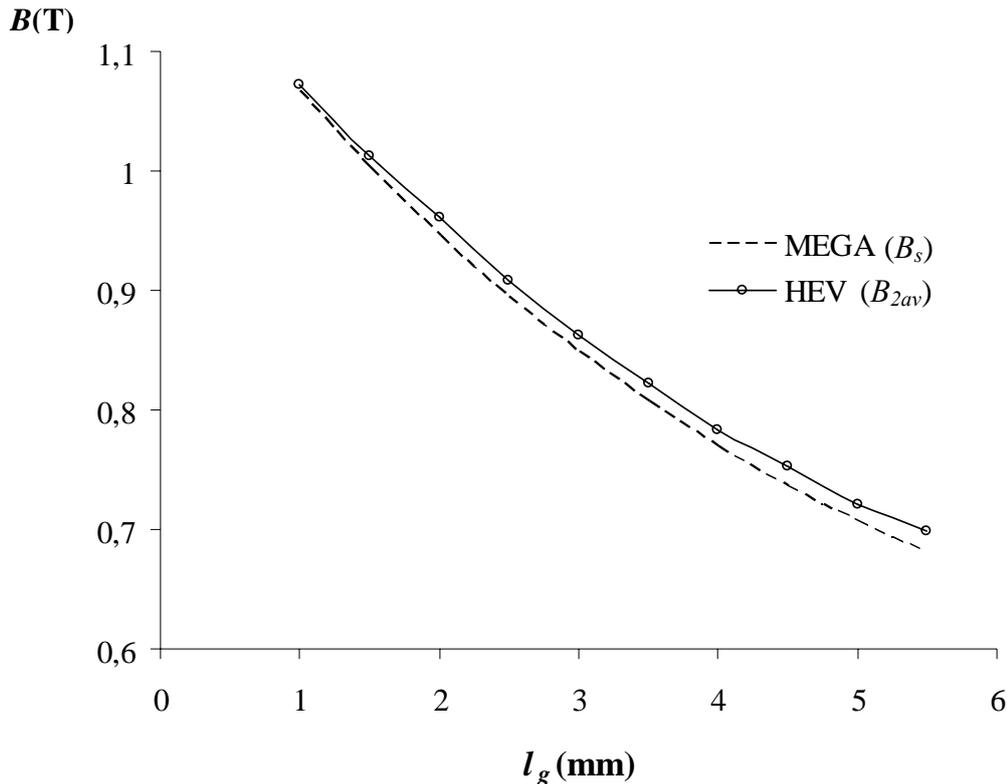


Figura 107. Comparação de resultados de simulação e valores experimentais no HEV com ímã 2 (valores da Tabela 24).

Também dos resultados da simulação no capítulo 4 foi possível comprovar que o aço utilizado trabalha sem saturação para os níveis de densidade de fluxo existentes para os entreferros ensaiados. Observando-se que a maior densidade de fluxo (sem entreferro) fica em torno dos 1,2 T com uma permeabilidade relativa de 4000.

6.2 CARACTERÍSTICA DE DESMAGNETIZAÇÃO DO ÍMÃ 2

A fim de obter a característica de desmagnetização do ímã permanente 2 com os resultados de simulação utilizamos os valores obtidos de densidade de fluxo e aplicamos o fator K_c obtendo-se a Figura 108.

Tendo obtido a característica de desmagnetização tanto através da simulação como através das medições experimentais no HEV, fazemos a comparação dos dados obtidos.

Os pontos no gráfico da Figura 108 são tratados, procurando uma linha que mais se ajuste aos pontos de dados através de mínimos quadrados das distâncias verticais entre os pontos observados e os pontos da linha proposta (regressão linear). O valor R^2 revela o coeficiente de correlação de Pearson, indicando quanto de adaptação têm os pontos a uma linha.

Desmagnetização ímã 2 com MEGA

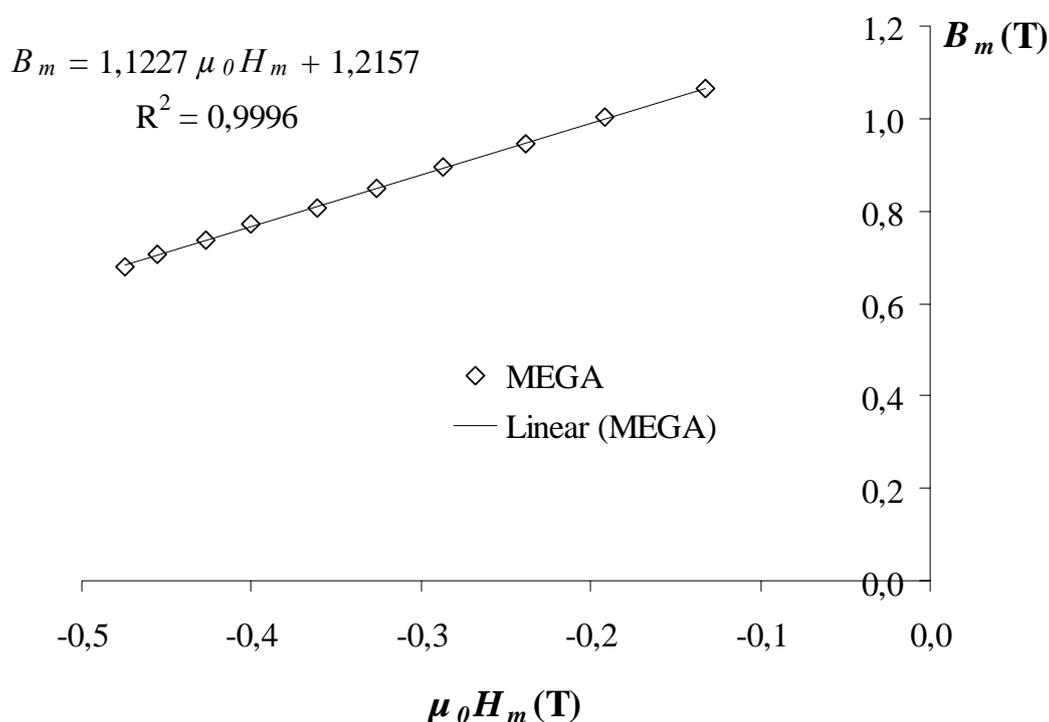


Figura 108. Característica de segundo quadrante do ímã 2 na simulação.

No caso ideal em que a correlação dos coeficientes é igual a 1 (*perfect fit*), a linha proposta é idêntica à linha que une os pontos de dados. A forma mais usual de expressar a linha reta é pela expressão

$$y = mx + b \quad (104)$$

onde procuramos a inclinação m , que, em nosso caso, se converte em $\mu_0 H_m$ ou simplesmente H_m dependendo do sistema de unidades utilizado, e a intersecção com o eixo vertical b , ou seja, B_r neste caso, dados por

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right) \left(\sum_{i=1}^N y_i \right)}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} = \mu_0 H \quad (105)$$

$$b = \frac{\left(\sum_{i=1}^N y_i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_i^2 \right) - \left(\sum_{i=1}^N x_i y_i \right) \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2} = B_r \quad (106)$$

onde N é o número total de pares de valores obtidos. Os desvios padrões das magnitudes anteriores podem ser calculados como

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{N \sigma_y^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} = \sigma_{\mu_0 H} \quad (107)$$

$$\sigma_b = \sqrt{\frac{\sigma_y^2 \sum_{i=1}^N x_i^2}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^N x_i \right)^2}} = \sigma_{B_r} \quad (108)$$

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m x_i + b - y_i)^2 = \sigma_B^2 \quad (109)$$

Aplicando estes resultados à expressão da linha encontrada para a simulação no MEGA com o ímã permanente 2, a equação linear $y = 1,1227x + 1,2157$ com $R^2 = 0,9996$, Figura 108, pode ser escrita como

$$B_m = \mu_r H_m + B_r \quad (110)$$

Portanto, os valores dos parâmetros do ímã permanente 2 obtidos através do HEV simulado são:

$$\begin{aligned} B_r &= 1,2157 \text{ T}; & \mu_r &= 1,1227 \\ \mu_0 H_c &= B_r / \mu_r = 1,083 \text{ T}; & H_c &= 861,7 \text{ kA/m} = 10.828 \text{ Oe.} \end{aligned}$$

Para o cálculo de $(BH)_{max}$ fazemos:

$$B_m H_m = \mu_r H_m^2 + H_m B_r \Rightarrow \frac{d(BH)}{dH} = 2\mu_r H_m + B_r = 0 \Rightarrow H_m = -\frac{B_r}{2\mu_r} = -\frac{H_c}{2} \quad (111)$$

Substituindo este valor em (110)

$$B_m = -\mu_r \frac{H_c}{2} + B_r = -\frac{B_r}{2} + B_r = \frac{B_r}{2} \quad (112)$$

$$(BH)_{\max} = \frac{B_r}{2} \frac{H_c}{2} = 261,9 \text{ kJ/m}^3$$

Dado que na simulação obtivemos valores de cálculo e que logo produziram valores dos parâmetros através de mínimos quadrados, as incertezas que podemos calcular serão as determinadas pelas equações (107) a (109) devidas ao tratamento estatístico:

$$\sigma_B = 0,002 \text{ T}; \quad \sigma_{B_r} = 0,003 \text{ T}; \quad \sigma_\mu = 0,008 \quad (113)$$

Entretanto, para os seguintes resultados das medições experimentais no HEV teremos que incluir as incertezas dos instrumentos e do método de medição.

No caso do ímã permanente 2 testado pelo HEV, cujos resultados experimentais são apresentados na Tabela 19 e Figura 103, esse apresenta a equação linear $B_m = 1,0652 \mu_0 H_m + 1,2164$ com $R^2 = 0,9998$ que correspondem aos seguintes valores do ímã:

$$B_r = 1,2164 \text{ T} = 12.164 \text{ G}$$

$$\mu_r = 1,0652 \Rightarrow \mu_m = \mu_r \mu_0 = 1,34 \times 10^{-6} \text{ H/m}$$

$$\mu_0 H_c = \frac{B_r}{\mu_r} \quad (114)$$

$$\mu_0 H_c = 1,142 \text{ T}; \quad H_c = 908,731 \text{ kA/m} = 11.419 \text{ Oe}$$

$$(BH)_{\max} = \frac{B_r}{2} \frac{H_c}{2} = 276,3 \text{ kJ/m}^3$$

As incertezas serão obtidas logo, considerando as parcelas estatísticas e as devidas aos instrumentos e ao método utilizado.

6.3 CARACTERÍSTICA DE DESMAGNETIZAÇÃO DO ÍMÃ 3

Por sua vez, o ímã permanente 3 como testado experimentalmente apresentou os resultados que são expostos na Tabela 23 e Figura 106.

A expressão encontrada foi $B_m = 1,0588 \mu_0 H_m + 1,226$ com $R^2 = 0,9998$ que corresponde aos seguintes valores do ímã:

$$B_r = 1,226 \text{ T} = 12.260 \text{ G} \quad \mu_r = 1,0588$$

$$\mu_0 H_c = 1,158 \text{ T}; \quad H_c = 921,439 \text{ kA/m} = 11.579 \text{ Oe}$$

$$(BH)_{\max} = \frac{B_r}{2} \frac{H_c}{2} = 266,8 \text{ kJ/m}^3$$

6.4 DETERMINAÇÃO E CÁLCULO DE INCERTEZAS

Para obter uma estimativa das incertezas na determinação dos principais parâmetros de um ímã permanente com o HEV temos que considerar as incertezas introduzidas pelos instrumentos e o método de medição utilizado.

6.4.1 Fontes ou causas de incerteza

Em todo processo de medição de um conjunto de variáveis que definem um determinado dispositivo participam diferentes fatores que podem ser avaliados estatisticamente (avaliação tipo A) ou por outros métodos (avaliação tipo B).

Para tanto, considere-se:

1. Já foram apresentados os aspectos de um circuito magnético que apresentam dificuldades para serem dimensionados; em parte esta situação de geração de grande incerteza é considerada neste trabalho e superada ao incluir um fator de perdas gerais K_c obtido a partir de um ímã permanente padrão;
2. Na metodologia da medição da densidade de fluxo B_m podem ser identificados, entre outros, como fatores de incerteza
 - (a) a própria exatidão dos instrumentos utilizados,
 - (b) os coeficientes de temperatura dos instrumentos e da sonda,
 - (c) a posição da sonda, tanto no centro geométrico da face superior do ímã como do ângulo da sonda com respeito à mesma superfície, e
 - (d) a determinação das condições iniciais de cada medição.

Os instrumentos que participaram das medições de densidade de fluxo e parâmetros relacionados no HEV são apresentados na Tabela 25.

Tabela 25. Especificações principais dos instrumentos utilizados no HEV.

Instrumento	Modelo	Resolução	Exatidão	Coefficiente de Temperatura
Gaussímetro Hirst	GM05	1mT ¹	±1% ²	±0,1% de leitura/°C ³
Paquímetro Mitutoyo	500-196	0,01 mm	±0,02 mm	NE ⁴
Relógio comparador Mitutoyo	1044F	0,01 mm	±0,013 mm	NE ⁴

¹ Esta resolução corresponde à escala de 0 a 3 T utilizada nas medições.

² A exatidão é declarada a 20°C.

³ O coeficiente de temperatura inclui a sonda.

⁴ NE magnitude não especificada.

6.4.2 Condições ambientais das medições

As medições de densidade de fluxo no HEV foram realizadas a uma temperatura ambiente de 25°C e umidade relativa de 53%.

6.4.3 Condições e características particulares das medições

As seguintes são condições específicas que envolvem as medições de densidade de fluxo no HEV:

- a) em 5.4 foi apresentado através da Figura 99 e da Figura 100 os detalhes em relação à sonda e a seu posicionamento adequado no centro do ímã permanente;
- b) foi realizada uma avaliação externa da sonda com o gabarito conferindo as medidas com o paquímetro 100-196. No que se refere ao ângulo da sonda com respeito à superfície do ímã, o critério adotado neste trabalho é de desprezar o erro cometido neste aspecto, tendo em conta que a geometria da sonda permite apoiar sua superfície sobre o ímã perfeitamente, não se constatando visualmente ângulo de afastamento.

6.4.4 Avaliação das incertezas dos instrumentos

Para uma estimativa x_i de uma grandeza de entrada X_i que não tenha sido obtida através de observações repetidas, a variância estimada associada $u^2(x_i)$ e/ou a incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico, baseando-se em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . O conjunto de informações pode incluir [ABNT, 1998]:

- dados de medições prévias;
- a experiência ou o conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais e instrumentos relevantes;
- especificações do fabricante;
- dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- incertezas relacionadas a dados de referência extraídos de manuais.

Para maior conveniência, $u^2(x_i)$ e $u(x_i)$ estimados dessa maneira são referidos como *variância do Tipo B* e *incerteza padrão de Tipo B* respectivamente.

No caso específico dos instrumentos já introduzidos anteriormente na Tabela 25, podemos estimar somente fronteiras (limites superior e inferior) para as grandezas medidas, em

particular, para afirmar que “a probabilidade de que o valor X_i esteja dentro do intervalo a . até a_+ para todos os fins práticos, é igual a um, e a probabilidade de X_i esteja fora deste intervalo é, essencialmente, zero”. Se não há conhecimento específico sobre os valores possíveis de X_i dentro do intervalo, pode-se apenas supor que é igualmente provável que X_i esteja em qualquer lugar dentro dele (uma distribuição uniforme ou retangular de valores possíveis). Então x_i , a esperança ou valor esperado de X_i , é o ponto médio no intervalo $x_i = (a. + a_+)/2$, com a variância associada: $u^2(x_i) = (a. + a_+)^2/12$. Se a diferença entre os limites, $(a. - a_+)$, é designada por $2a$, então a expressão anterior torna-se: $u^2(x_i) = a^2/3$.

Tabela 26. Incertezas dos instrumentos utilizados no HEV.

Instrumento	a	Variância	Incerteza padrão u
GM05	0,010 ¹ T / 0,005 ² T	7,5x10 ⁻⁵	0,006 ³ T
500-196	0,02 mm	1,333x10 ⁻⁴	0,012 mm
1044F	0,013 mm	5,633x10 ⁻⁵	0,008 mm

¹ Componente da imprecisão do gaussímetro: a meia-largura a da distribuição retangular simétrica de valores possíveis de B formada por 0,01 T devida à especificação de 1%;

² Componente devida ao coeficiente de temperatura do gaussímetro: e 0,005 T pelo 0,1% de leitura/°C e $\Delta T = 5$ °C na faixa de 1 T;

³ Avaliação feita como soma dos quadrados das componentes já mencionadas anteriormente.

6.4.5 Determinação das incertezas nos parâmetros do ímã

Com o objetivo de simplificar esta análise de incertezas será suposta uma experiência de medição em que os dados são obtidos com dois entreferrros. Sabendo que com ao menos dois pares de pontos determinados no segundo quadrante B - H podemos determinar a inclinação da característica de desmagnetização, desde que suposta linear, da seguinte maneira:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \Rightarrow \mu_r \mu_0 = \frac{\Delta B_m}{\Delta H_m} \Rightarrow \mu_r = \frac{\Delta B_m}{\Delta(\mu_0 H_m)} \quad (115)$$

A variância combinada da permeabilidade de retorno do ímã permanente pode ser então calculada como

$$u_c^2(\mu_r) = \left[\frac{\partial \mu_r}{\partial(\Delta B_m)} \right]^2 u_c^2(B_m) + \left[\frac{\partial \mu_r}{\partial(\Delta H_m)} \right]^2 u_c^2(H_m) \quad (116)$$

onde $u_c^2(B_m)$ é a variância combinada na determinação da densidade de fluxo magnético no entreferro. Inclui uma componente com avaliação Tipo A de tipo estatístico em relação às medições feitas em abertura e fechamento do entreferro, e uma outra componente com avaliação de Tipo B com as incertezas providenciadas pelas especificações dos instrumentos que participam na medição.

Por sua vez, por ser H_m calculado pela equação

$$\mu_0 H_m = -B_m \left(\frac{l_g}{l_m} \right) \frac{1}{K_c} \quad (117)$$

a variância combinada $u_c^2(H_m)$ terá incluída as variâncias devidas ao B_m , l_g , l_m e o K_c :

$$\begin{aligned} u_c^2(H_m) = & \left[\frac{\partial(\mu_0 H_m)}{\partial B_m} \right]^2 u_c^2(B_m) + \left[\frac{\partial(\mu_0 H_m)}{\partial l_g} \right]^2 u^2(l_g) + \\ & + \left[\frac{\partial(\mu_0 H_m)}{\partial l_m} \right]^2 u^2(l_m) + \left[\frac{\partial(\mu_0 H_m)}{\partial K_c} \right]^2 u_c^2(K_c) \end{aligned} \quad (118)$$

onde $K_c = \frac{\mu_{rv} l_g B_m}{l_m (B_{rv} - B_m)}$ é o fator de perdas gerais do HEV obtido com medições feitas sobre

um ímã padrão e cuja variância combinada é:

$$\begin{aligned} u_c^2(K_c) = & \left(\frac{\partial K_c}{\partial \mu_{rv}} \right)^2 u^2(\mu_{rv}) + \left(\frac{\partial K_c}{\partial l_g} \right)^2 u^2(l_g) + \left(\frac{\partial K_c}{\partial B_m} \right)^2 u_c^2(B_m) + \\ & + \left(\frac{\partial K_c}{\partial l_m} \right)^2 u^2(l_m) + \left(\frac{\partial K_c}{\partial B_r} \right)^2 u^2(B_r) \end{aligned} \quad (119)$$

A incerteza combinada de B_m , considerando a estatística das medições e as especificações dos instrumentos, é

$$\begin{aligned} u_c^2(B_m) = & \left[\frac{\partial B_m}{\partial l_g} \right]^2 u^2(l_g) + \left[\frac{\partial B_m}{\partial \bar{B}_m} \right]^2 u^2(\bar{B}_m) + \left[\frac{\partial B_m}{\partial \phi} \right]^2 u^2(\phi) + \\ & + \left[\frac{\partial B_m}{\partial \Delta B_m} \right]^2 u^2(\Delta B_m) + \left[\frac{\partial B_m}{\partial T} \right]^2 u^2(T) \end{aligned} \quad (120)$$

O primeiro termo é a dependência da densidade de fluxo devido a l_g , o segundo termo é a avaliação de Tipo A (estatística) da medição no entreferro, o terceiro termo é a variação da densidade de fluxo com a variação do ângulo da sonda e do posicionamento com o gabarito, o quarto termo corresponde as especificações de exatidão do instrumento e o último termo corresponde às variações da densidade de fluxo com a temperatura. Estes dois últimos termos já foram calculados anteriormente. O terceiro será considerado desprezível por considerações de posicionamento da sonda já explicitadas anteriormente.

Conhecendo a inclinação (permeabilidade de retorno) podemos calcular o B_r :

$$B_r = B_1 + \mu_r H_1 \quad (121)$$

e a sua respectiva variância

$$u_c^2(B_r) = \left[\frac{\partial B_r}{\partial B_m} \right]^2 u_c^2(B_m) + \left[\frac{\partial B_r}{\partial H_m} \right]^2 u_c^2(H_m) + \left[\frac{\partial B_r}{\partial \mu_r} \right]^2 u_c^2(\mu_r) \quad (122)$$

Conhecendo μ_r e B_r podemos calcular o H_c

$$H_c = \frac{B_r}{\mu_r} \quad (123)$$

e a incerteza combinada

$$u_c^2(H_c) = \left[\frac{\partial H_c}{\partial B_r} \right]^2 u_c^2(B_r) + \left[\frac{\partial H_c}{\partial \mu_r} \right]^2 u_c^2(\mu_r) \quad (124)$$

Resta a determinação do $(BH)_{\max}$

$$(BH)_{\max} = \frac{B_r}{2} \frac{H_c}{2} \quad (125)$$

e a incerteza combinada

$$u_c^2[(BH)_{\max}] = \left[\frac{\partial (BH)_{\max}}{\partial B_r} \right]^2 u_c^2(B_r) + \left[\frac{\partial (BH)_{\max}}{\partial H_c} \right]^2 u_c^2(H_c) \quad (126)$$

Na Tabela 27 são expressos os resultados das determinações das incertezas.

Tabela 27. Resultados dos cálculos das incertezas nas medições no HEV.

Grandeza	Amostra	Variância	Incerteza
μ_r	1	0,001	0,030
	2	0,001	0,029
	3	0,001	0,030
B_r (T)	1	0,0001	0,011
	2	0,0001	0,011
	3	0,0001	0,012
H_c (kA/m)	1	712	27
	2	670	26
	3	773	28
$(BH)_{\max}$ (kJ/m ³)	1	72,8	8,5
	2	67,8	8,2
	3	79,1	8,9

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 [ABNT, 1998]. 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 :

$$U = ku_c(y) \quad (127)$$

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

$$Y = y \pm U \quad (128)$$

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

$$y - U \leq Y \leq y + U \quad (129)$$

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. Neste trabalho é suposto que com um $k = 2$ é produzido um intervalo tendo um nível da confiança de aproximadamente 95%. Os valores finais de incerteza expandida calculados por (127) com $k = 2$ são incorporados na Tabela 28 e na Tabela 29.

6.5 COMPARAÇÃO GERAL ENTRE ÍMÃS

A seguir são comparados os valores verdadeiros convencionais obtidos nas medições experimentais no HEV e nas simulações no MEGA. Também são incorporadas as incertezas expandidas em todas as medições tanto experimentais como em simulação e tanto para o ímã permanente 0065-02 como para o 0065-03.

Tabela 28. Comparação de resultados obtidos para o ímã permanente 2 (IPT 0065-02).

	IPT	HEV		MEGA	
	Valor	Valor ¹	Variação % ²	Valor ³	Variação % ²
B_r (T)	1,221±0,014	1,216±0,022	-0,4	1,216±0,006	-0,4
H_c (kA/m)	910±16	909±52	-0,1	862±13	-5
$(BH)máx$ (kJ/m ³)	276,1±6,4	276±16	-0,04	262±2	-5
μ_r	1,067±0,022	1,07±0,06	0,3	1,123±0,016	5
Característica desmagnetizante	$B_m = 1,067 \mu_0 H_m + 1,221$	$B_m = 1,07 \mu_0 H_m + 1,216$		$B_m = 1,123 \mu_0 H_m + 1,216$	

¹ O Valor foi calculado em 6.2 e a incerteza expandida obtém-se da Tabela 27 considerando-se um fator de abrangência k igual a 2.

² O cálculo da variação é feita considerando como valor verdadeiro aquele obtido no IPT.

³ O Valor foi calculado em 6.2 e a incerteza expandida obtém-se de (113) e um fator de abrangência k igual a 2.

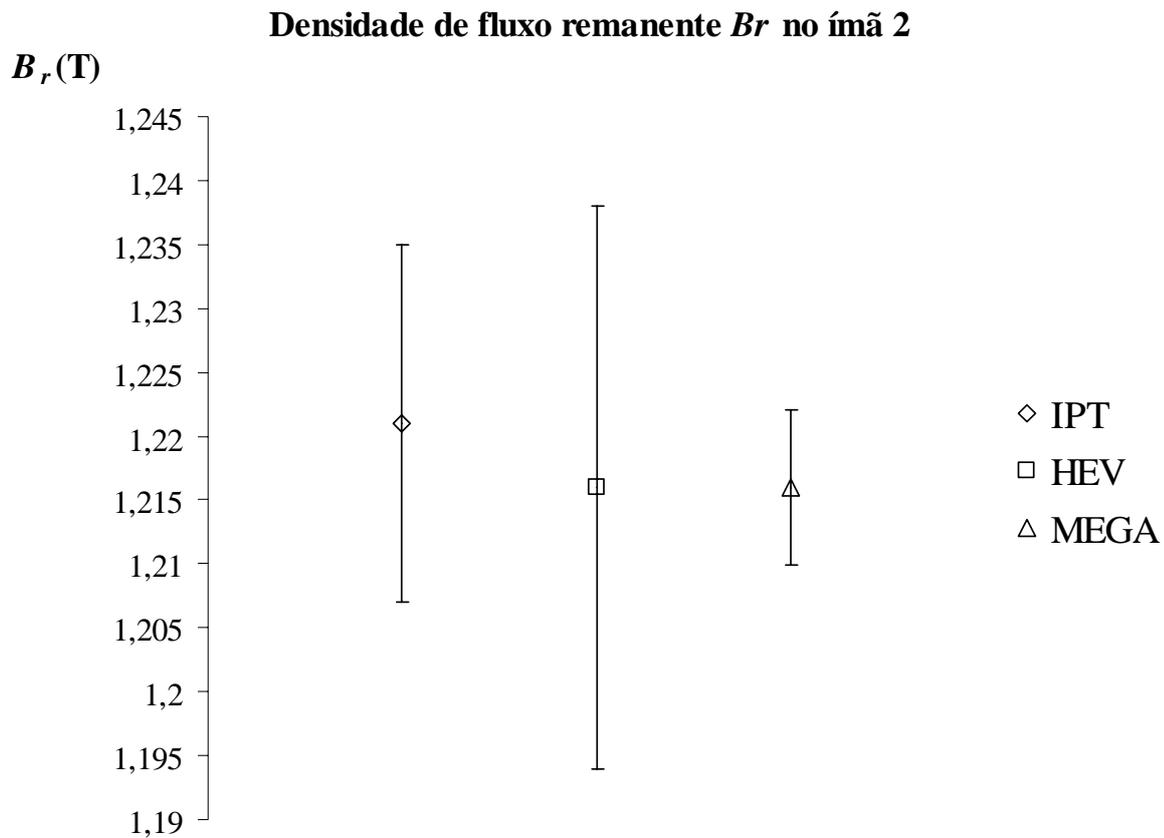
Tabela 29. Comparação de resultados obtidos para o ímã permanente 3 (IPT 0065-03).

	IPT	HEV	
	Valor	Valor ¹	Variação % ²
B_r (T)	1,219±0,014	1,226±0,024	0,6
H_c (kA/m)	912±16	921±56	1
$(BH)_{máx}$ (kJ/m ³)	277,3±7,2	282±18	1,7
μ_r	1,064±0,023	1,06±0,06	-0,4
Característica Desmagnetizante	$B_m = 1,064 \mu_0 H_m + 1,219$	$B_m = 1,06 \mu_0 H_m + 1,226$	

¹ O Valor foi calculado em 6.3 e a incerteza expandida obtém-se da Tabela 27 considerando-se um fator de abrangência k igual a 2.

² O cálculo da variação é feita considerando como valor verdadeiro aquele obtido no IPT.

Sendo que o ímã permanente 2 foi o único testado nas três opções (no IPT, no HEV e no simulador MEGA), são apresentadas na Figura 109, 110, na Figura 111 e na Figura 112 as comparações gráficas dos dados da Tabela 28 da densidade de fluxo remanente B_r , coercitividade H_c , máximo produto energético $(BH)_{max}$ e permeabilidade de retorno μ_r com seus respectivos intervalos abrangentes.

Figura 109. Densidade de fluxo remanente B_r do ímã 2 com seus intervalos de abrangência.

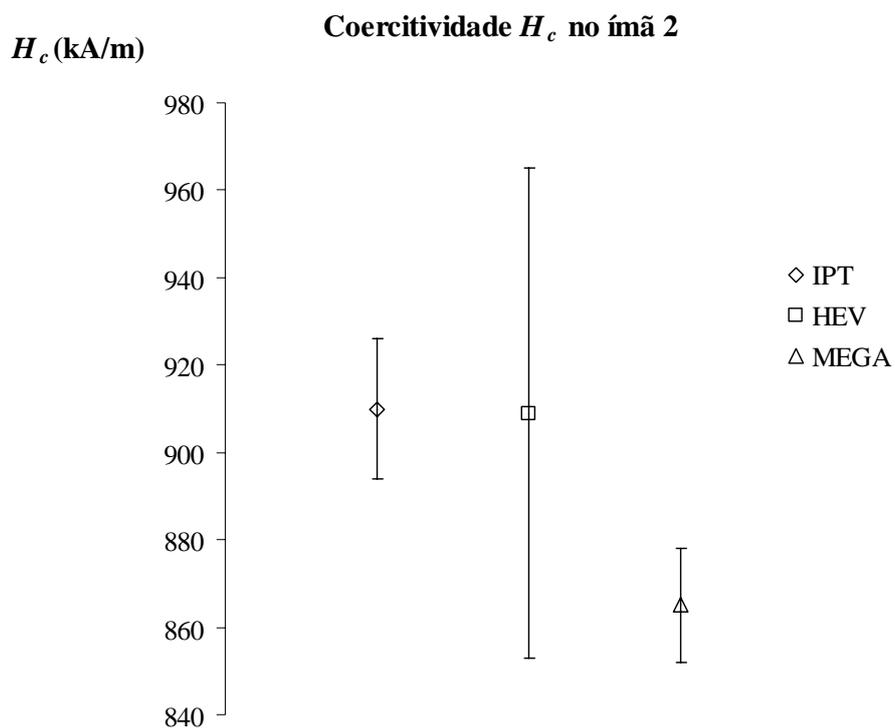


Figura 110. Coercitividade H_c no ímã permanente 2 com seus intervalos de abrangência.

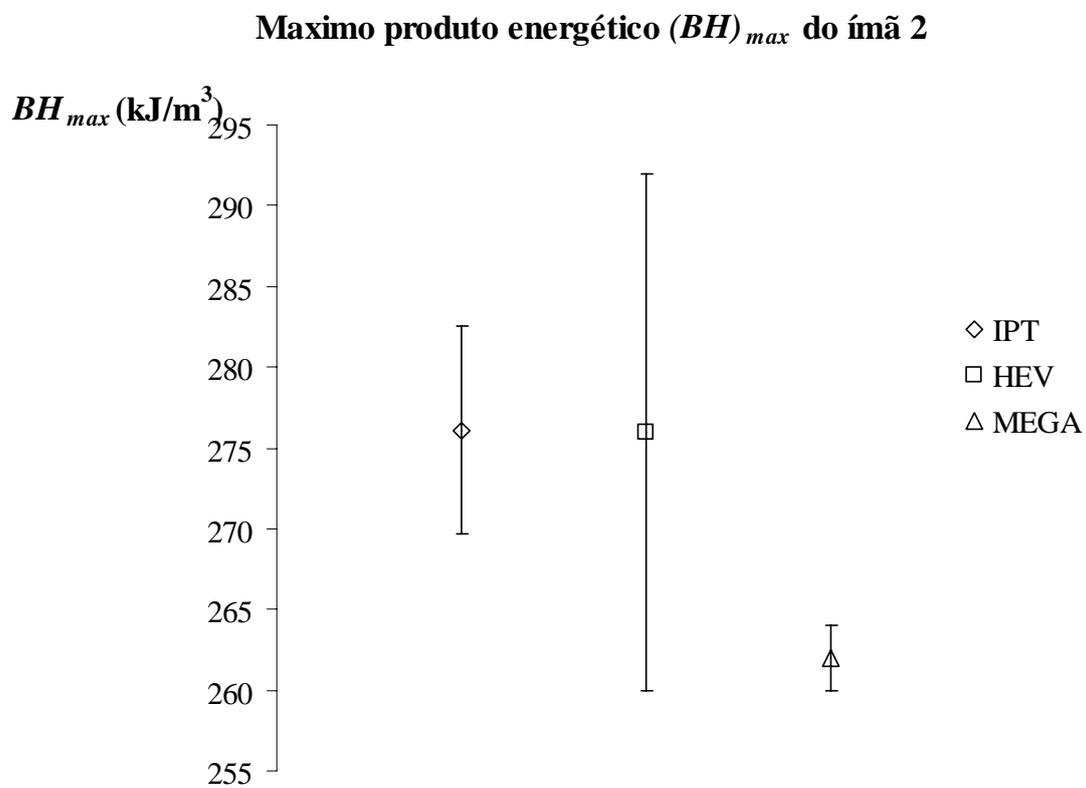


Figura 111. Máximo produto energético $(BH)_{max}$ no ímã 2 com seus intervalos de abrangência.

Permeabilidade de retorno μ_r no ímã 2

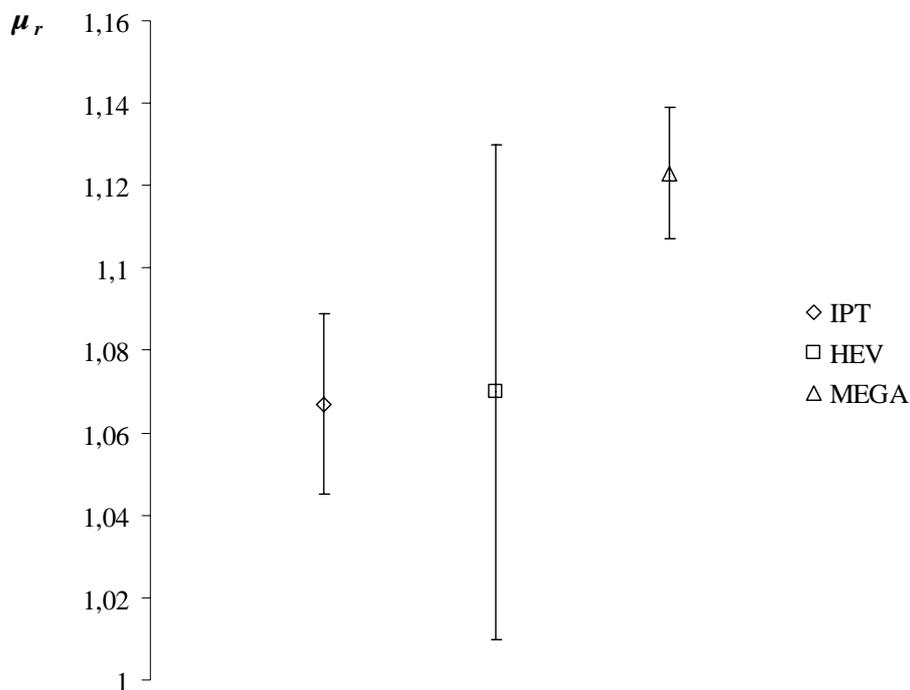


Figura 112. Permeabilidade de retorno no ímã permanente 2 com seus intervalos de abrangências.

Comparação características de desmagnetização do ímã 2

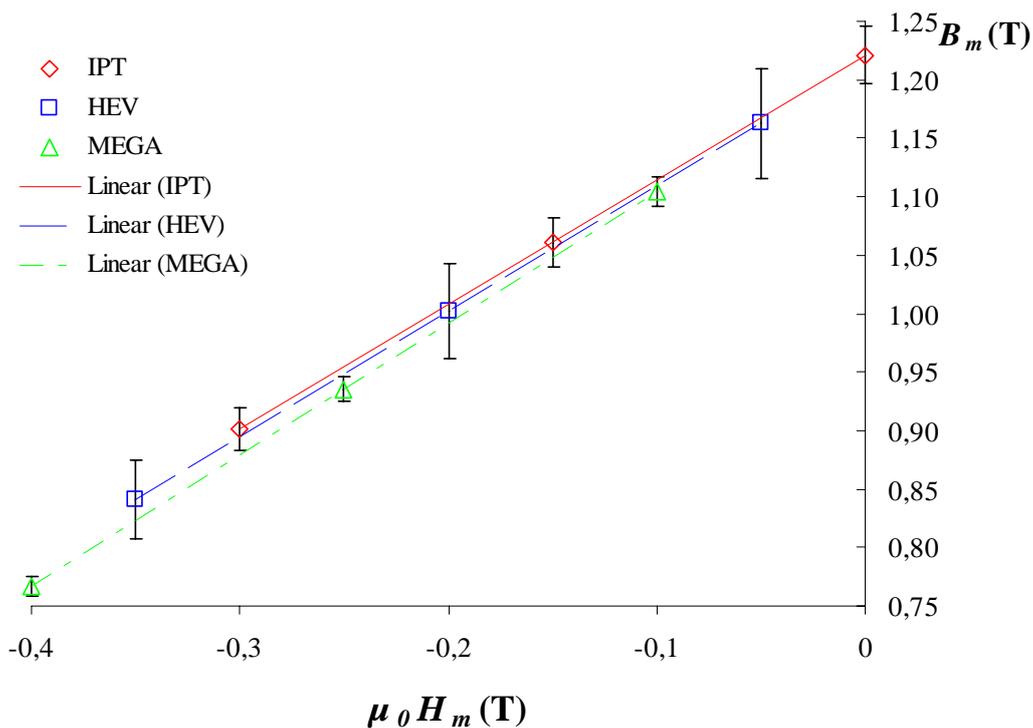


Figura 113. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.

Comparação características de desmagnetização do ímã 3

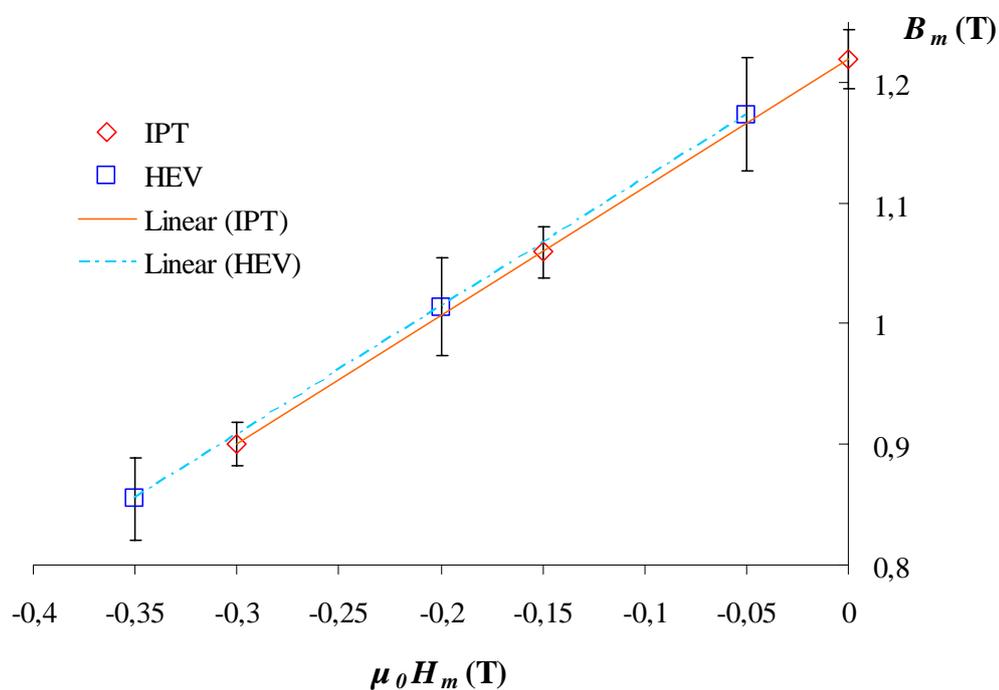


Figura 114. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.

Comparação características de desmagnetização dos ímãs 2 e 3

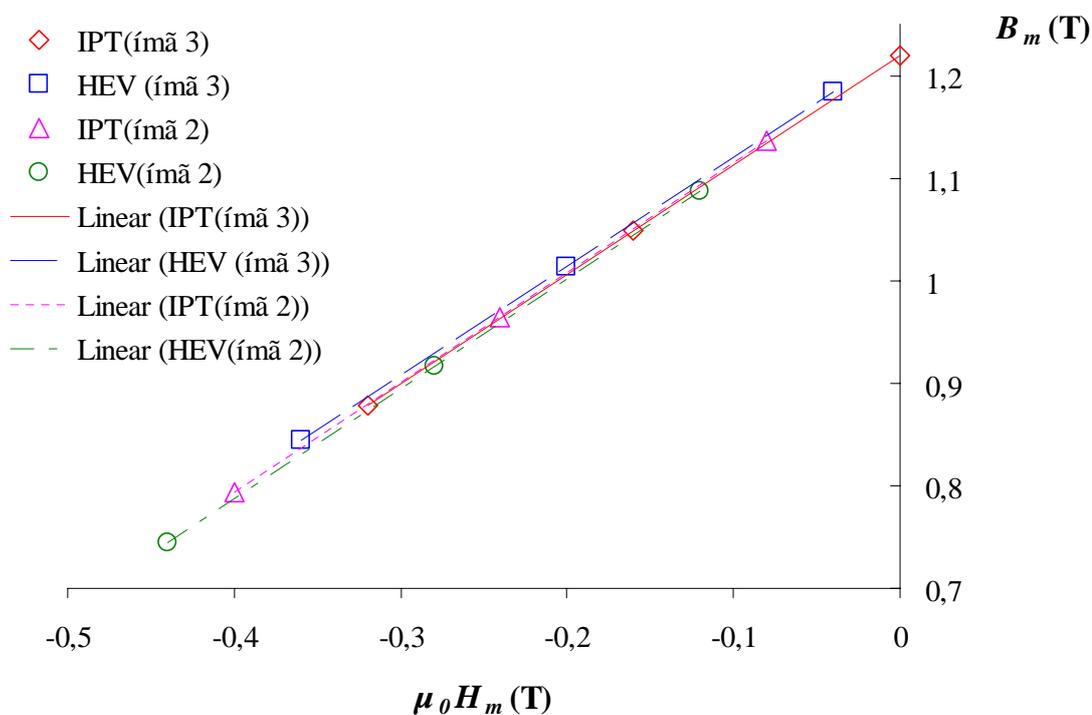


Figura 115. Comparação de desmagnetização do ímã 2 nos testes.

Embora não possa ser considerada uma grande população de ímãs os testados, da Tabela 28 e da Tabela 29, e da Figura 109 à Figura 113 pode-se observar que, ainda havendo utilizado as considerações de máxima incerteza, é evidente a excelente resposta do HEV na determinação dos parâmetros fundamentais dos ímãs permanentes utilizados.

Na simulação, como já foi mencionada na obtenção dos resultados (113), a incerteza expandida observada nos resultados da simulação da Tabela 28, evidenciada na Figura 109 até a Figura 113, mostram valores menores que os próprios do IPT. Isto é devido a que na sua obtenção foram utilizados somente procedimentos estatísticos de regressão linear. Também é possível observar uma discordância apreciável da característica de desmagnetização do ímã permanente 2 simulado em relação ao obtido no IPT e ao HEV (medidas experimentais) por quanto os resultados de simulação foram afetados por um fator de correção K_c inerente ao protótipo HEV e não ao modelo feito no MEGA. Mas como o objetivo fundamental foi comparar os resultados experimentais com os obtidos no IPT, a decisão foi não desenvolver um fator específico para o modelo na simulação.

Porém assim como ressalta das tabelas e figuras já mencionadas a estreita concordância dos valores experimentais do HEV com os do IPT, também ressalta a diferença de incertezas expandidas. O lote reduzido de amostras e a pequena dispersão de suas características entre si não permitem qualificar apropriadamente o HEV. E, por outro lado, a relativa grande incerteza expandida, produto de um método de medição e determinação indireto das características do ímã que adicionam erros em cada passo de cálculo, só permitem obter especificações na determinação do B_r dentro da norma IEC 404-5 estabelecida em $\pm 2\%$. Os outros parâmetros, ou seja, H_c , $(BH)_{max}$ e μ_r , podem ser determinados no HEV com $\pm 6\%$ de incerteza o que para a norma deve ser determinado dentro de um 2% para o primeiro (H_c) e com 3% os dois restantes.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Neste trabalho apresentou-se uma alternativa de caracterização de ímãs permanentes. Embora haja limitações ao seu uso, os resultados podem ser considerados muito satisfatórios. Estes resultados foram validados com os testes padronizados feitos em ímãs permanentes e com simulação por elementos finitos.

Para os testes foram usados três ímãs permanentes de NdFeB previamente testados no Instituto de Pesquisas Tecnológicas, IPT. Um deles foi usado como padrão na definição de um fator de perdas gerais no HEV que levasse em conta os efeitos das quedas magnéticas na culatra, os entreferros construtivos, o fluxo disperso e de espraiamento. Com os outros dois ímãs permanentes restantes foram feitos os testes no HEV e a comparação com a simulação no MEGA.

Das comparações feitas dos resultados das medições e das simulações é possível apreciar uma concordância do modelo no MEGA com o HEV, ressaltadas as diferenças estabelecidas pelos fatores não incluídos no modelo como os entreferros do braço central e aqueles formados na inserção dos cabeçotes niquelados (entreferros construtivos).

A análise de incerteza feita para com os resultados da simulação apresenta valores muito baixos que derivam da observação de somente uma incerteza estatística da regressão linear aplicada. No outro extremo, a análise de pior caso feita com as incertezas que realmente participam nas medições no HEV levou a resultados bem mais reais. Em outras palavras, os resultados da Tabela 28 e Tabela 29 com porcentagens de exatidão abaixo de 0,5% poderiam considerar-se irreais dada a baixa população disponível de ímãs permanentes para serem testados. No entanto, os resultados de incerteza de 6% ao redor do valor verdadeiro convencional (V.V.C.) poderiam estar indicando o verdadeiro entorno de exatidão das medições com o HEV. Na maneira de expressar em [DOEBELIN, 1983] poderíamos dizer: possivelmente o erro na determinação dos parâmetros H_c ; μ_r e $(BH)_{max}$ atinja os 6% mas, provavelmente seja de 2% .

O único parâmetro que ficou nas incertezas com nível da confiança perto de 2% é a densidade de fluxo remanente B_r que, por ter leituras de entreferro muito perto de circuito fechado, é compreensível ter uma exatidão maior que a dos outros parâmetros que, por extrapolação, tiveram seus valores diminuídos em exatidão. Nesse parâmetro as probabilidades de obter erros menores que 2% nas determinações é maior que 95%.

Lembrando que a norma IEC 404-5 descrita no capítulo 1 estabelece a determinação dos parâmetros dos ímãs permanentes de Terras Raras e Cerâmicos com erros não maiores que 2% para B_r e H_c e 3% para o $(BH)_{max}$, considera-se que este instrumento, o HEV cumpre com tais condições em quanto se refere ao B_r .

Tendo sido utilizado com frequência diária ao longo de dois meses, este instrumento evidenciou repetitividade na suas leituras o qual foi evidenciado nas provas, demonstrando sua aptidão para caracterizar ímãs permanentes.

Por conseguinte, este instrumento considera-se adequado para caracterizar:

- ímãs permanentes de Terras Raras e Cerâmicos;
- trabalhando a temperatura ambiente;
- com dimensões particulares estabelecidas pelo cabeçote utilizado; e
- a um custo bem menor que os instrumentos convencionais.

A continuidade deste trabalho poderá contemplar os seguintes aspectos:

- a modificação dos cabeçotes para caracterizar outros tipos de ímãs permanentes;
- o desenvolvimento do estudo analítico da distribuição da densidade de fluxo magnético no entreferro e sua correlação com a obtenção da característica desmagnetizante de um ímã permanente através do HEV;
- um estudo mais detalhado da propagação de erros na determinação da incerteza expandida;
- um estudo da utilização de uma curva obtida por quadrados mínimos do fator de calibração K_c .
- um estudo de como diminuir os erros na determinação de H_c e de $(BH)_{max}$ através do HEV;
- o desenvolvimento de um sistema de posicionamento da sonda com três graus de liberdade e precisão da ordem da medição do entreferro.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA de NORMAS TÉCNICAS. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**. Rio de Janeiro, 1998.

BASAK, A. **Permanent Magnet DC Linear Motors**. Oxford: Clarendon, 1996, 185 p. ISBN 0-198-59392-9.

BUCK, J. Automatic Hysteresisgraph Speeds Accurate Analysis of Soft Magnetic Materials. PCIM February 2000. **Versão on-line**. Disponível em: <<http://www.walkerscientific.com/articles/buck.pdf>>. Acesso em: 2006.

CAMPBELL, P. **Permanent Magnet Materials and their Application**. Cambridge: University Press, 1994, 207 p. ISBN 0-521-24996-1.

CAMPOS, M. F. de, et al. Coercivity Mechanisms in SmCo₅ Magnets. In: RARE-EARTH MAGNETS AND THEIR APPLICATIONS, 15; 1998, Dresden (Germany). **Proceedings...** Frankfurt: Werkstoff-Informationsgesellschaft, 1998, v. 1 – p. 127-136.

CHIKAZUMI, S. **Physics of Magnetism**. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1964, 554 p. ASIN: B0007DODNA.

COMPTON, J. C.; VAN DER VEEN, J. L. F. Magnet Analysis with a Helmholtz Coil Set. In: **IEE Proceedings in Science, Measurement and Technology**, [S. l.], v. 150, n. 4, p. 177-182, 2003.

CULLITY, B. D. **Introduction to Magnetic Materials**. Massachusetts: Addison-Wesley, 1972. 666 p. ISBN 0-201-01218-9.

DOEBELIN, E. O. **Measurement Systems: application and design**. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1983. 876 p. ISBN 0-07-017337-0.

EAMAGNETICS, **Versão on-line**. Disponível em: <<http://www.eamagnetics.com>>. Acesso em: março 2007.

FARIA, R. N.; LIMA, L. F. C. P. **Introdução ao Magnetismo dos Materiais**. São Paulo: Livraria da Física, 2005. 192 p.

FLORES FILHO, A. F. **Ímãs Permanentes**. Porto Alegre: DELET-UFRGS, p. 47, 2003. Apostila.

FONER, S. Review of Magnetometry. **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 17, n. 6. p. 3358-3363, nov. 1981.

FONER, S. The Vibrating Sample Magnetometer: Experiences of a volunteer (invited). **Journal of Applied Physics**, Woodbury, v. 79, n. 8, p. 4740-4745, abr. 1996.

FONER, S. Versatile and Sensitive Vibrating-Sample Magnetometer. **The Review of Scientific Instruments**, [S. l.], v. 30, n. 7, p. 548-557, 1959.

FRANZEN, W. Generation of Uniform Magnetic Fields by Means of Air-core Coils, **The Review of Scientific Instruments**, [S. l.], v. 33, n. 9, p. 933-938, sep. 1962.

FURLANI, E. P. **Permanent Magnet and Electromechanical Devices: materials, analysis, and applications**. San Diego: Academic Press, 2001. 519 p. ISBN: 0-12-269951-3.

FWBELL, **Versão on-line**. Disponível em: <<http://www.fwbell.com>>. Acesso: em março 2006.

GARRET, M. W. Axially Symmetric Systems for Generating and Measuring Magnetic Fields. **Journal of Applied Physics**, Woodbury, v. 22, n. 9, p. 1091-1107, sep. 1951.

GIERAS, J. F.; WING, M. **Permanent Magnet Motor Technology: design and applications**. New York: Marcel Decker, Inc., 1997. 440 p. ISBN: 0-8247-9794-9.

GRÖSSINGER, R. Pulsed Field Magnetometry. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 29, n. 6. p. 2980-2982, nov. 1993.

GRÖSSINGER, R. Calibration of an Industrial Pulsed Field Magnetometer. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 38, n. 5. p. 2982-2984, sep. 2002.

GUPTA R.; YOSHINO T.; SAITO Y. Finite Element Solution of Permanent Magnetic Field. **IEEE Transactions on Magnetics**, New York, v. 26, n. 2, mar. 1990.

HANSELMAN, D. C. **Brushless Permanent-Magnet Motor Design**. New York: McGraw-Hill, c1994. X, 191 p.

HENDERSHOT, J.R.; MILLER, T. J. E. **Design of Brushless Permanent-Magnet Motors**. Oxford: Magna Physics, 1994. 584 p.

HIRST MAGNETIC INSTRUMENTS LTD. **Versão on-line**. Disponível em: <<http://www.hirst-magnetics.com>> Acesso em março 2006.

INTERNATIONAL STANDARD Magnetic materials **IEC404-5** – Part 5: permanent magnet (magnetically hard) materials: methods of measurement of magnetic properties, Geneva, 1993.

JILES, D. **Introduction to Magnetism and Magnetic Materials**. London: Chapman & Hall, 1991. 397 p. ISBN: 0-412-38640-2.

KRAUS, J. D.; CARVER, K. R. **Eletromagnetismo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978. 780 p.

LAKESHORE. **Versão on-line**. Disponível em: <<http://www.lakeshore.com>>. Acesso em: março 2006.

LANDGRAF, F. J. G. **Comunicação interna**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas/USP. E-mail enviado em 2006.

MAGNET-PHYSIK. **Versão on-line**. Disponível em: <www.magnet-physik.de>. Acesso em: março 2006.

McCAIG, M.; CLEGG, A. G. **Permanent Magnets in Theory and Practice**. London: Pentech Press, 1987. 415 p. ISBN: 0-7273-1615-X.

McDONALD, D.; STEINGROEVER, E. Magnetic Potentiometer as an Aid in Testing and Analyzing Magnetic Devices. **AIP Journal of Applied Physic**, Woodbury, v. 49, n. 3, p. 1791-1793, mar. 1978.

MILLER, T. J. E. **Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives**. Oxford: Clarendon Press, 1993. 207 p.

MISSELL, F. P. Coercivity Mechanisms in Hard Magnetic Materials. **Magnetism, Magnetic Materials and their Applications**. La Habana, Cuba, p. 35-43, 1991.

MOSKOWITZ, L. R. **Permanent Magnet: design and application handbook**. Florida: Krieger Publishing Company, 1995. 213 p. ISBN: 0-89464-768-7.

PARKER, R. J. **Advances in Permanent Magnet**. New York: John Wiley & Sons, 1990. 337 p. ISBN: 0-471-82293-0.

PARKER, R. J. Understanding and Predicting Permanent Magnet Performance by Electrical Analog Methods, **Journal of Applied Physics**, Woodbury, v. 29, n. 3, p. 409-410, mar. 1958.

SALON, S. J., **Finite Element Analysis of Electrical Machines**. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995, p. 247.

SCHOESSOW, P.; JANKOWSKI, D.; TURNER, L. MINOS Toroid Magnetic Measurements. NUMI-L-347, 1998. **Versão on-line**. Disponível em: <<http://minos-docdb.fnal.gov/0003/000347/001/numi0347.ps.gz>>. Acesso em oct. 2006.

SENSORS Magazine Online, The Hall Effect Gaussmeter. Dec. 1997. **Versão on-line**. Disponível em: <<http://archives.sensorsmag.com/articles/1297/he1297/main.shtml>>. Acesso em: nov. 2006.

SHIRAZEE, N. A. et al., Analysis of Permanent Magnet Lifting Devices Using Finite Elements, **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 33, n. 2, mar. 1997.

SILVEIRA, M. A. da. **Estudo de um Atuador Planar**. 2003. 225 p. 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.

SIRCILLI, F. et al. Experimental Characterization of Permanent Magnets Used in Periodic Structures. **IEEE Transactions on Magnetism**, New York, v. 37, n. 3, p. 1106-1109, may 2001.

TROUT, S. R. Magnetic Testing of Bonded Magnets. In: NATO/ARW CONFERENCE ON BONDED MAGNETS, Newark, DE, USA, August 22 and 23, 2002. **Proceedings on-line**. Disponível em: <<http://spontaneousmaterials.com/Papers/NATO.pdf>>. Acesso em: sep. 2006.

TUMANSKI, S. Induction Coil Sensors: a review. **Measurement Science and Technology**, [S. l.], v. 18, p. 31-46, jan. 2007.

VACUUMSCHMELZE. **Versão on-line.** Disponível em: <[http://www.vacuumschmelze.de/dynamic/en/home/researchamp innovation/publications.php](http://www.vacuumschmelze.de/dynamic/en/home/researchamp%20innovation/publications.php)>. Acesso em: 2006.

WALKER SCIENTIFIC. **Versão on-line.** Disponível em: <<http://www.walkerldscientific.com>>. Acesso em: março 2006.

WRIGHT, W.; McCAIG, M. Permanent Magnets. **Engineering Design Guides 20.** Trevithick Library – Cardiff, 1977.

ANEXOS

RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº 3636-204

Cliente: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 103
90035-019 – Poa – RS

Item: Três ímãs de NdFeB

Natureza do trabalho: Caracterização magnética de três ímãs de NdFeB

Referência: Fax do comprovante de pagamento de 22/01/2007

DESCRIÇÃO DO ITEM

Três ímãs, identificados pelos n^{os} 0065-01, 0065-02 e 0065-03.

Obs.: Registrados no LME sob n^{o(s)} 0065/07.

MÉTODO UTILIZADO

Os ímãs de NdFeB foram fornecidos na forma retangular com 25,4mm de comprimento, 25,4mm de largura e 8,0mm de espessura. As propriedades magnéticas foram medidas em relação à direção normal às superfícies planas dos ímãs.

As medições foram efetuadas colocando-se o ímã entre as faces das peças polares de um eletroímã. Um sistema de bobinas, envolvendo o ímã, é conectado a dois fluxímetros digitais. Uma das bobinas mede o campo magnético (H), e a outra mede a polarização magnética, ou indução magnética intrínseca do ímã (J). O equipamento realiza o controle do campo magnético, e a aquisição de dados de forma autônoma, por meio de um software de controle.

Procedimento para caracterização magnética de cada ímã

- 1) O ímã foi inserido no Sistema automático de medição e geração de campo magnético e o campo magnético (H), e a polarização magnética (J) foram medidas.
- 2) O ímã foi magnetizado com campo pulsante de intensidade maior que 30kOe.
- 3) Os passos 1 e 2 foram repetidos.
- 4) Os passos 1, 2 e 3 foram repetidos para os outros dois ímãs.



RESULTADOS

Caracterização do ímã 0065-01

Br

V.V.C (T)	U ±(T)	k
1,219	0,014	2,00

BHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
276,3	6,4	2,00

HcB

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
911	16	2,00

Hknee

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1101	20	2,02

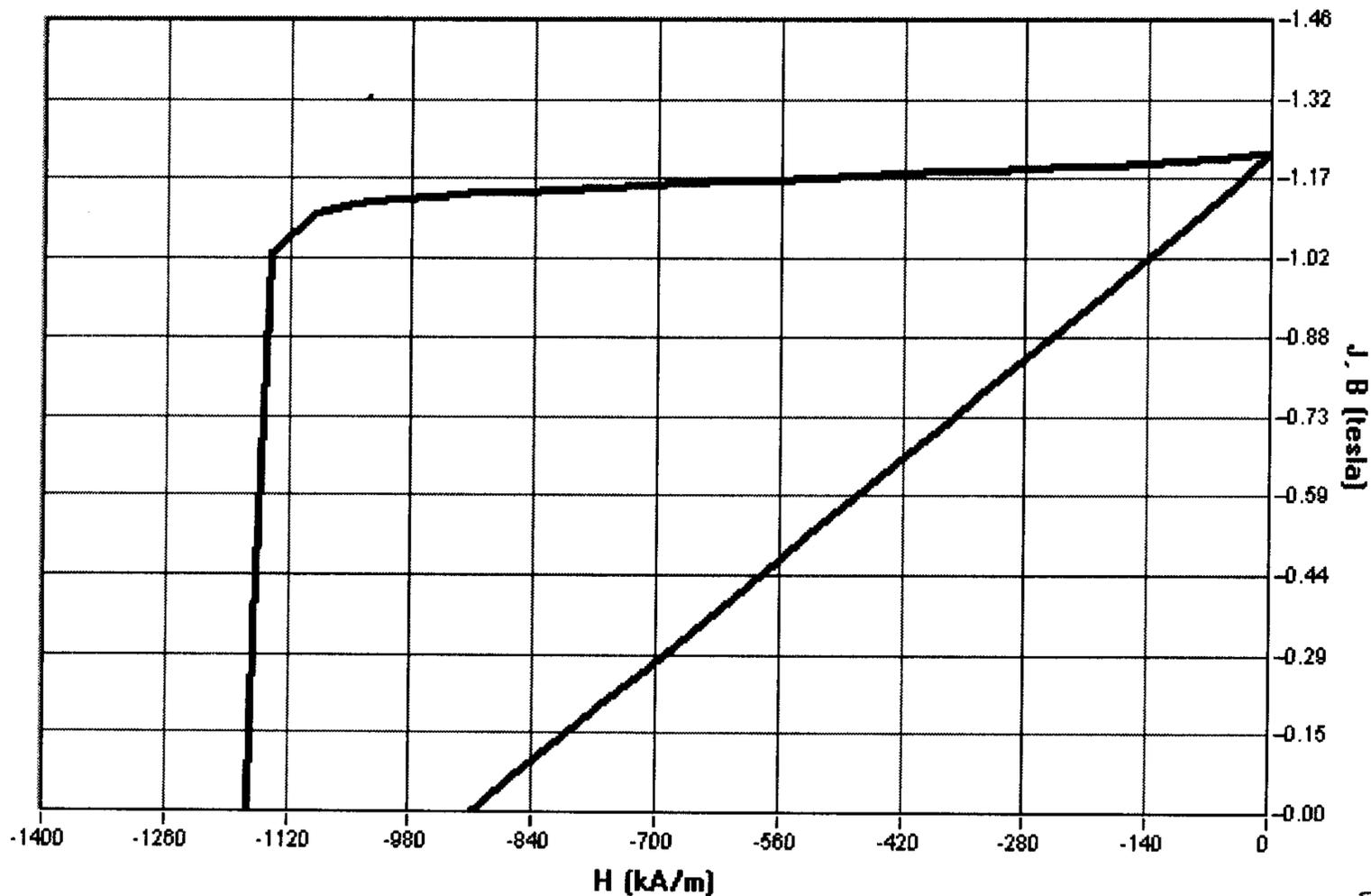
HcJ

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1164	20	2,00

JHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
1213	31	2,05

Figura 1 – Curva de desmagnetização (II quadrante)



Caracterização do ímã 0065-02

Br

V.V.C (T)	U ±(T)	k
1,22	0,58	2,00

BHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
276,1	6,4	2,00

HcB

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
910	16	2,00

Hknee

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1099	19	2,00

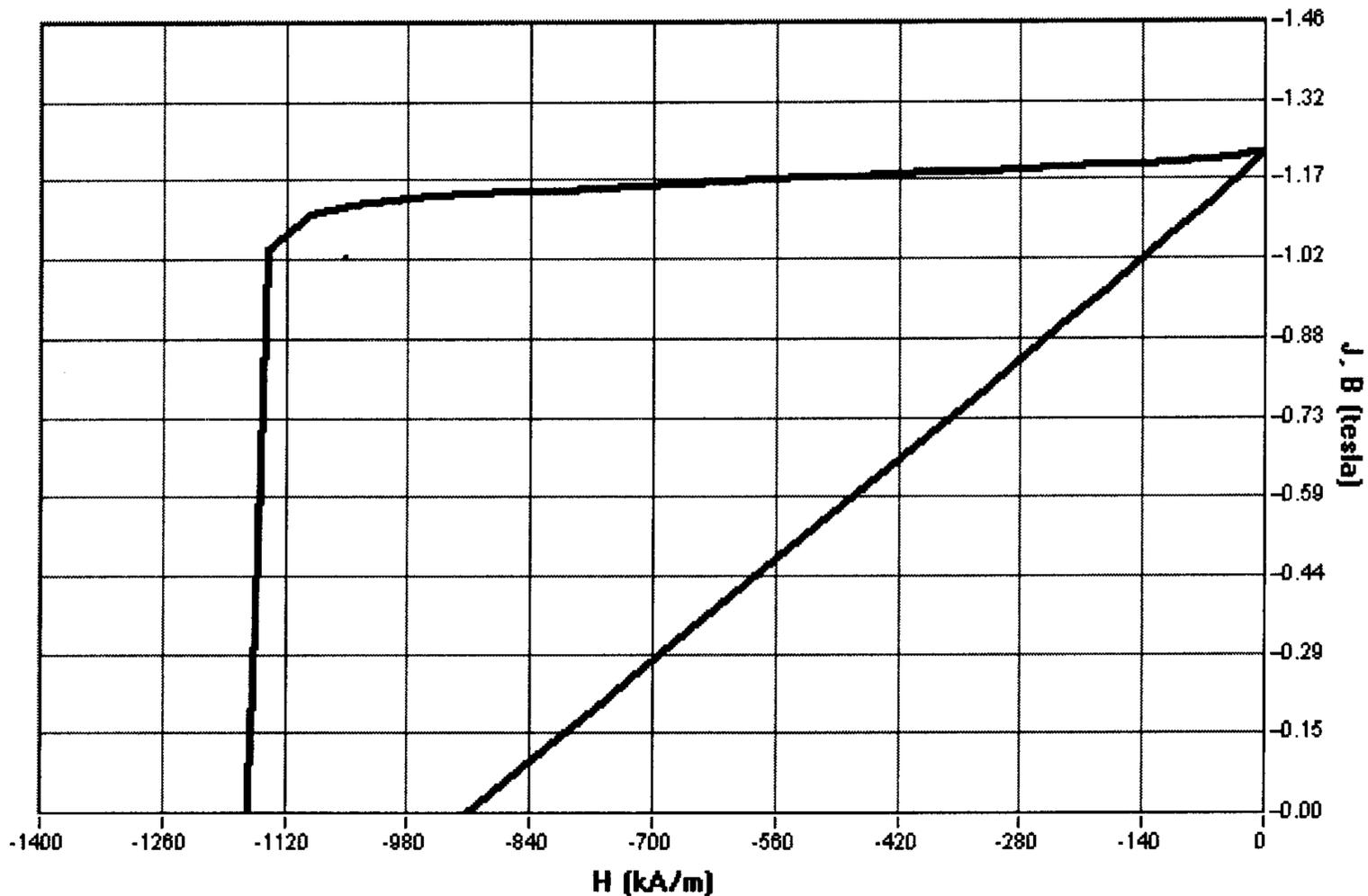
HcJ

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1162	20	2,00

JHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
1211	28	2,00

Figura 2 – Curva de desmagnetização (II quadrante)



Caracterização do ímã 0065-03

Br

V.V.C (T)	U ±(T)	k
1,22	0,58	2,00

BHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
277,3	7,2	2,06

HcB

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
912	16	2,01

Hknee

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1088	19	2,00

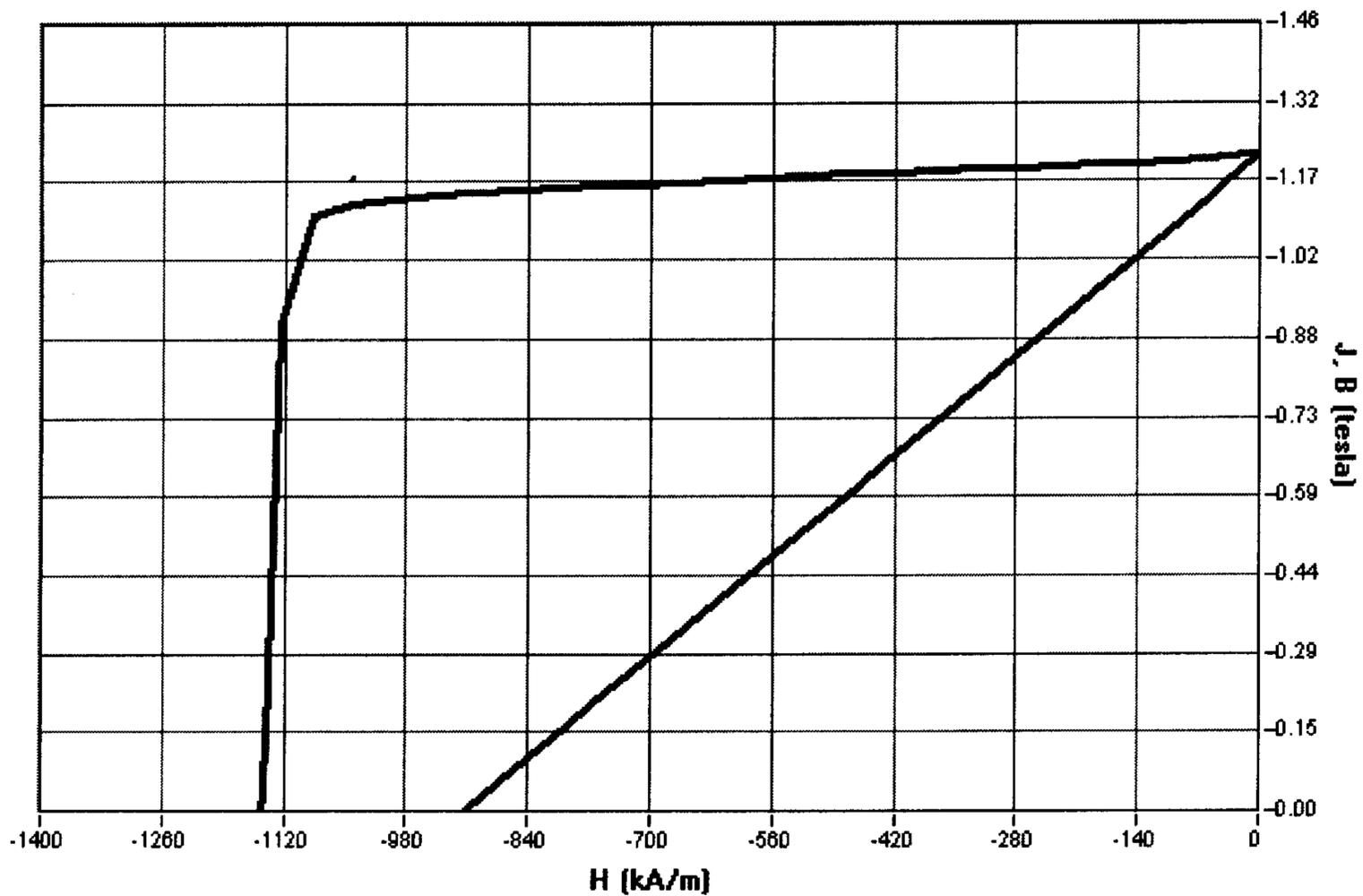
HcJ

V.V.C (kA/m)	U ±(kA/m)	k
1146	20	2,00

JHmax

V.V.C (kJ/m ³)	U ±(kJ/m ³)	k
1199	29	2,01

Figura 3 – Curva de desmagnetização (II quadrante)



INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES ÀS MEDIÇÕES REALIZADAS

1. Incerteza de medição

A incerteza expandida de medição relatada no item RESULTADOS é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

2. Padrão(ões) utilizado(s)

Descrição	Modelo	Série N°	Certificado N°	Origem	Validade
Sistema automático de medição e geração de campo magnético	Hystergraf IS-300	00405W005	73999-101	IPT-LME	jul./2007

3. Rastreabilidade do(s) padrão(ões) utilizado(s)

O(s) padrão(ões) utilizado(s) na calibração é(são) rastreado(s) ao INMETRO (Eletricidade) e/ou ao OBSERVATÓRIO NACIONAL (Tempo/Freqüência) e/ou ao NIST-E.U.A. e/ou ao PTB-Alemanha (Rádio-Freqüência e Telecomunicações).

4. Condições ambientais

As medições foram realizadas na temperatura ambiente de $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $(65 \pm 5)\%$.

5. Data da execução da medição: 18/01/2007.

6. Legenda para as abreviações usadas na apresentação dos resultados

V.V.C. = Valor Verdadeiro Convencional (indicação obtida no padrão)

U = Incerteza Expandida de Medição

k = Fator de Abrangência (fator multiplicativo adimensional)

Br = Remanência magnética

HcB = Campo coercitivo para anular B

HcJ = Campo coercitivo para anular J

BHmax = Produto de energia máximo para B e H

JHmax = Produto de energia máximo para J e H

Hknee = Campo desmagnetizante responsável pela redução de 10% da remanência

Laboratório de Metrologia Elétrica / CME

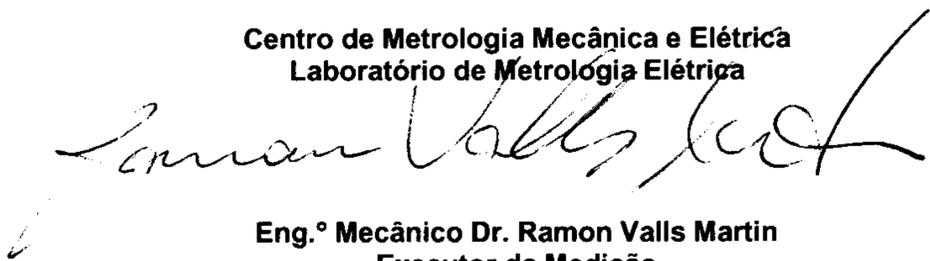
Relatório de Medição N° 3636-204

7. Nota

Os resultados apresentados neste relatório têm significação restrita e se aplicam somente ao objeto de medição.

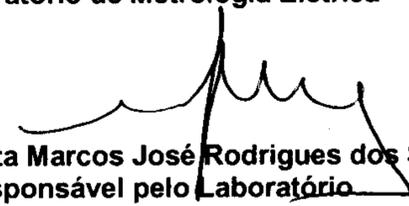
São Paulo, 30 de janeiro de 2007.

Centro de Metrologia Mecânica e Elétrica
Laboratório de Metrologia Elétrica



Eng.º Mecânico Dr. Ramon Valls Martin
Executor da Medição
CREA n° 139.038 - RE n° 8505.0

CENTRO DE METROLOGIA MECÂNICA E ELÉTRICA
Laboratório de Metrologia Elétrica



Eng.º Eletricista Marcos José Rodrigues dos Santos
Responsável pelo Laboratório
CREA n° 0601.49.4355 - RE n° 5706.7

SUPLEMENTO DO RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº 3636-204

Cliente: UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Av. Osvaldo Aranha, 103
90035-019 – Poa – RS

Item: Três ímãs de NdFeB

Natureza do trabalho: Caracterização magnética de três ímãs de NdFeB

Referência: Fax do comprovante de pagamento de 22/01/2007

DESCRIÇÃO DO ITEM

Três ímãs, identificados pelos nºs 0065-01, 0065-02 e 0065-03.

Obs.: Registrados no LME sob nº(s) 0065/07.

CORREÇÃO

Com relação ao RELATÓRIO DE MEDIÇÃO Nº **3636-204** emitido em **30/01/2007**, temos a retificar:

- Nas páginas 3/6 e 4/6, no item RESULTADOS, substituir as tabelas "Br" pelas tabelas abaixo:

Ímã 0065-2 – Br

V.V.C (T)	U ±(T)	k
1,221	0,014	2,00

Ímã 0065-3 – Br

V.V.C (T)	U ±(T)	k
1,219	0,014	2,00

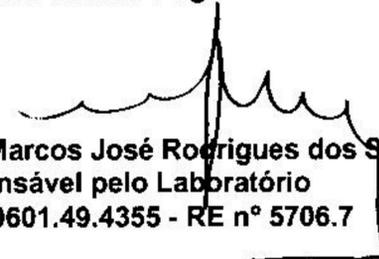
São Paulo, 12 de março de 2007.

CENTRO DE METROLOGIA MECÂNICA E ELÉTRICA
Laboratório de Metrologia Elétrica



Eng.º Mecânico Dr. Ramon Vallis Martin
Executor da Medição
CREA nº 139.038 - RE nº 8505.0

CENTRO DE METROLOGIA MECÂNICA E ELÉTRICA
Laboratório de Metrologia Elétrica



Eng.º Eletricista Marcos José Rodrigues dos Santos
Responsável pelo Laboratório
CREA nº 0601.49.4355 - RE nº 5706.7