

ALEXANDRE ZAMBONETTI

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE DE FLUXO
MAGNÉTICO DE ÍMÃS COM MAGNETIZAÇÃO RADIAL**

FLORIANÓPOLIS – SC

2010

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA
DE MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE DE FLUXO
MAGNÉTICO DE ÍMÃS COM MAGNETIZAÇÃO RADIAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Paulo A. P. Wendhausen, Dr. Ing

ALEXANDRE ZAMBONETTI

FLORIANÓPOLIS, FEVEREIRO DE 2010

**DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE DE FLUXO
MAGNÉTICO DE ÍMÃS COM MAGNETIZAÇÃO RADIAL**

ALEXANDRE ZAMBONETTI

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 12 de Março de 2010

Prof. Paulo Antônio Pereira Wendhausen, Dr. Ing
Orientador – PGMAT – UFSC

Prof. Carlos Augusto Silva de Oliveira, Dr. Eng
Coordenador – PGMAT – UFSC

Banca examinadora:

Prof. João Cardoso de Lima, Dr. FSC.
FSC/UFSC. Presidente.

Profa. Maria Luisa Sartorelli. Dr. FSC.
FSC/UFSC. Membro Externo,

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr. UFSC
GRUCAD – UFSC

*À minha família e a todos aqueles que
estiveram comigo nesta jornada.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar comigo sempre e me dar forças para completar esta etapa de minha vida. À minha noiva Adriana, que me deu todo o apoio e carinho de que precisei, compartilhando comigo os momentos bons e ruins. Aos meus pais, Roberto e Isabel, por terem me ensinado as coisas mais importantes que já aprendi e por estarem sempre dispostos a me ajudar em tudo. Ao Maurício, meu irmão e companheiro, que é muito mais que um irmão pra mim.

Ao professor e orientador Prof. Paulo A. P. Wendhausen, pela oportunidade na realização deste trabalho e pela confiança em mim depositada. Ao professor Prof. Nelson Jhoe Batistela e ao Prof. Maurício V. Ferreira da Luz, pela disposição em ajudar neste trabalho.

Aos colegas de laboratório Cristiano Teixeira e Leonardo Ulian Lopes, pela imensa ajuda durante o curso e com a elaboração da dissertação.

Ao colega de trabalho Cristóforo Pompermaier, pela freqüente solução de dúvidas e pelas muitas críticas construtivas. Ao Douglas Santana Ângelo e ao Henrique da Rosa, cuja ajuda foi fundamental para a parte experimental do trabalho. Ao projetista Roberto Tormen, pela grande ajuda com desenhos tridimensionais.

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Engenharia de Materiais que possibilitaram a realização deste curso de mestrado. Aos professores do curso, pelo apoio e pela paciência.

À Whirlpool – Divisão de compressores – EMBRACO, por permitir que eu realizasse o curso de pós-graduação em parte de meu horário de trabalho e pelo apoio em diversos sentidos para a realização deste curso.

A todos os colegas e amigos que, direta e indiretamente, colaboraram para que este trabalho pudesse ser realizado.

DESENVOLVIMENTO DE MÉTODO DE ANÁLISE DE FLUXO MAGNÉTICO DE ÍMÃS COM MAGNETIZAÇÃO RADIAL

Alexandre Zambonetti

RESUMO

Alguns processos de fabricação de ímãs podem gerar falhas ou imperfeições se não forem projetados e executados de forma correta. Neste trabalho, será avaliada a uniformidade do campo magnético gerado por ímãs em formato de anel com magnetização radial através do mapeamento do fluxo magnético superficial. Este método permite a visualização do desbalanceamento de campo magnético ao longo de todo o anel sem a necessidade de destruição do mesmo. Além disso, as peças podem ser avaliadas em seu formato final, o que permite a sua avaliação antes e depois de sua utilização. Além da avaliação do desbalanceamento, são descritos alguns métodos para sua correção envolvendo usinagem e aquecimento dos anéis. Também foram sugeridas possíveis causas do desbalanceamento, sendo as mais prováveis a compactação em formato de anéis e a magnetização radial das peças.

Palavras-chave: Magnetização radial, mapeamento magnético.

DEVELOPMENT OF AN ANALYSIS METHOD OF THE MAGNETIC FLUX IN MAGNETS WITH RADIAL MAGNETIZATION

Alexandre Zambonetti

ABSTRACT

Some processes may create imperfections in magnets if they are not projected or executed correctly. In this work, the uniformity of the magnetic field generated by a ring magnet with radial magnetization will be evaluated using the surface mapping. With this method it is possible to visualize the inhomogeneities of the surface magnetization of the magnet without destroying it. Beyond this, the samples can be evaluated at their final shape, and it is possible to compare it before and after the use of the magnet. Beyond the evaluation of the unbalance in the magnetic field, some correction methods will be discussed in this work, like heating and drilling. Possible causes for the disequilibrium were also discussed: the pressing in the ring shape and the radial magnetization are the most probable causes.

Keywords: Radial magnetization, magnetic mapping.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	27
1.1.	Motivação	28
1.2.	Objetivos gerais e específicos	29
2	Revisão Bibliográfica	31
2.1.	Motores elétricos.....	31
2.1.1.	Motores de corrente contínua	32
2.1.2.	Motores de corrente alternada	34
2.1.3.	Motores lineares	35
2.2.	Materiais magnéticos	36
2.2.1.	Processos de fabricação de ímãs permanentes... ..	40
2.3.	Métodos de magnetização.....	42
2.3.1.	Campos magnéticos constantes	42
2.3.2.	Campos pulsados	42
2.3.3.	Bobinas supercondutoras.....	44
2.4.	Direções de magnetização.....	46
2.5.	Métodos de avaliação de características magnéticas ..	47
2.5.1.	Histeresígrafo	47
2.5.2.	Magnetômetro de amostra vibrante (MAV)	48
2.5.3.	Avaliação de força eletromotriz.....	49
2.5.4.	Mapeamento com sensor Hall	50
3	Metodologia e procedimento experimental	55
3.1.	Preparação das amostras	55
3.1.1.	Tipos de amostras utilizadas.....	55
3.1.2.	Anéis de Nd ₂ Fe ₁₄ B compósitos duplos.....	56
3.1.3.	Magnetização dupla de anéis	61
3.1.4.	Anéis feitos através de extrusão reversa.....	62
3.1.5.	Anéis com magnetização axial	63
3.2.	Magnetização radial	64
3.3.	Mapeamento de indução magnética na superfície nos anéis	66
3.3.1.	Sonda Hall	66
3.3.2.	Dispositivo mecânico	67
3.3.3.	Validação do método	75
3.3.4.	Procedimento de medida	79
3.4.	Força eletromotriz	80
4	Simulações e tratamento de dados.....	82
4.1.	Programas de simulação computacional	83

4.2.	Simulação de fluxo magnético superficial	85
4.2.1.	Distância real entre o sensor Hall e a amostra...	87
4.2.2.	Influência da colagem dos anéis.....	89
4.3.	Simulação da força eletromotriz	91
4.4.	Tratamento de dados.....	92
4.4.1.	Criação de mapas magnéticos	92
4.4.2.	Comparação entre mapas magnéticos	93
4.4.3.	Criação de perfis magnéticos	94
4.4.4.	Análise de força eletromotriz	98
5	Resultados e análises.....	100
5.1.	Avaliação das propriedades extrínsecas do material 101	
5.1.1.	Histeresígrafo: curva de histerese.....	101
5.1.2.	Magnetômetro de amostra vibrante (MAV): coercividade 102	
5.2.	Resultados do mapeamento	105
5.2.1.	Amostras padrão.....	105
5.2.2.	Anéis com redução de espessura de parede.....	109
5.2.3.	Redução variável de espessura	125
5.2.4.	Anéis perfurados	127
5.2.5.	Aquecimento pontual	129
5.3.	Avaliação de perfil de indução magnética remanente. 133	
5.3.1.	Amostras padrão.....	134
5.3.2.	Redução variável de espessura	135
5.3.3.	Anéis perfurados	137
5.3.4.	Aquecimento pontual	138
5.4.	Comparação medida e simulação de indução magnética superficial.....	140
5.5.	Correlação entre força eletromotriz e perfil magnético. 141	
5.6.	Comparação entre força eletromotriz simulada e medida 143	
5.7.	Testes em motores	144
5.8.	Avaliação do magnetizador	149
5.9.	Avaliação do processo de compactação.....	152
6	Conclusões	155
6.1.	Validade do método de mapeamento de fluxo magnético superficial	155
6.2.	Quanto ao grau de uniformidade dos ímãs.	156

6.3.	Quanto às causas da não uniformidade	156
6.4.	Quanto à relação entre o perfil magnético e a força eletromotriz	157
6.5.	Sugestões para trabalhos futuros.....	157
6.5.1.	Avaliação quantitativa do efeito do aquecimento pontual da superfície dos anéis.....	157
6.5.2.	Avaliação do gradiente de densidade das amostras.	157
6.5.3.	Desenvolvimento de um ferramental para simulações que tenha resultados próximos à condição de magnetização e desempenho dos ímãs.	158
7	Referências bibliográficas	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor elétrico de indução trifásico.	27
Figura 2 - (a) Esquema em corte de um motor linear. (b) Representação do desalinhamento causado pelo desequilíbrio de forças no ímã.	29
Figura 3 - Esquema representando motor elétrico de corrente contínua. Fonte: www.siemens.com	33
Figura 4 - Esquema de um motor elétrico de corrente contínua sem escovas.	34
Figura 5 - Desenho representando corte longitudinal de um motor linear síncrono. Adaptado de [GIERAS].	35
Figura 6 - Representação das regiões de domínios magnéticos em um material (a) desmagnetizado e (b) com magnetização remanente. [COEY]	37
Figura 7 - Curva de histerese típica de um material ferromagnético duro representada pela indução magnética (curva B) e pela polarização (curva J).	38
Figura 8 - Curva de histerese para materiais magnéticos moles e duros. Adaptado de [BUSCHOW].	39
Figura 9 - Evolução do produto de energia para diversos tipos de ímãs permanentes. [CULLITY]	40
Figura 10 - (a) Representação das linhas de campo em um ímã permanente retangular. (b) Campo magnético gerado por uma corrente elétrica (c) Bobina utilizada para a magnetização de pequenas peças... ..	42
Figura 11 - Corrente elétrica que circula em um circuito de um magnetizador de pulso durante o pulso.	43
Figura 12 - Circuito simplificado de um aparelho magnetizador que utiliza pulsos durante a aplicação do pulso.	43
Figura 13 - Ímã permanente flutuando sobre a superfície de um supercondutor: efeito Meissner.	44
Figura 14 - Evolução da T_c . Adaptado de [ESCHRIG]	45
Figura 15 - Amostra sobre a qual é aplicado um campo unidirecional longitudinal.	46
Figura 16 - Amostra sobre a qual é aplicado um campo multidirecional radial.	46
Figura 17 - (a) Bancada completa do histeresígrafo. (b) Estrutura onde é posicionada a amostra.	47
Figura 18 - Representação esquemática de um MAV.	49

Figura 19 - Representação do efeito Hall sobre uma pequena barra onde atua um campo magnético.....	50
Figura 20 - Sensor de efeito Hall comercial compacto. Fonte: Honeyweel – SS41	51
Figura 21 - Indução magnética gerada dentro do CMS quando o valor especificado é igual a dois teslas. Fonte: CMS Times, 16 de outubro de 2006.	53
Figura 22 - Desenho técnico do anel de Nd ₂ Fe ₁₄ B compactado.	57
Figura 23 - Esquema de montagem das amostras compostas por dois anéis magnéticos.	58
Figura 24 - Dispositivo utilizado para colagem das amostras. (a) Desenho tridimensional e (b) corte transversal.	58
Figura 25 - Amostra pronta para mapeamento magnético.....	61
Figura 26 - (a) Primeiro pulso aplicado. (b) Segundo pulso aplicado, com 180° de diferença para o primeiro.	62
Figura 27 - Anéis fabricados através do método de extrusão reversa.	62
Figura 28 - Corte transversal do ímã mostrando o sentido do campo magnético aplicado.....	63
Figura 29 - Esquema simplificado do circuito utilizado para a geração de campo magnético radial.	64
Figura 30 - (a) Simulação computacional do campo magnético resultante da oposição do campo de duas bobinas. (b) Ampliação da região do ímã com os vetores de campo magnético.....	64
Figura 31 - (a) Gaussímetro que utiliza sonda Hall. (b) Detalhe mostrando sensor Hall na ponta da haste.	66
Figura 32 - Base do sistema de mapeamento magnético.	67
Figura 33 - Representação do escalonamento do eixo utilizado para a fixação dos ímãs.	68
Figura 34 - Eixo utilizado para a fixação dos ímãs com ímã, sonda hall e sensor de posição laser.....	69
Figura 35 - Base que suporta o motor de passos e é responsável pelo movimento no eixo z.....	69
Figura 36 - Conjunto mecânico completo.	70
Figura 37 - (a) Motor de passo responsável pelo movimento de giro do ímã e (b) sistema de potência do motor.	70
Figura 38 - (a) Placa de aquisição de dados (b) Cabo de conexão (c) Placa de conexões. Fonte: www.ni.com.	72

Figura 39 - Cabo BNC utilizado para conexão dos sinais da sonda Hall e do sensor de posição.....	72
Figura 40 - Programa utilizado para aquisição de dados durante o mapeamento das amostras.....	73
Figura 41 - Exemplo de mapa magnético completo de uma amostra.....	74
Figura 42 - Exemplo de mapa superficial completo de uma amostra. Os valores de excentricidade estão representados em milímetros.....	74
Figura 43 - Perfil magnético completo de uma amostra (linha espessa).....	75
Figura 44 - Gráfico de correlação entre a tensão lida e a indução magnética.....	77
Figura 45 - Indução magnética lida pelo sistema sem amostra.....	78
Figura 46 - Motor linear utilizado para avaliação da força eletromotriz em corte e em vista explodida.....	80
Figura 47 - (a) Esquema e (b) linhas de fluxo magnético para o motor tubular linear utilizado.....	81
Figura 48 - Modelo utilizado para simulação através do método de elementos finitos.....	82
Figura 49 - Imagem de tela mostrando modelo e resultados de uma simulação de motor elétrico realizada pelo FEMM.....	84
Figura 50 - Representação do ajuste da curva de histerese necessário para utilização dos dados no FEMM.....	85
Figura 51 - Curva de histerese dos anéis de $Nd_2Fe_{14}B$ magnetizados axialmente adaptada para utilização no FEMM.....	86
Figura 52 - Representação da região utilizada como domínio de cálculo para a simulação de um anel.....	86
Figura 53 - Seção transversal do anel considerada como domínio de cálculo.....	87
Figura 54 - Representação do domínio de cálculo com as superfícies consideradas.....	88
Figura 55 - Gráfico de indução magnética normal ao longo do ímã quando medida em diferentes distâncias a partir de sua superfície.....	88
Figura 56 - Simulação de fluxo magnético superficial considerando o espaço entre os ímãs criado pela cola.....	90
Figura 57 - Programa utilizado para criação dos mapas magnéticos.....	93
Figura 58 - Painel frontal do programa utilizado para comparação de dois mapas magnéticos simultaneamente.....	94

Figura 59 - Gráfico de perfil magnético	95
Figura 60 - Programa utilizado para criação do perfil magnético dos ímãs.	95
Figura 61 - Representação plana da superfície do ímã dividida em partes.	96
Figura 62 - Comparação entre passo e tamanho do sensor Hall	97
Figura 63 - Programa utilizado para avaliação da força eletromotriz.	99
Figura 64 - Segundo quadrante da curva de histerese dos anéis utilizados.	102
Figura 65 - Região retirada dos anéis para análise em MAV	103
Figura 66 - Mapa magnético e cortes da amostra 02.	106
Figura 67 - Mapa magnético e cortes da amostra 04.	107
Figura 68 - Mapa magnético e cortes da amostra 05.	108
Figura 69 - Mapa magnético e cortes da amostra 07.	111
Figura 70 - Mapa magnético e cortes da amostra 13.	112
Figura 71 - Mapa magnético e cortes da amostra 08.	114
Figura 72 - Mapa magnético e cortes da amostra 21.	115
Figura 73 - Mapa magnético e cortes da amostra 09.	117
Figura 74 - Mapa magnético e cortes da amostra 24.	118
Figura 75 - Mapa magnético e cortes da amostra 18.	120
Figura 76 - Mapa magnético e cortes da amostra 29.	121
Figura 77 - Mapa magnético e cortes da amostra 14.	123
Figura 78 - Mapa magnético e cortes da amostra 17.	124
Figura 79 - Mapeamento da amostra 22 antes da redução de espessura.	126
Figura 80 - Mapeamento da amostra 22 depois da redução de espessura.	126
Figura 81 - Mapeamento magnético da amostra 01.	126
Figura 82 - Corte longitudinal do mapa magnético da amostra 01 na altura de MAX2.	127
Figura 83 - Mapeamento da amostra 23 antes da perfuração.	127
Figura 84 - Mapeamento da amostra 23 depois da perfuração.	128
Figura 85 - Mapeamento magnético da amostra 06 depois da perfuração.	129
Figura 86 - Mapeamento da excentricidade da amostra 06 depois da perfuração.	129
Figura 87 - Mapeamento inicial da amostra	130

Figura 88 - Mapeamento da amostra após o primeiro aquecimento.	130
Figura 89 - Mapeamento da amostra após o segundo aquecimento.	131
Figura 90 - Mapeamento da amostra após o terceiro aquecimento.	131
Figura 91 - Mapeamento da amostra após o quarto aquecimento.	131
Figura 92 - Exemplo de perfil magnético de um anel com magnetização radial.	133
Figura 93 - Perfil magnético das amostras de referência 02, 04 e 05.	134
Figura 94 - Perfis magnéticos gerados antes e depois da redução da espessura em uma região da parede do anel.	136
Figura 95 - Perfis magnéticos gerados antes e depois da perfuração do anel.	137
Figura 96 - Perfis magnéticos gerados antes e depois do superaquecimento pontual do anel.	138
Figura 97 - Comparação entre simulações e leitura real de indução magnética superficial normal.	140
Figura 98 - Comparação entre simulações e leitura real de indução magnética superficial normal.	142
Figura 99 - Mapa magnético do anel virgem.	144
Figura 100 - Mapa magnético e cortes da amostra A.	146
Figura 101 - Mapa magnético e cortes da amostra B.	147
Figura 102 - Comparação entre perfis magnéticos.	148
Figura 103 - Perfis magnéticos das três amostras que receberam apenas um pulso de magnetização.	149
Figura 104 - Perfis magnéticos das três amostras que receberam dois pulsos de magnetização.	150
Figura 105 - $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compactado em forma de disco.	152
Figura 106 - Segundo quadrante da curva de histerese do disco de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$	153

LISTA DE TABELAS E QUADROS

Quadro 1 - Tipos de motores elétricos comuns.....	32
Quadro 2 - Tipos de amostras utilizadas.....	56
Tabela 3 - Dados da cola Three Bond 2202C utilizada na colagem dos ímãs.....	58
Quadro 4 - Representação das amostras de anéis duplos utilizadas.....	60
Quadro 5 - Calibração do sinal de saída analógico da sonda Hall.....	77
Tabela 6 - Valores médios e de pico encontrados.....	78
Quadro 7 - Informações de calibração do instrumento fornecidas pelo fabricante.....	79
Tabela 8 - Valores encontrados no teste de colagem.....	89
Quadro 9 - Resultados da simulação de força eletromotriz.	91
Quadro 10 - Descrição das variáveis utilizadas nos mapas magnéticos das amostras.....	92
Quadro 11 - Indução remanente e coercividade das amostras.....	101
Tabela 12 - Valores de coercividade obtidos para as quatro partes das quatro amostras e valores médios de cada amostra.....	103
Quadro 13 - Resultados do mapeamento da amostra 02.....	106
Quadro 14 - Resultados do mapeamento da amostra 04.....	107
Quadro 15 - Resultados do mapeamento da amostra 05.....	108
Tabela 16 - Resumo das medidas de indução magnética encontrados para as amostras padrão.....	109
Tabela 17 - Resultados do mapeamento da amostras 07 e 13.....	110
Tabela 18 - Resultados do mapeamento da amostras 08 e 21.....	113
Tabela 19 - Resultados do mapeamento da amostras 09 e 24.....	116
Tabela 20 - Resultados do mapeamento das amostras 18 e 29.....	119
Tabela 21 - Resultados do mapeamento da amostras 14 e 17.....	122
Tabela 22 - Resultados do mapeamento da amostra 22 antes e depois da redução de espessura.....	125
Tabela 23 - Resultados do mapeamento da amostra 23 antes e depois da perfuração.....	128
Tabela 24 - Resultados do mapeamento da amostra 19 após cada etapa de aquecimento.....	132
Tabela 25 - Exemplo de valores resultantes de indução magnética.....	134

Tabela 26 - Resultados da análise do perfil magnético das amostras 02, 04 e 05.....	135
Tabela 27 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 22 antes e depois da redução de espessura.	136
Tabela 28 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 23 antes e depois da perfuração.....	137
Tabela 29 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 19.....	139
Tabela 30 - Comparação entre os valores de força eletromotriz e área do perfil magnético das amostras.	141
Tabela 31 - Resultados da simulação de força eletromotriz. .	143
Tabela 32 - Resultados do mapeamento do anel original.	144
Tabela 33 - Resultados do mapeamento das amostras A e B. 145	
Tabela 34 - Valores de desequilíbrio de indução magnética superficial encontrados para as amostras A, B e para o anel original. 148	
Tabela 35 - Resultados do mapeamento das amostras que receberam apenas um pulso magnético.....	149
Tabela 36 - Resultados do mapeamento da amostras que receberam dois pulsos magnéticos.....	151
Tabela 37 - Comparação dos resultados de desequilíbrio entre amostras com pulso único e com pulso duplo.....	151
Tabela 38 - Comparação de remanência e coercividade entre anéis e discos compactados.....	153
Tabela 39 - Comparação de remanência e coercividade entre anéis e discos compactados.....	154

1 Introdução

Máquinas elétricas são utilizadas para a realização dos mais diversos trabalhos, sendo que o mais comum deles é a conversão de energia elétrica em mecânica. Diversos tipos de motores elétricos foram criados para atender a diferentes necessidades: potência, velocidade, eficiência, resistência, custo, entre outras. Os motores de indução são os mais presentes no cotidiano das pessoas pela sua larga aplicação em refrigeradores. Seu nome vem do princípio de funcionamento: um campo magnético é induzido no rotor (parte móvel do motor) pelo campo magnético gerado pelo estator. Estes motores são robustos e podem fornecer elevadas potências com reduzidos custos de produção. No entanto, sua velocidade depende da carga que lhe é aplicada. Além disso, exigem sistemas adequados de partida, para evitar correntes elétricas elevadas. A Figura 1 mostra um exemplo de motor de indução trifásico.



Figura 1 - Motor elétrico de indução trifásico.

Diferentemente dos motores de indução, que funcionam com corrente elétrica alternada, os motores de corrente contínua muitas vezes se destacam em aplicações que exigem controle preciso de velocidade. Atualmente, os motores de corrente contínua sem escovas substituem os motores que utilizam contatos de carvão (escovas) para a comutação mecânica de fases. Nestes motores, a parte móvel do motor possui ímãs, cujo campo magnético permanente sofre a tendência do alinhamento com o campo gerado por bobinas acionadas individualmente por um controlador eletrônico, um inversor de tensão.

Um tipo completamente diferente de motor, mas que também teve sua utilização muito ampliada nos últimos anos é o motor elétrico linear (ver esquema em corte de um motor linear na Figura 2). Ao invés de gerar movimento rotativo como os motores convencionais, os

motores lineares trabalham apenas em uma única direção. O deslocamento linear é especialmente adequado quando a solicitação se trata de uma carga linear. Seu uso no lugar de motores rotativos dispensa a necessidade de transmissões [GIERAS], bielas ou outros mecanismos que podem gerar perdas e aumentam a complexidade do equipamento ou dispositivo. No entanto, para que haja uma evolução destes motores, adequando-os à especificações de projeto e de produção, são necessários materiais que atendam a rigorosos critérios de qualidade. Neste contexto, os ímãs devem apresentar características de desempenho excelentes, pois também deles depende o movimento do motor.

Neste trabalho serão utilizados ímãs à base de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ em formato de anel empregados em motores lineares. A metodologia experimental proposta é a realização de análises do mapeamento do fluxo magnético gerado em sua superfície externa. Nesta avaliação, considera-se o fluxo magnético gerado pelo ímã, levando em conta sua amplitude e sua uniformidade. Também a força eletromotriz é avaliada. Os valores da indução magnética serão apresentados em Gauss, salvo ocasiões em que for necessário na unidade Tesla.

1.1. Motivação

O desempenho dos motores síncronos lineares depende diretamente das propriedades de seus ímãs. É necessário garantir que as características destes atendam às necessidades impostas pelo motor, sendo que qualquer desvio afeta o desempenho do motor [HOR]. Em ímãs utilizados em motores lineares, principalmente os ímãs de alta energia, as forças de atração exercidas pelo ímã sobre partes do motor são elevadas, mesmo em motores pequenos. Além disso, esta força aumenta se a distância entre o ímã e motor for reduzida¹. Em casos extremos onde ocorra o contato entre as peças, o desgaste pode ser acelerado e a vida útil do motor reduzida, além da possível liberação de resíduos dentro do motor (ver Figura 2). O desbalanceamento de forças pode ser prejudicial para o motor mesmo antes de seu funcionamento: durante a sua montagem. O desequilíbrio de forças pode até mesmo dificultar sua montagem quanto à centralização do eixo móvel em relação ao estator (ver Figura 2).

¹ Válido para entreferros relativamente pequenos.

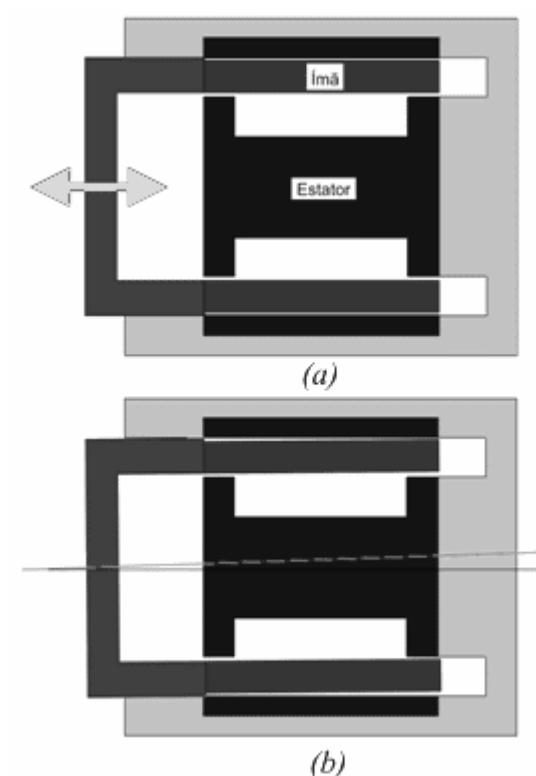


Figura 2 - (a) Esquema em corte de um motor linear. (b) Representação do desalinhamento causado pelo desequilíbrio de forças no ímã.

Seguindo esta motivação, foram traçados os objetivos para o trabalho, apresentados a seguir.

1.2. Objetivos gerais e específicos

O objetivo geral deste trabalho é o desenvolvimento de um método de avaliação e de análise de uniformidade de fluxo magnético superficial de ímãs com magnetização radial. Os objetivos específicos são os seguintes:

- **Proposição e desenvolvimento** de um método de avaliação experimental de ímãs em formato de anel com magnetização radial.

- **Validação do método de análise** da distribuição da indução magnética superficial.
- **Avaliação da uniformidade de fluxo magnético** na superfície externa de anéis em relação às posições angular e longitudinal (O fluxo magnético gerado por um ímã pode não ser uniforme ao longo de toda a sua extensão).
- **Determinação das possíveis causas** de não-uniformidade no fluxo magnético dos ímãs e proposição de alternativas para sua correção.
- **Avaliação e simulação da força eletromotriz** gerada pelos ímãs nas bobinas do motor quando estes estão em movimento. (Esta tensão está diretamente relacionada às características de uniformidade e amplitude de campo gerado pelo ímã).

No próximo capítulo serão apresentados brevemente conceitos e informações para facilitar a compreensão deste trabalho.

2 Revisão Bibliográfica

Para uma melhor compreensão deste trabalho, apresenta-se uma revisão bibliográfica tratando de diversos tipos de motores elétricos existentes. Apenas alguns deles serão comentados. As principais diferenças entre eles serão descritas, bem como suas vantagens e desvantagens. Neste capítulo também serão descritos os materiais magnéticos utilizados neste trabalho, bem como seus processos de fabricação. Em seguida, serão abordados os diversos métodos de magnetização de materiais existentes e possíveis direções de magnetização de ímã permanentes que podem ser obtidas. Por fim, serão apresentados alguns métodos de avaliação de propriedades magnéticas de ímãs, com as vantagens e desvantagens de cada método.

2.1. Motores elétricos

Os motores elétricos foram criados para atender às mais diversas necessidades. Mesmo sendo a maior parte deles rotativa, há um crescente número de aplicações que empregam motores lineares. Podem-se dividir motores rotativos em dois grupos principais: os motores alimentados por corrente contínua e aqueles alimentados por corrente alternada [BEATY]. No Quadro 1 são apresentados os tipos de motores rotativos mais comuns.

Motores CC (corrente contínua)	Motores CA (corrente alternada)
<ul style="list-style-type: none"> • Ímã Permanente com escova • Ímã permanente sem escova (<i>brushless</i>) • Série <ul style="list-style-type: none"> ◦ Universal • Shunt ou paralelo • Composto 	<ul style="list-style-type: none"> • Assíncrono (de indução) <ul style="list-style-type: none"> ◦ Polifásico <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotor gaiola ou em curto-circuito ▪ Rotor enrolado ou bobinado ◦ Monofásico <ul style="list-style-type: none"> ▪ Rotor gaiola ou em curto-circuito <ul style="list-style-type: none"> ▪ Fase dividida ▪ Capacitor de partida ▪ Capacitor permanente ▪ Polos Sombreados ▪ Dois capacitores ▪ Rotor enrolado ou bobinado <ul style="list-style-type: none"> ▪ Repulsão ▪ Repulsão de partida • Síncrono <ul style="list-style-type: none"> ◦ Polifásico ◦ Monofásico <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ímã permanente ▪ Histerese ▪ Relutância ▪ De passo <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ímã Permanente ▪ Relutância variável ▪ Híbrido

Quadro 1 - Tipos de motores elétricos comuns

2.1.1. Motores de corrente contínua

Os motores de corrente contínua não podem ser alimentados diretamente pela rede elétrica, que utiliza corrente alternada. Neste tipo de motor elétrico, uma corrente elétrica circulando em uma bobina gera um campo magnético que tende a se alinhar com o campo magnético gerado por ímãs permanentes do motor. No entanto, assim que o campo magnético gerado pela bobina se alinha com o campo existente, é necessário que haja a comutação do sentido da corrente elétrica para que o motor continue em movimento. Essa comutação é realizada por escovas de carvão sob contatos metálicos nos motores que utilizam escovas.

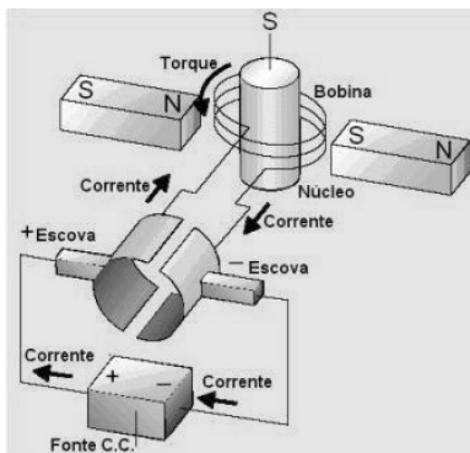


Figura 3 - Esquema representando motor elétrico de corrente contínua.

Fonte: www.siemens.com

Este tipo de motor possui diversas vantagens, entre elas podem-se destacar as seguintes:

- Elevado torque de partida e em baixas rotações;
- Facilidade de controlar a velocidade do motor e
- Ampla variação de velocidade.

O controle de velocidade é de extrema importância em diversas aplicações. Em motores de corrente contínua com escovas, o simples aumento da tensão de alimentação aumenta a sua velocidade, sendo este um dos motivos pelo qual este tipo de motor ainda é bastante utilizado. Entretanto, se for considerada uma mesma faixa de potência, possuem custo mais elevado quando comparados aos motores de indução. Além disso, a manutenção dos comutadores (escovas), a criação de faíscas na comutação, inviabilizando seu uso em áreas perigosas, e a necessidade de procedimentos especiais de partida são outros pontos negativos nos motores de corrente contínua com escovas.

Os motores de corrente contínua sem escovas oferecem diversas vantagens em relação aos com escovas. Pode-se dizer que a mais evidente delas é a redução dos custos de manutenção, pois não existem escovas para serem trocadas, contribuindo também para um aumento da vida útil do motor. Além disso, sua eficiência é mais alta e seus níveis de ruído acústico e interferência eletromagnética são normalmente mais baixos.

Em relação aos motores com escovas, as principais desvantagens dos motores sem escovas estão relacionadas ao seu controle de velocidade. Em primeiro lugar, para manter o motor girando, mesmo que em velocidade constante, é necessário um sistema de controle, o que não acontece para no caso dos motores com escovas, que podem operar em velocidade constante desde que sejam alimentados com uma tensão constante. Além disso, o controle de velocidade é relativamente complexo e caro.

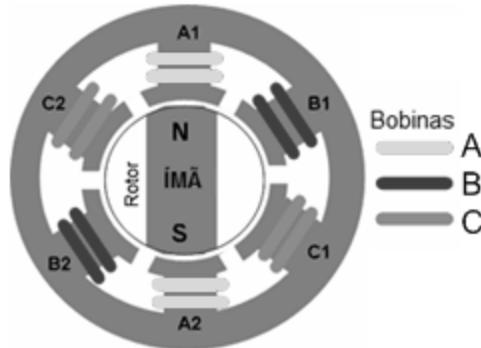


Figura 4 - Esquema de um motor elétrico de corrente contínua sem escovas.

2.1.2. Motores de corrente alternada

Os motores de corrente alternada podem ser divididos em dois grandes grupos: assíncronos (motores de indução) e síncronos [BEATY]. Uma característica importante dos motores síncronos de corrente alternada é que estes possuem torque apenas na velocidade síncrona, não sendo possível a sua partida sem auxílio. Normalmente são utilizadas bobinas adicionais para que o motor acelere através do princípio do motor de indução (indução de corrente elétrica e repulsão de campo). Pode-se também contar com um motor de corrente contínua para levar a velocidade do motor até valores próximos da velocidade síncrona, quando é então acionada a alimentação de corrente alternada do motor síncrono.

Os motores síncronos possuem velocidade fixa, independentemente da carga aplicada. No caso dos motores de indução, a velocidade depende do escorregamento do motor. O escorregamento representa a diferença entre a velocidade síncrona do

motor (campo magnético girante gerado pela corrente de alimentação) e a velocidade real, de acordo com a equação a seguir:

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.1)$$

Onde:

- s = escorregamento,
- n_s = velocidade síncrona do motor e
- n_r = velocidade real do motor.

O escorregamento do motor depende de diversos fatores, entre eles o projeto do mesmo e o desempenho desejado para o motor. Além disso, a carga exerce influência direta sobre a velocidade do motor.

2.1.3. Motores lineares

Os **motores lineares** podem gerar movimento linear sem a necessidade de elementos mecânicos que transformem o movimento rotativo em linear. Este é um ponto positivo quando se deseja obter dispositivos mecânicos simples. No caso de motores lineares síncronos, seu movimento mecânico acompanha o campo magnético, ou seja, não há escorregamento, como no caso dos motores rotativos de indução. Podem ser utilizados elementos eletromagnéticos alimentados por corrente contínua (eletroímãs) para gerar o fluxo repulsivo ao campo magnético móvel, mas é muito comum o uso de ímãs permanentes para esta aplicação [GIERAS].

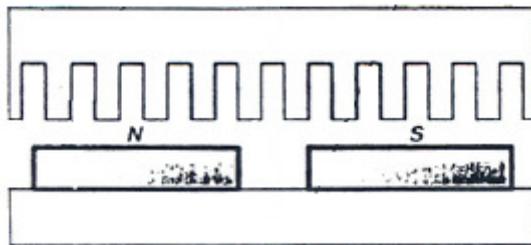


Figura 5 - Desenho representando corte longitudinal de um motor linear síncrono. Adaptado de [GIERAS].

Boa parte do crescente desenvolvimento dos motores lineares é estimulada pelos seguintes fatos [GIERAS]:

- A engenharia de materiais desenvolve materiais que permitem maiores potências e rendimentos nos motores, sendo os ímãs de terras-raras um exemplo;
- Os métodos de controle dos motores estão cada vez mais inteligentes, utilizando controles adaptativos que se auto-ajustam;
- As áreas de aplicação estão se multiplicando, contando atualmente com computadores, robótica, carros elétricos, trens bala e muitos outros;
- Este tipo de motor possui elevada eficiência energética, o que é cada vez mais importante devido às crescentes pressões dos mercados para que os produtos economizem energia e
- Compressores que não utilizem mecanismos de conversão de movimento rotativo em linear são uma promessa para o futuro da refrigeração.

2.2. Materiais magnéticos

Os materiais podem se comportar de diferentes maneiras quando sobre eles é aplicado um campo magnético, sendo seis os comportamentos magnéticos possíveis: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, antiferromagnetismo, ferrimagnetismo e superparamagnetismo [CULLITY]. Em materiais que apresentam comportamento ferromagnético, são formados os domínios magnéticos, regiões onde os momentos magnéticos atômicos estão alinhados em um mesmo sentido. Com a aplicação de um campo magnético externo, é possível atingir um estado onde todos os domínios magnéticos apontem no sentido do campo aplicado. Além disso, mesmo depois de extinto o campo externo, certo número de domínios permanece alinhado no mesmo sentido, criando no material a remanência.

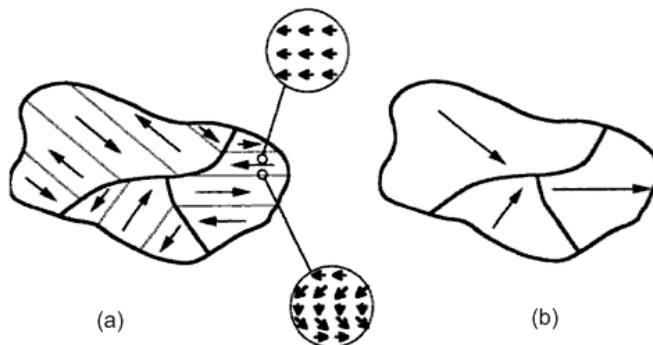


Figura 6 - Representação das regiões de domínios magnéticos em um material (a) desmagnetizado e (b) com magnetização remanente. [COEY]

Na Figura 6 (a), podem ser vistas as regiões de domínio magnético, onde a orientação resultante de cada domínio está representada pela seta. Os momentos magnéticos estão localmente alinhados, formando os domínios, mas a magnetização resultante é igual a zero. Quando o material é magnetizado, os domínios são alinhados com a direção do campo aplicado, como pode ser visto na Figura 6 (b).

De acordo com a teoria dos domínios de Weiss, o processo de magnetização ocorre em três etapas [JILES]:

1ª etapa - Crescimento de domínios: Domínios que estão alinhados favoravelmente ao campo magnetizante crescem e os demais são reduzidos;

2ª etapa - Rotação dos domínios: Momentos magnéticos atômicos dentro de um domínio alinhado de forma desfavorável superam a energia de anisotropia e subitamente giram de sua direção original de magnetização para o eixo cristalográfico fácil que está mais perto da direção do campo magnetizante.

3ª etapa - Rotação coerente: Os domínios magnéticos que estavam alinhados com os eixos cristalográficos fáceis são gradativamente rotacionados até a direção do campo externo H . Como resultado, tem-se uma amostra de domínio único alinhado com o campo externo.

O campo magnético induzido no interior do material é dado pela expressão 2.2:

$$B = \mu_0 H + J \quad (2.2)$$

Como se pode perceber pela equação anterior, o campo induzido B é composto pela parcela do campo aplicado: $\mu_0 H$, e pela parcela de campo gerada pelo próprio material: J , que é a polarização do material e também pode ser representada pela magnetização M , sendo M igual a J/μ_0 . No SI, B é representado em Teslas (T), sendo neste trabalho empregada a unidade Gauss (1 tesla = 10000 Gauss). O campo magnético H , por sua vez, é dado em ampères por metro (A/m) e μ_0 é uma constante chamada *permeabilidade do vácuo*, sendo igual a $4\pi \cdot 10^{-7}$ Henry por metro (H/m).

Para avaliar as características dos materiais magnéticos, é normalmente utilizada uma curva de histerese. Esta curva é gerada a partir da resposta do material em função de um campo magnético aplicado, sendo que esta resposta pode ser representada em função da indução magnética do material (B) ou de sua polarização (J), que é igual à magnetização (M) multiplicada pela constante de permeabilidade do vácuo μ_0 .

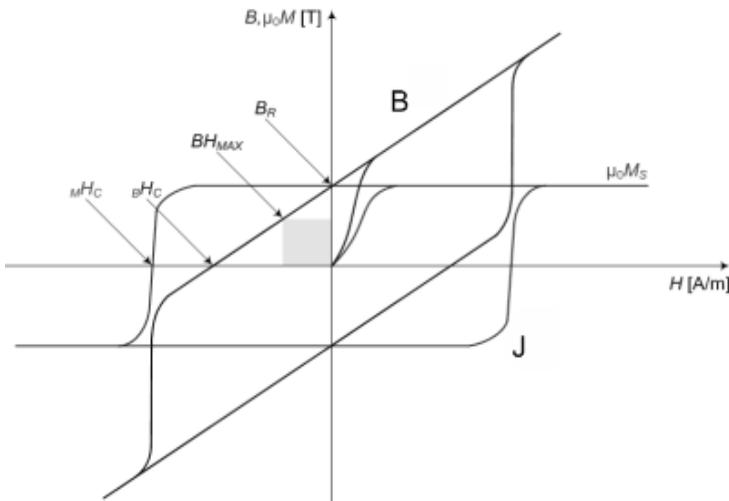


Figura 7 - Curva de histerese típica de um material ferromagnético duro representada pela indução magnética (curva B) e pela polarização (curva J).

Quando a curva de histerese é feita a partir de um material desmagnetizado, esta apresenta uma trajetória de curva inicial de magnetização, partindo da origem do plano cartesiano. O campo então é elevado até seus limites máximo e mínimo.

É importante perceber que, apesar de as duas curvas representadas na figura anterior tratarem do mesmo material, há uma diferença muito importante entre elas: a curva de indução magnética (curva B) cresce indefinidamente com a aplicação do campo, pois a indução magnética possui uma parcela dependente do campo aplicado ($\mu_0 H$), enquanto a curva de polarização (curva J) possui um valor máximo, o qual representa a polarização de saturação. Além do valor da polarização de saturação do material, a curva de histerese fornece outras importantes informações, sendo elas as seguintes:

- **Indução remanente (B_r):** Representa a indução magnética que permanece no material após a eliminação do campo externo.
- **Campo coercitivo (H_c):** Campo magnético que deve ser aplicado ao material para que o sentido de magnetização seja invertido.
- **Produto de energia (BH_{max}):** É a quantidade máxima de energia que pode ser armazenada no ímã. É obtido através da área do maior quadrilátero inscrito no segundo quadrante da curva $B \times H$ e sua unidade no SI é joules por metro cúbico (J/m^3).

Os materiais magnéticos podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o formato da curva de histerese (ver Figura 8).

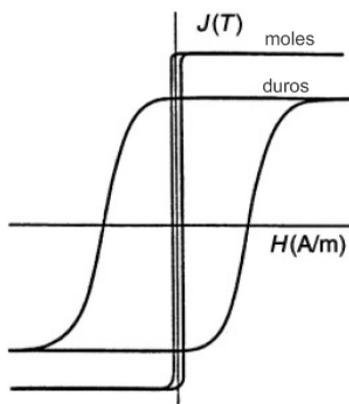


Figura 8 - Curva de histerese para materiais magnéticos moles e duros. Adaptado de [BUSCHOW].

Os materiais magnéticos duros, também chamados de ímãs permanentes, são caracterizados por elevados valores de indução remanente. Os ímãs de terras-raras são os que apresentam os maiores valores de produto de energia, tendo como destaque o $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. A Figura 9 apresenta a evolução do produto de energia dos ímãs permanentes em função do desenvolvimento destes materiais ao longo dos anos.

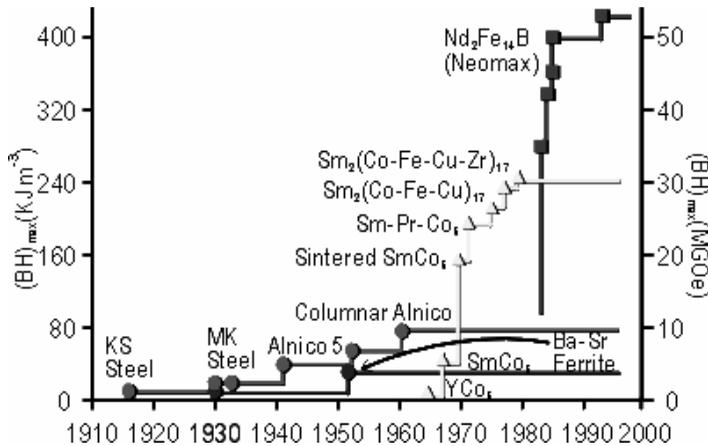


Figura 9 - Evolução do produto de energia para diversos tipos de ímãs permanentes. [CULLITY]

Para os materiais magnéticos moles, a indução remanente, a coercividade e o produto de energia apresentam valores muito inferiores aos dos ímãs permanentes. Estes materiais podem ser facilmente magnetizados e desmagnetizados, sendo esta uma das razões para que sejam utilizados em circuitos magnéticos de corrente elétrica alternada (motores elétricos, transformadores, entre outros).

2.2.1. Processos de fabricação de ímãs permanentes

Os ímãs permanentes podem ser fabricados através de diversas técnicas. Cada uma delas apresenta suas vantagens e desvantagens, tanto em relação às características finais dos ímãs quanto em relação aos custos de produção.

2.2.1.1. Sinterizados

Ímãs sinterizados são obtidos através dos métodos tradicionais de metalurgia do pó. O pó magnético é compactado sob ação de um campo magnético que pré-alinha as partículas, sendo em seguida submetido ao processo de sinterização, que gera uma peça com elevada densidade devido à eliminação de boa parte dos poros existentes no material. O pré-alinhamento torna o ímã anisotrópico² e este é feito somente de pó magnético, gerando um ímã com elevados valores de indução remanente. No entanto, apesar de gerar ímãs de alto desempenho, este processo tem custo elevado devido às altas temperaturas de sinterização necessárias, à dificuldade em se obter geometrias complexas e às baixas tolerâncias dimensionais (muitas vezes são necessários processos adicionais de acabamento).

2.2.1.2. Compósitos

Através da mistura de pós magnéticos com uma matriz polimérica surgiram os ímãs compósitos. A adição do polímero facilita os processos de usinagem dos ímãs, que são bastante difíceis e caros no caso dos sinterizados. Podem ser utilizadas resinas epóxi, poliamida ou elastômeros, dependendo do processo de fabricação desejado. Como possuem uma parcela (em volume) de material polimérico, que não apresenta características ferromagnéticas, os ímãs compósitos possuem valores de indução remanente muito abaixo dos ímãs sinterizados³, resultando em valores de produto de energia menores que os encontrados nos ímãs sinterizados. Ainda assim, a possibilidade de se obter ímãs com formas geométricas complexas, com custos de fabricação baixos, torna os compósitos uma opção muito atraente.

² Ímã anisotrópico: Apresenta características magnéticas diferentes de acordo com a direção de aplicação do campo magnético.

³ Os valores de indução remanente de ímãs compósitos dependem do percentual (em volume) de polímero adicionado ao material ferromagnético.

2.3. Métodos de magnetização

A magnetização de um material é feita através da aplicação de um campo magnético externo à peça. Tal campo pode ser gerado a partir de:

- Materiais previamente magnetizados (ímãs permanentes) ou
- Através da corrente elétrica que circula em um condutor.

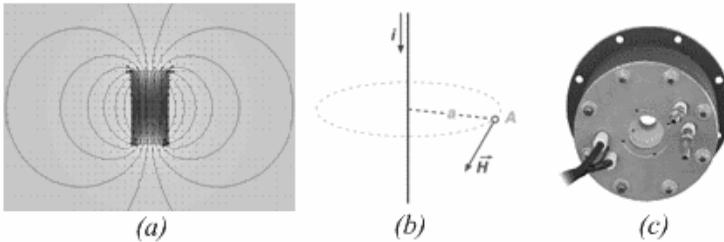


Figura 10 - (a) Representação das linhas de campo em um ímã permanente retangular. (b) Campo magnético gerado por uma corrente elétrica (c) Bobina utilizada para a magnetização de pequenas peças.

2.3.1. Campos magnéticos constantes

Através de ímãs permanentes ou correntes elétricas constantes circulando em condutores, podem-se gerar campos magnéticos constantes. Estes campos normalmente possuem valores abaixo do necessário para a magnetização dos materiais magnéticos duros. Isso se deve ao fato de que, a não ser que seja utilizado um circuito magnético, o campo que sai do ímã permanente é disperso pelo ambiente em várias direções, sendo que o módulo do valor de campo que passa por uma região em particular é pequeno. No caso de correntes elétricas circulando em condutores, se esta for constante, uma grande quantidade de energia é dissipada no condutor, causando aquecimento do mesmo. Se este aquecimento não for controlado, o calor pode causar a destruição da bobina.

2.3.2. Campos pulsados

Como a magnetização de um material acontece praticamente instantaneamente devido ao rápido movimento das paredes de domínio, é mais conveniente a aplicação de um campo de curta duração sobre a amostra que se deve magnetizar do que a aplicação de campos

constantes. Estes campos de curta duração são normalmente chamados de campos pulsados.

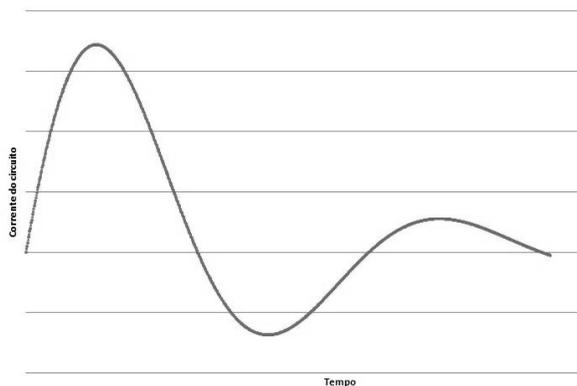


Figura 11 - Corrente elétrica que circula em um circuito de um magnetizador de pulso durante o pulso.

O circuito elétrico utilizado para a criação de um pulso magnético é composto basicamente por um capacitor (ou um banco de capacitores), um indutor (a bobina ou enrolamento onde é gerado o campo magnético) e pelas resistências elétricas intrínsecas do circuito. Esses elementos formam um circuito RLC (resistência, indutância e capacitância) série, como pode ser visto na figura a seguir.

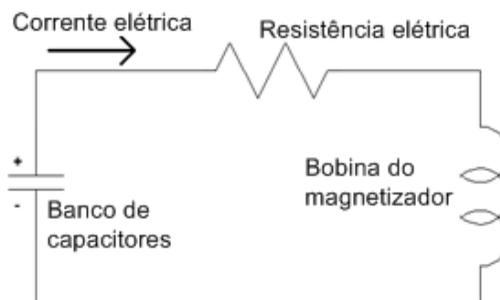


Figura 12 - Circuito simplificado de um aparelho magnetizador que utiliza pulsos durante a aplicação do pulso.

Em um aparelho magnetizador que funciona com pulsos, os capacitores são inicialmente carregados sem que estejam ligados à bobina de magnetização. São eles os responsáveis por armazenar a energia que será liberada durante o pulso: quanto maior a quantidade de

energia armazenada neles, maior será a intensidade de corrente circulando pelo circuito e, assim, maior a intensidade do campo magnético que é aplicado. Os capacitores carregados são então conectados ao circuito e a corrente elétrica gerada cria o pulso de campo magnético.

2.3.3. Bobinas supercondutoras

A utilização de bobinas supercondutoras é uma alternativa para a geração de elevados campos magnéticos. A supercondutividade foi descoberta em 1911 pelo físico Heike Kamerlingh Onnes quando observou que a resistência elétrica do mercúrio desaparecia quando resfriado a 4 K (269,15°C). Enquanto Kelvin previa que a resistividade dos materiais deveria subir infinitamente no zero absoluto devido ao "congelamento" dos elétrons, Onnes acreditava que, como a resistividade dos materiais diminui com a temperatura, essa redução seria gradativa até chegar a zero na temperatura de zero absoluto. Porém, Onnes comprovou que a resistividade dos materiais cai abruptamente para zero abaixo de uma temperatura crítica. Os materiais supercondutores exibem duas importantes características: resistividade nula quando resfriado abaixo da temperatura crítica (T_c), e diamagnetismo perfeito, ou seja, exclusão do campo magnético em seu interior, característica denominada efeito Meissner. A demonstração clássica deste efeito consiste em fazer um ímã permanente flutuar sobre a superfície de um supercondutor.

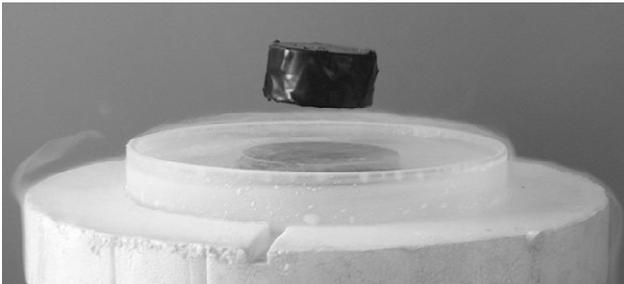


Figura 13 - Ímã permanente flutuando sobre a superfície de um supercondutor: efeito Meissner.

Este efeito foi descoberto em 1933 por Walther Meissner e Robert Ochsenfeld. Ao expor um material supercondutor a um campo magnético externo ele exclui todo fluxo de seu interior até um campo crítico, H_c , acima do qual o efeito supercondutor era destruído. Acima

da temperatura crítica T_c (estado normal) os materiais supercondutores não são bons condutores. Materiais como prata, cobre e ouro não exibem o fenômeno da supercondutividade. O quadro a seguir relaciona alguns exemplos de materiais supercondutores e suas respectivas temperaturas críticas:

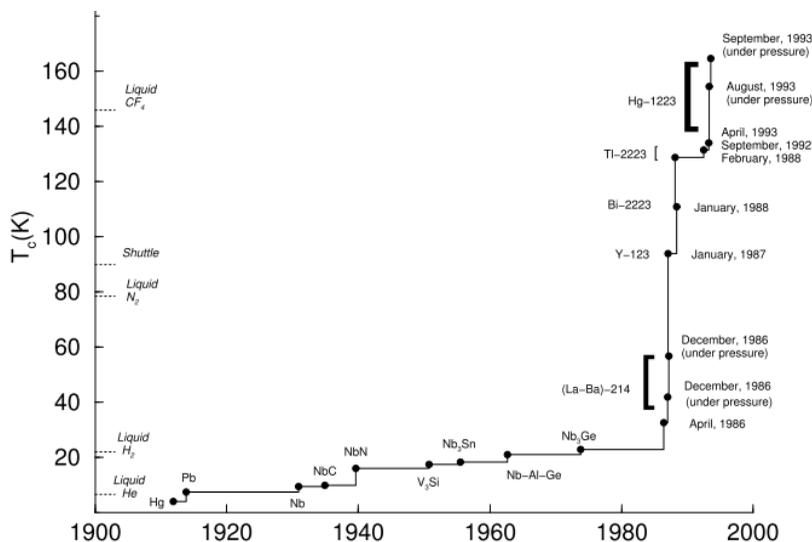


Figura 14 - Evolução da T_c . Adaptado de [ESCHRIG]

2.4. Direções de magnetização

Os materiais ferromagnéticos podem ser magnetizados em diversas direções. No caso de materiais anisotrópicos, a direção de magnetização será normalmente o eixo fácil, ou seja, a direção em que os domínios foram pré-alinhados. Em materiais isotrópicos, não existe uma direção preferencial, sendo que a magnetização pode ser realizada da mesma forma em qualquer direção. A magnetização de um material pode ser unidirecional ou multidirecional [STEINGROEVER]. Se for unidirecional, o campo aplicado é normalmente gerado no interior de uma bobina ou solenóide. A peça é posicionada de forma que o campo aplicado atravessa a mesma de acordo com a magnetização desejada, sendo que este possui apenas uma direção.

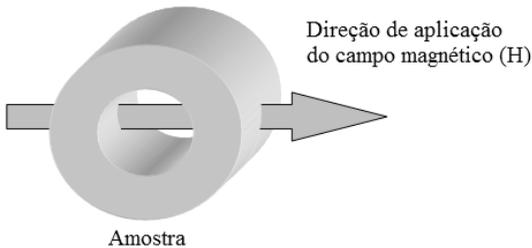


Figura 15 - Amostra sobre a qual é aplicado um campo unidirecional longitudinal.

No caso de campos multidirecionais, como na magnetização radial, é necessária a utilização de algumas técnicas para que o campo que atravessa a peça tenha as direções de magnetização desejadas.

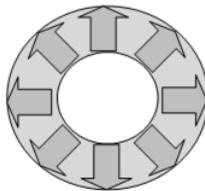


Figura 16 - Amostra sobre a qual é aplicado um campo multidirecional radial.

2.5. Métodos de avaliação de características magnéticas

Diversos métodos e equipamentos são empregados para avaliar diversas características magnéticas de materiais e de peças. A seguir, serão descritos aqueles utilizados neste trabalho.

2.5.1. Histeresígrafo

O histeresígrafo é um equipamento desenvolvido para a determinação de curvas de histerese de materiais ferromagnéticos. Seu funcionamento está baseado na aplicação de um campo magnético sobre a amostra e leitura da indução magnética gerada. Este campo é gerado por um eletroímã e conduzido até a amostra através de um circuito magnético fechado, ou seja, que utiliza materiais magnéticos moles para sua condução ao invés do ar, sendo a amostra parte do circuito. A variação do campo magnético gerado pelo equipamento gera diferentes valores de indução magnética na amostra, gerando assim uma curva de histerese, que pode ser representada em função de indução magnética (B) ou da polarização do material (J). O campo magnético é elevado até o seu valor máximo e então reduzido a zero novamente. Em seguida, sua polaridade é invertida e sua amplitude alcança o valor máximo novamente. Assim, é gerada a curva de desmagnetização do material, ou curva de segundo quadrante, que apresenta informações importantes sobre o ímã, como indução remanente, campo coercitivo e produto de energia máximo.

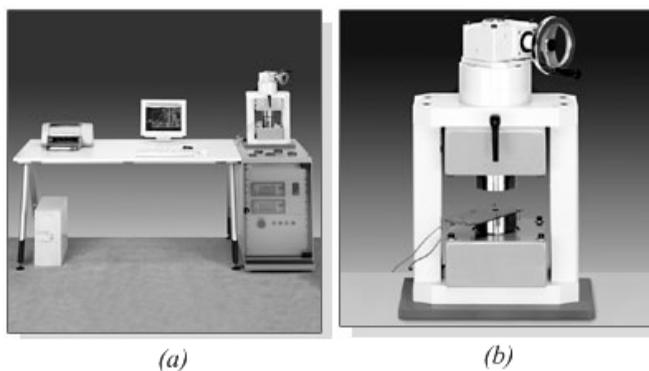


Figura 17 - (a) Bancada completa do histeresígrafo. (b) Estrutura onde é posicionada a amostra.

Uma das limitações apresentadas pelo histeresígrafo é a necessidade de amostras com paredes paralelas entre si e perpendiculares em relação à direção de orientação do campo magnético, que deve ser unidirecional. Outra limitação é o valor máximo de campo gerado pelo equipamento: como são utilizados campos magnéticos contínuos gerados por eletroímãs que muitas vezes não são refrigerados, o limite de corrente elétrica em suas bobinas é relativamente baixo, limitando o campo magnético máximo gerado. Isto pode limitar a medição de alguns tipos de ímãs, principalmente os de terras-raras de alta energia, ou então exigir a magnetização prévia das amostras.

2.5.2. Magnetômetro de amostra vibrante (MAV)

Outra maneira de avaliar as propriedades magnéticas de materiais é através de um Magnetômetro de Amostra Vibrante (MAV). Um MAV gera uma tensão alternada nas bobinas de detecção provocada pela vibração da amostra em uma região com gradiente de campo magnético. A amostra é fixada na extremidade de uma haste rígida e o campo magnético aplicado é transversal à direção de vibração da amostra [SAMPAIO].

A tensão gerada pela vibração da amostra é comparada com a tensão gerada pela vibração de uma amostra padrão que normalmente é fixada na outra extremidade da haste. Como o modo de vibração é senoidal, uma tensão senoidal é gerada pelas amostras. No entanto, a diferença entre os sinais gera um valor constante que depende do campo magnético aplicado, da disposição das bobinas de detecção e também das características da amostra. Um valor de tensão constante proporcional ao campo magnético aplicado à amostra é gerado. Com isso, é possível medir o momento magnético da amostra sem a necessidade de que a amostra seja magnetizada previamente.

O posicionamento da haste deve ser feito de modo a minimizar o sinal detectado na vertical e minimizá-lo na direção transversal, garantindo assim o posicionamento da amostra na parte central dos pólos do eletroímã. Esta calibração é realizada com uma esfera de material com momento magnético conhecido, normalmente níquel puro.

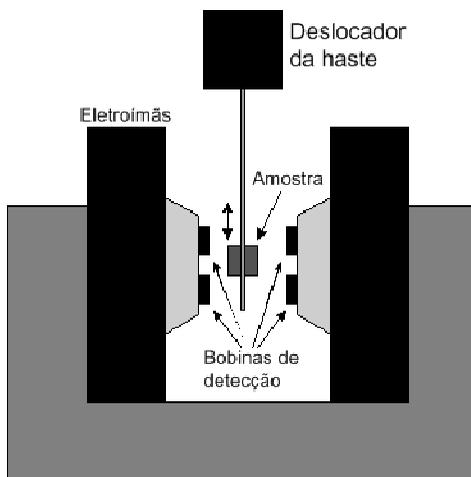


Figura 18 - Representação esquemática de um MAV.

Uma das vantagens do MAV é a temperatura de operação, que pode variar dependendo do sistema de aquecimento de amostras que o equipamento possui, chegando a valores acima de 1000 K ou mesmo abaixo de 5 K, se forem utilizados módulos de resfriamento. Sua relativa simplicidade também contribui para que este equipamento seja largamente empregado em pesquisas de materiais magnéticos. Infelizmente, muitas vezes o tamanho do porta-amostra e a complexidade dos cálculos de fatores desmagnetizantes dificultam a medição de peças em seu formato final. Dessa forma, a principal aplicação do MAV é a avaliação das propriedades magnéticas de um material e não de uma peça.

2.5.3. Avaliação de força eletromotriz

Segundo a lei de Faraday-Lenz, a força eletromotriz que é induzida num circuito elétrico é igual à variação do fluxo magnético concatenado ao circuito, não sendo gerada tensão alguma se este campo não variar. A lei de Faraday em sua forma quantitativa afirma que *a força eletromotriz numa espira condutora é igual ao negativo da taxa em que o fluxo magnético através da espira está variando com o tempo*, como pode ser visto na equação (2.3):

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi_B}{dt} \quad (2.3)$$

Se a taxa de variação do fluxo for dada em webers por segundo, a força eletromotriz induzida será dada em volts. O sinal negativo está relacionado com a polaridade da força eletromotriz induzida em relação ao sentido do campo magnético. A avaliação da força eletromotriz fornece importantes informações quanto ao desempenho do ímã dentro do motor, pois está relacionada ao valor de campo magnético que pode ser gerado pelo ímã.

2.5.4. Mapeamento com sensor Hall

Os sensores de efeito Hall oferecem outra maneira para avaliar as propriedades magnéticas de ímãs, seja através de medidas pontuais ou de um mapeamento de toda a peça.

O efeito Hall ocorre em todo condutor por onde circula uma corrente elétrica que esteja sob efeito de um campo magnético perpendicular à direção da mesma (ver Figura 19).

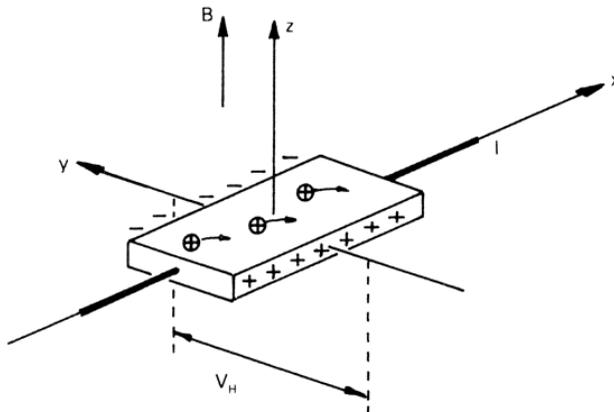


Figura 19 - Representação do efeito Hall sobre uma pequena barra onde atua um campo magnético.

Considerando uma corrente circulando em uma placa fina na direção x e um campo magnético sendo aplicado sobre esta placa na direção z , o caminho de corrente é distorcido e uma força eletromotriz (V_h) é criada na direção y . A intensidade desta distorção depende do produto do campo aplicado pela corrente circulando na placa, conforme a equação seguinte [JILLES]:

$$V_{hall} = \frac{\mu_0 \cdot R_h \cdot i \cdot H}{l_x} \quad (2.4)$$

Onde:

- V_{hall} = Potencial gerado
- R_h = Constante Hall, que é uma propriedade do material
- i = Densidade de corrente circulando pela placa
- H = Campo magnético aplicado
- l_x = Espessura da placa

Este efeito é que permite a construção de sensores de efeito Hall, utilizados para medições de intensidade de campos magnéticos constantes e alternados, sendo que, mantendo o valor de J constante, V_h dependerá apenas da intensidade de campo aplicado ao elemento sensor. Dessa forma, é necessário apenas que seja calibrado o valor de V_h em relação ao valor de H .

Uma grande vantagem dos sensores por efeito Hall é que um campo constante gera uma tensão constante, ou seja, não há necessidade de variação do campo sobre o elemento sensor. Além disso, tais elementos podem ser construídos com tamanhos muito pequenos (na ordem de 1,5 x 1,5 x 0,5 mm ou menores). Estes dois fatores são muito favoráveis quando se deseja medir a intensidade de campo em regiões com gradientes de campo magnético.

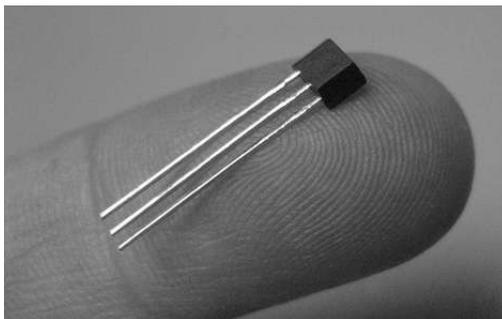


Figura 20 - Sensor de efeito Hall comercial compacto. Fonte: Honeyweel – SS41

Os sensores Hall, apesar de realizarem medidas pontuais de fluxo magnético, podem ser utilizados para obter um perfil magnético de um ímã ou de outro gerador de campo magnético (um solenóide, por exemplo). Assim podem-se avaliar possíveis imperfeições ou variações

no fluxo magnético gerado pelo ímã ao longo de sua superfície. Para isto, basta que as leituras do sensor Hall sejam armazenadas e organizadas de alguma forma. Normalmente, um computador e um sistema de aquisição de dados realizam esta tarefa. Cada ponto lido pela sonda é gravado e associado à posição do ímã em que foi lida. Desta forma, ao final do processo de medição, é obtido um mapa de distribuição de fluxo (ver Figura 21).

O mapeamento magnético superficial (conforme apresentado na Figura 21) apresenta diversas vantagens quando comparado com outras formas de avaliação de propriedades magnéticas (como histeresígrafo e MAV). Algumas das vantagens proporcionadas por este método são:

- O processo de mapeamento não é destrutivo. Depois de realizado, a peça pode ser utilizada sem que tenha sofrido alteração alguma em suas propriedades magnéticas ou em suas dimensões.
- Peças podem ser medidas antes e depois de serem utilizadas. O mapeamento pode verificar se o uso do ímã causou redução de seu fluxo magnético.
- As peças podem ser mapeadas em seu formato final. Diferentemente de uma análise em histeresígrafo que precisa de amostras com duas faces paralelas ou de uma feita em MAV, que também impõe restrições quanto ao formato da peça a ser analisada, o mapeamento superficial pode ser realizado em praticamente todos os formatos de peça. Desta forma, podem ser testadas em seu formato final de uso, evitando assim possíveis diferenças entre os valores das peças preparadas para testes e as peças feitas para uso.

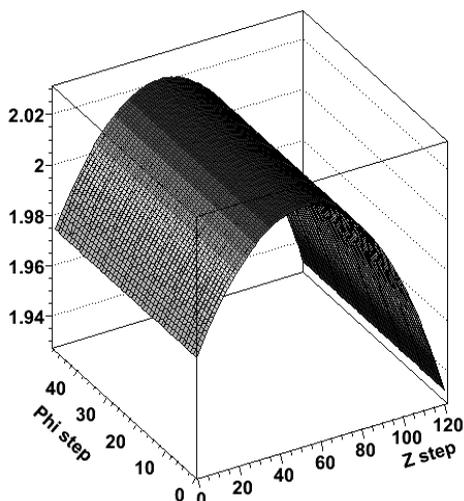


Figura 21 - Indução magnética gerada dentro do CMS⁴ quando o valor especificado é igual a dois teslas. Fonte: CMS Times, 16 de outubro de 2006.

No entanto, alguns cuidados devem ser tomados quando são utilizados sensores Hall para a medição de fluxo magnético:

- Sensores Hall são capazes de medir apenas o campo magnético que os atravessa de forma perpendicular, ou seja, em apenas uma direção. Por isso, devem estar posicionados de acordo com a direção do campo ou devem ser usados sensores simultâneos para a captação de todas as componentes do campo magnético.
- A intensidade do campo magnético gerado por um ímã varia com a distância, sendo maior quanto mais próximo do mesmo. Por isso, o sensor deve ficar sempre à mesma distância da amostra para que as variações de magnetização não sejam afetadas por erros de posicionamento.

Mesmo com estas limitações, já foram identificadas algumas aplicações possíveis do mapeamento magnético superficial, sendo elas:

⁴ CMS: *Compact Muon Solenoid*, ou Solenóide de muons compacto, é um experimento que faz parte do CERN, Organização Européia para Pesquisa Nuclear.

- Mapeamento de campos nos tomógrafos de ressonância magnética que exigem muita precisão;
- Mapeamento dos campos de grandes eletroímãs usados para movimentação de material em empresas de siderurgia;
- Mapeamento de campos para inspeção de fraturas e corrosão em tubulações de ferro e
- Mapeamento de ímãs multipolares utilizados em sensores.

Dessa forma, pode-se perceber que este tipo de análise pode oferecer alternativas para avaliação de características magnéticas de ímãs, complementando os métodos tradicionais. Para este trabalho, serão empregados os conceitos de sensor Hall e sonda Hall. O sensor Hall será considerado o micro circuito integrado que contém o elemento semiconductor que apresenta o efeito Hall. Por sua vez, a sonda Hall será considerada a haste do instrumento que usa o sensor de efeito Hall para medir indução magnética.

3 Metodologia e procedimento experimental

Neste capítulo, apresentar-se-á a metodologia e os procedimentos experimentais utilizados para avaliar ímãs em forma de anel magnetizados radialmente. O procedimento experimental foi composto por quatro etapas:

- Preparação de amostras;
- Magnetização radial.
- Mapeamento de indução magnética superficial e
- Avaliação da força eletromotriz.

Apesar de fazer parte da preparação das amostras, a magnetização radial será descrita em tópico separado para melhor compreensão de suas características.

3.1. Preparação das amostras

Foram utilizados neste trabalho ímãs de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ com diversas configurações de montagem para permitir que o sistema de mapeamento com sensor Hall (apresentado na seção 0) pudesse ser validado e permitir também que fossem atingidos os objetivos do trabalho (ver seção 1.2). Estes ímãs passaram por processos como magnetização, usinagem e colagem, que foram realizados de forma a minimizar alterações dimensionais ou magnéticas.

3.1.1. Tipos de amostras utilizadas

Para que todos os objetivos do trabalho fossem atingidos, foi necessária a criação de diversos tipos de amostras de ímãs, a maioria delas composta por dois anéis unidos após a sua magnetização através de colagens especiais. Todo o grupo de amostras utilizado será descrito em seguida e está mostrado no Quadro 2.

Objetivo	Análises realizadas	Grupo	Tipo	Amostra
Validação do mapeamento com sensor Hall	Mapeamento e análise de força eletromotriz	Anéis compósitos duplos	Padrão	02, 04, 05
			25% de redução de parede	07, 13
			50% de redução de parede	08, 21
			75% de redução de parede	09, 24
			100% de redução de parede	18, 29
			Somente um anel magnetizado	14, 17
			Furos	6, 23
			Redução de parede distribuída	1, 22
			Aquecimento pontual	19
Análise de resultados práticos	Mapeamento e análise de força eletromotriz	Anéis feitos a partir de extrusão reversa	Anéis utilizados em motores lineares	A, B
Avaliação do magnetizador	Mapeamento	Magnetização dupla em anéis simples	Pulso único	-
			Pulso duplo a 180°	-
Avaliação da compactação	Curva de histerese, mapeamento e análise de força eletromotriz	Compactação em disco	Anel único	12

Quadro 2 - Tipos de amostras utilizadas.

Cada grupo de amostras foi elaborado e preparado com o intuito de atender aos objetivos do trabalho de forma satisfatória. Alguns trabalhos posteriores são sugeridos (ver seção 5.14) para complementar e reforçar os resultados obtidos.

3.1.2. Anéis de Nd₂Fe₁₄B compósitos duplos

As principais amostras utilizadas compreendem anéis feitos a partir de pó de Nd₂Fe₁₄B isotrópico fornecido pela empresa Magnequench (<http://www.amr-ltd.com>) e compactado através de

pressas automáticas pela empresa brasileira Brats. Nem a fabricação do pó e nem a compactação das amostras foram acompanhadas, por isso, ambos os processos estão sujeitos a desvios e variações, os quais também serão avaliados neste trabalho. O anel compactado está representado na Figura 22.

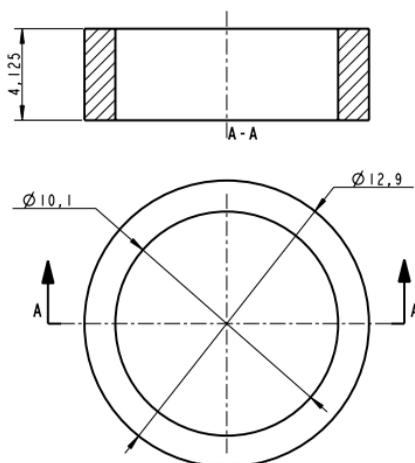


Figura 22 - Desenho técnico do anel de $Nd_2Fe_{14}B$ compactado.

Para que se pudesse avaliar a força eletromotriz das amostras, foi necessária a montagem de ímãs compostos por dois anéis cada. Isso se deve ao fato de que o aparelho utilizado (dinamômetro) possui um estator projetado para ímãs com 8,25 mm de altura (o dobro da altura do anel compactado). Além disso, o magnetizador dos anéis aceita apenas anéis com até 4,5 mm de altura, não sendo possível a magnetização de amostras maiores. Após a magnetização dos anéis, os mesmos são colados em pares a um anel feito de material não-metálico (foram utilizados Celeron® e cerâmica branca) que por sua vez foi colado em uma base especial com acoplamento para montagem no dinamômetro, como se pode ver na Figura 23:

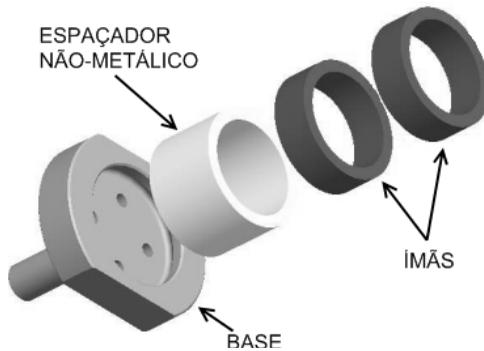


Figura 23 - Esquema de montagem das amostras compostas por dois anéis magnéticos.

As peças foram coladas entre si com cola *Three Bond 2202C*, que precisa de aquecimento para cura completa (Tabela 3).

Tabela 3 - Dados da cola *Three Bond 2202C* utilizada na colagem dos ímãs.

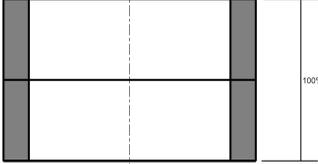
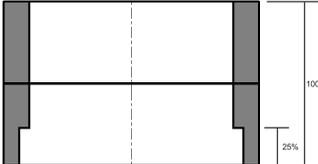
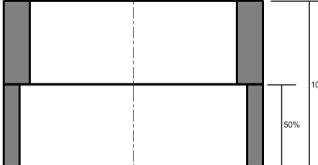
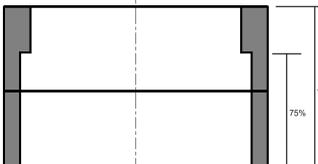
Cola 2202C	Condições de cura padrão				
	70°C	80°C	90°C	100°C	120°C
Temperatura	70°C	80°C	90°C	100°C	120°C
Tempo (minutos)	-	15-30	-	10-15	5-10

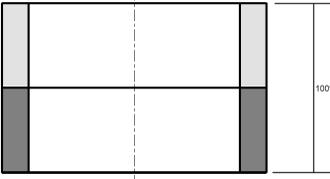
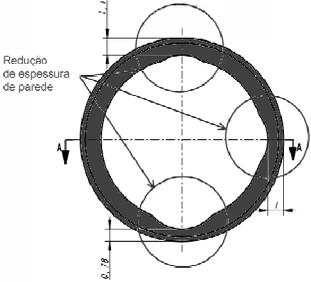
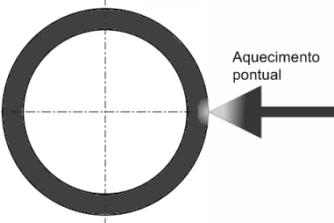
Para que as peças ficassem alinhadas durante o processo de cura, foi desenvolvido um dispositivo de colagem que, além do alinhamento geométrico, facilita a passagem de fluxo magnético, formando assim um circuito magnético fechado com os ímãs, reduzindo as chances de desmagnetização dos mesmos. Para evitar que as peças colassem no próprio dispositivo, este foi construído com uma parte em Teflon®, que não adere à cola utilizada (ver Figura 24).



Figura 24 - Dispositivo utilizado para colagem das amostras. (a) Desenho tridimensional e (b) corte transversal.

As peças coladas foram então usinadas de diversas formas, como mostra a Quadro 4.

Tipo de amostra	Descrição	Representação do ímã
Padrão	Amostra sem alterações.	 <p>The diagram shows a rectangular magnet with a central vertical dashed line. The top and bottom walls are shaded gray. A vertical dimension line on the right indicates the full height of the magnet is 100%.</p>
25% de redução de parede	Espessura da parede reduzida pela metade ao longo de 25% do comprimento do ímã.	 <p>The diagram shows a rectangular magnet with a central vertical dashed line. The top and bottom walls are shaded gray. The bottom portion of the walls is reduced in thickness. A vertical dimension line on the right indicates the full height is 100%, and a smaller vertical dimension line below it indicates the reduced thickness is 25%.</p>
50% de redução de parede	Espessura da parede reduzida pela metade ao longo de 50% do comprimento do ímã.	 <p>The diagram shows a rectangular magnet with a central vertical dashed line. The top and bottom walls are shaded gray. The bottom portion of the walls is reduced in thickness. A vertical dimension line on the right indicates the full height is 100%, and a smaller vertical dimension line below it indicates the reduced thickness is 50%.</p>
75% de redução de parede	Espessura da parede reduzida pela metade ao longo de 75% do comprimento do ímã.	 <p>The diagram shows a rectangular magnet with a central vertical dashed line. The top and bottom walls are shaded gray. The bottom portion of the walls is reduced in thickness. A vertical dimension line on the right indicates the full height is 100%, and a smaller vertical dimension line below it indicates the reduced thickness is 75%.</p>
100% de redução de parede	Espessura da parede reduzida pela metade ao longo de todo o comprimento do ímã.	 <p>The diagram shows a rectangular magnet with a central vertical dashed line. The top and bottom walls are shaded gray. The entire length of the top and bottom walls is reduced in thickness. A vertical dimension line on the right indicates the full height is 100%.</p>

<p>Somente um anel magnetizado</p>	<p>Apenas um dos anéis foi magnetizado.</p>	
<p>Furos</p>	<p>Feitos 3 furos espaçados em 120° em um dos ímãs.</p>	
<p>Redução de parede distribuída</p>	<p>Espessura da parede de um dos anéis reduzida em três pontos diferentes para três espessuras diferentes.</p>	
<p>Aquecimento pontual</p>	<p>Um dos anéis superaquecido até 375°C em um único ponto de sua superfície externa.</p>	

Quadro 4 - Representação das amostras de anéis duplos utilizadas.

As reduções de parede interna dos ímãs foram realizadas através de retífica circular com rebolo diamantado. É necessário extremo cuidado durante este processo para evitar a quebra dos anéis ou mesmo seu descolamento (evento que ocorreu mais de uma vez durante as preparações de amostras). Além disso, este processo é lento e exige

que seja previamente preparada uma peça que circunda os ímãs durante a sua usinagem e transporte, reduzindo-se assim o risco de quebra. Os furos foram feitos com uma furadeira de alta rotação e brocas de aço-rápido. A mesma furadeira foi empregada para a redução variável da espessura da parede. No aquecimento pontual, foi adequado o uso de uma estação de solda com temperatura controlada e um ferro de solda. A regulagem de temperatura utilizada foi de $\approx 375^{\circ}\text{C}$.

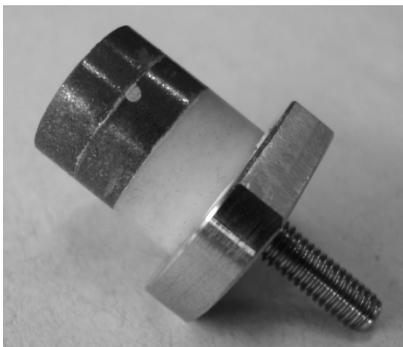


Figura 25 - Amostra pronta para mapeamento magnético.

3.1.3. Magnetização dupla de anéis

Também para avaliar a capacidade de magnetização do magnetizador para campos radiais, alguns anéis foram magnetizados mais de uma vez em posições diferentes. Neste caso, foram utilizados apenas anéis simples com 4,125 mm de altura, sem a colagem da base ou de outros anéis. Quatro anéis foram magnetizados em apenas uma posição e mais quatro receberam um pulso de magnetização em sua posição inicial e foram então rotacionados em 180° para receber um novo pulso (ver Figura 26).

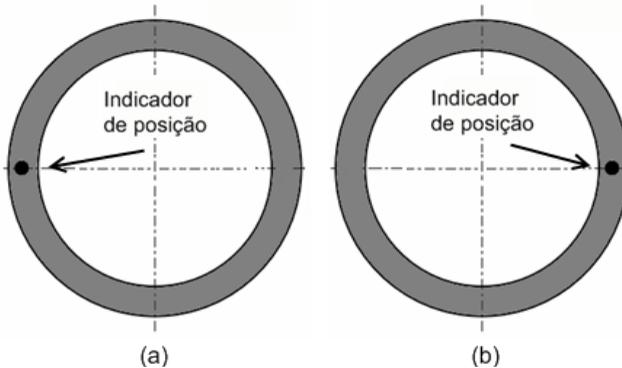


Figura 26 - (a) Primeiro pulso aplicado. (b) Segundo pulso aplicado, com 180° de diferença para o primeiro.

3.1.4. Anéis feitos através de extrusão reversa

Foram avaliados dois tipos de anéis magnéticos de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ feitos a partir de extrusão reversa. Estes anéis foram utilizados em motores lineares para determinação de desempenho dos motores. Foi feito o mapeamento de algumas amostras e posteriormente sua montagem para o teste.

Após algum tempo em teste, percebeu-se que os motores perderam eficiência, consumindo mais energia para o mesmo valor de potência entregue. Os motores foram desmontados e inspecionados visualmente, mas não foi possível perceber nenhum tipo de falha sequer.

Foi realizado então mapeamento magnético das amostras e sua comparação com as medidas originais de peças do mesmo lote. Também sua força eletromotriz foi avaliada e comparada com os valores originais.



Figura 27 - Anéis fabricados através do método de extrusão reversa.

3.1.5. Anéis com magnetização axial

Para determinação das propriedades extrínsecas do material magnético, foi feita sua análise em histeresígrafo e em magnetômetro de amostra vibrante, ou MAV. O histeresígrafo somente pode analisar amostras que possuam magnetização no sentido de duas faces paralelas. Como os anéis utilizados neste trabalho possuem magnetização radial, estes não puderam ser testados em histeresígrafo.

Para resolver este problema, alguns anéis foram magnetizados de forma unidirecional na direção longitudinal, de acordo com a Figura 28.

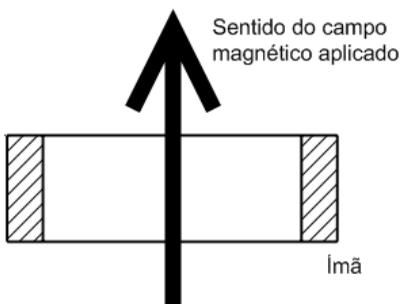


Figura 28 - Corte transversal do ímã mostrando o sentido do campo magnético aplicado.

Foi obtida a curva de histerese destes anéis com o histeresígrafo e esta foi utilizada como referência para as simulações realizadas neste trabalho.

3.2. Magnetização radial

Para a geração do campo para uma magnetização radial foi criada uma estrutura capaz de opor o campo magnético gerado por duas bobinas. Esta oposição causa a repulsão dos campos, criando um campo magnético resultante aproximadamente radial (ver figuras Figura 29 e Figura 30) [STEINGROEVER] [HOR].

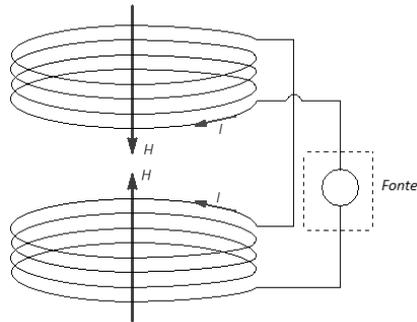


Figura 29 - Esquema simplificado do circuito utilizado para a geração de campo magnético radial.

A amostra em formato de anel é então posicionada entre as bobinas de forma que o campo magnético resultante da repulsão dos campos individuais de cada bobina atravesse a amostra de forma quase radial.

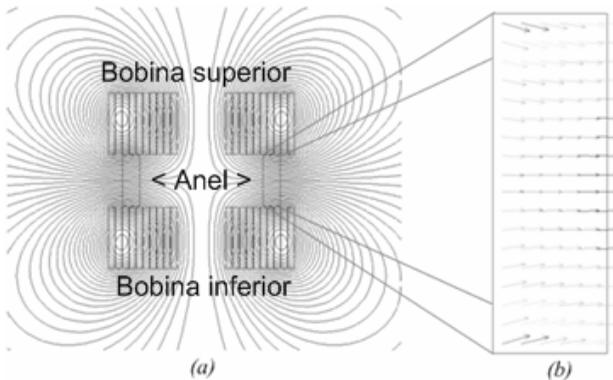


Figura 30 - (a) Simulação computacional do campo magnético resultante da oposição do campo de duas bobinas. (b) Ampliação da região do ímã com os vetores de campo magnético.

Através da simulação em computador do campo gerado pelas duas bobinas, pode-se perceber que o campo que passa pelas regiões mais afastadas do centro da amostra não são radiais (ver Figura 30). Podem ser percebidos alguns pontos onde a magnetização da amostra não é perfeitamente uniforme.

3.3. Mapeamento de indução magnética na superfície nos anéis

O equipamento utilizado para o mapeamento magnético foi desenvolvido durante este trabalho a partir de uma sonda Hall. Todo o conjunto mecânico e sistemas de aquisição e tratamento de dados foram desenvolvidos. Cada uma das partes que compõe o sistema será descrita a seguir.

3.3.1. Sonda Hall

Nos testes realizados neste trabalho, foi utilizada uma sonda Hall (TLMP-HALL-02 – GlobalMag) como sensor para a indução magnética sobre a superfície externa das amostras. Esta sonda possui faixa de medição de ± 2000 Gauss ($\pm 0,20$ Tesla)⁵ e alimentação por baterias de 9,0 V. A alimentação por baterias reduz o nível de ruído do sinal de saída drasticamente, sendo essencial para que os valores medidos tenham níveis de ruído desprezíveis⁶.

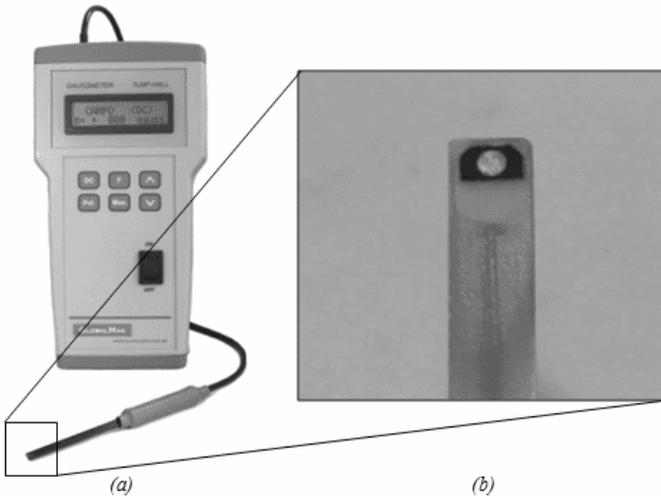


Figura 31 - (a) Gaussímetro que utiliza sonda Hall. (b) Detalhe mostrando sensor Hall na ponta da haste.

⁵ O sinal “±” indica que a sonda pode medir campos com orientação NORTE ou SUL.

⁶ Para este trabalho, serão considerados desprezíveis níveis de ruído menores que 5% do valor de leitura.

Cada sonda é calibrada pelo fabricante a partir de padrões magnéticos rastreados, possuindo precisão de $\pm 2\%$ da leitura $\pm 1\%$ do fundo de escala. Para que as leituras da sonda pudessem ser disponibilizadas em um software residente em um computador, foi adicionada ao gaussímetro uma saída de sinal analógico de tensão. Dessa forma, os valores de indução lidos pela sonda são convertidos durante a própria leitura em um sinal de tensão que é enviado à placa de aquisição de dados presente no computador.

Neste trabalho, serão chamados sensores Hall os circuitos integrados que possuem elementos Hall e sondas Hall as hastes ou quaisquer dispositivos que utilizam sensores Hall para realizarem medições de indução magnética.

3.3.2. Dispositivo mecânico

O sistema que realizou o mapeamento magnético das amostras foi montado de acordo com as seguintes necessidades básicas:

- Posicionamento confiável e preciso;
- Movimento de rotação preciso e repetitivo e
- Versatilidade em relação ao tamanho das amostras.

Como base de todo o sistema, foi adotada uma chapa de aço de 10 mm de espessura com 300 mm de largura e 300 mm de comprimento.



Figura 32 - Base do sistema de mapeamento magnético.

Nesta base são posicionados o sensor Hall, o sensor laser (ver seção 3.3.2.3) e o motor de passo (ver seção 3.3.2.2). Apenas o motor de passo possui local fixo, sendo seu suporte parafusado na base do sistema. Tanto o sensor Hall quanto o laser podem ser colocados em qualquer parte da base, atendendo assim a diferentes tamanhos de

amostras. Sob a base foram colocados quatro amortecedores de borracha para reduzir a vibração transmitida pelo sistema. Para que o sistema tenha posicionamento confiável e preciso, foi utilizada uma base móvel com avanço por fuso retificado para fixação de um motor de passo. O motor de passo, por sua vez, foi escolhido por possuir elevada precisão de posicionamento angular, sendo uma revolução dividida em 800 passos.

3.3.2.1. Sistemas de fixação e posicionamento

Para a fixação e posicionamento dos ímãs foi utilizado um eixo escalonado, ou seja, com diversos diâmetros, preso ao motor de passos. Este eixo possui escalonamento em três diâmetros diferentes, de forma a atender a toda a variação dimensional permitida para os anéis, conforme mostrado nas figuras Figura 33 e Figura 34.

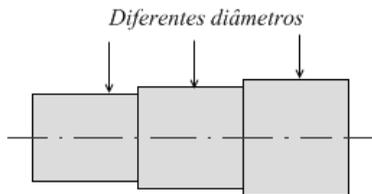


Figura 33 - Representação do escalonamento do eixo utilizado para a fixação dos ímãs.

A parte central do eixo possui o mesmo diâmetro nominal dos anéis, enquanto as partes menor e maior representam, respectivamente, o limite mínimo e máximo para o diâmetro interno dos ímãs. Dessa forma, caso o ímã não entre na parte menor do eixo, seu diâmetro está muito pequeno e se passar pelo diâmetro maior sem ficar preso, está grande demais. Este eixo possui um furo para encaixe do eixo do motor de passo, sendo que a fixação é feita através de três parafusos que permitem pequenos ajustes de centralização do ímã.

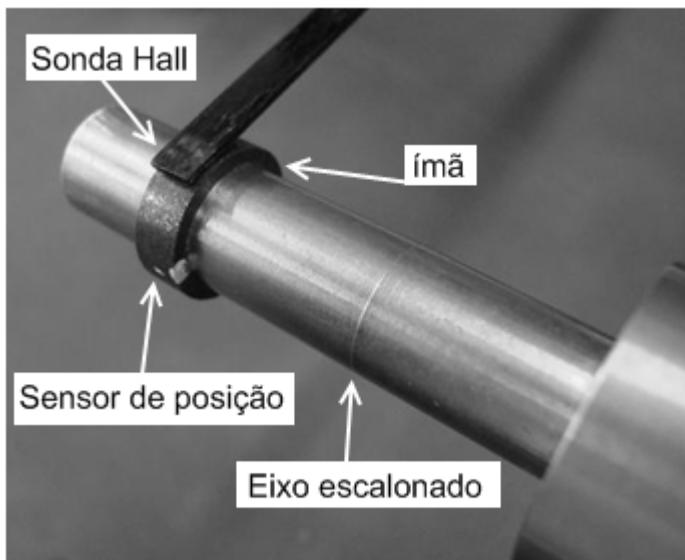


Figura 34 - Eixo utilizado para a fixação dos ímãs com ímã, sonda hall e sensor de posição laser.

O motor de passo é preso em um suporte (Figura 35), que por sua vez é montado em uma base móvel. Esta base é responsável pelo movimento do ímã em relação ao eixo z (comprimento). A Figura 36 mostra o sistema utilizado.

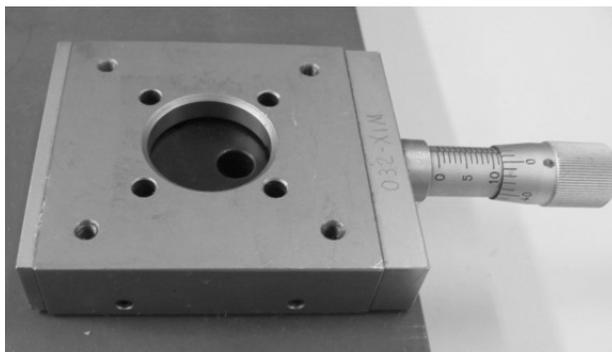


Figura 35 - Base que suporta o motor de passos e é responsável pelo movimento no eixo z.

Além disso, a sonda Hall e o sensor de posição laser são presos em suportes independentes. Todos os elementos são montados sobre a

base metálica e fixados através de ímãs. A Figura 36 mostra o conjunto mecânico completo da bancada de avaliação de ímãs.

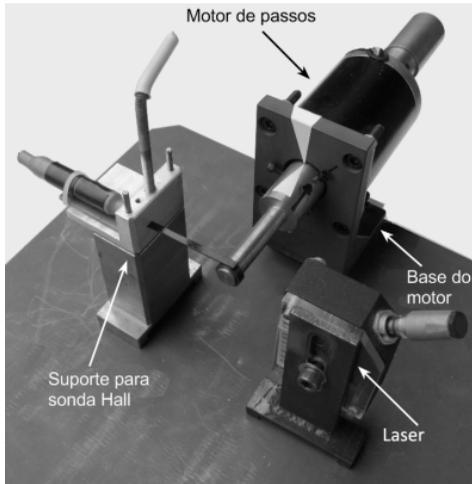
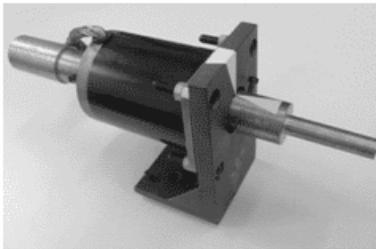


Figura 36 - Conjunto mecânico completo.

3.3.2.2. Motor

O movimento de giro do ímã foi realizado por um motor de passo, que utiliza um sistema de potência acionado por pulsos digitais. Uma revolução do motor corresponde a 800 pulsos, ou seja, 800 divisões. Com isso, o menor deslocamento possível corresponde a $0,45^\circ$. O motor de passo está mostrado na Figura 37.



(a)



(b)

Figura 37 - (a) Motor de passo responsável pelo movimento de giro do ímã e (b) sistema de potência do motor.

3.3.2.3. Sensor de distância laser

O campo magnético gerado pelo ímã diminui com o aumento da distância. Dessa forma, é importante que o sensor Hall esteja sempre posicionado o mais próximo possível do ímã e que a variação desta distância seja conhecida. Para avaliar este efeito, é empregado um sensor de distância fixo na base metálica do sistema que mede a excentricidade do ímã durante a sua rotação, ou seja, mede a distância que o ímã se encontra do sensor. A variação desta distância está associada à excentricidade do ímã em relação ao seu eixo de rotação. Como não é possível medir a distância do ímã no mesmo ponto que a indução magnética superficial ao mesmo tempo, o sensor laser é montado com 90° de defasagem em relação à sonda Hall. Essa defasagem é corrigida instantaneamente pelo programa de aquisição e controle do sistema. Esta medida é feita simultaneamente com a medida de indução magnética. Dessa forma, é gerado um mapeamento de excentricidade do ímã em conjunto com o mapeamento de indução magnética.

Este mapa serve para a comparação entre as variações de indução e de excentricidade. Caso estas variações tenham comportamento semelhante, possivelmente parte da variação de indução magnética lida pela sonda seja causada pela variação de posição relativa entre a sonda e o ímã. Uma medida utilizada para evitar ou minimizar este efeito é a aplicação de uma leve pressão da haste flexível da sonda contra o ímã. Desta forma, mesmo que o ímã tenha um leve desvio de excentricidade, a sonda continuará tocando a superfície do mesmo.

3.3.2.4. Sistemas de aquisição de dados e controle de movimento

Uma placa de aquisição de sinais modelo USB-DaqMX-6251 da National Instruments® [www.ni.com] é utilizada para aquisição dos sinais da sonda Hall e controle do motor de passos. A placa possui diversos canais para leitura de sinais analógicos, sendo um deles selecionado para a leitura do valor de indução pela sonda e outro para a leitura de excentricidade do eixo através do sensor de posição.

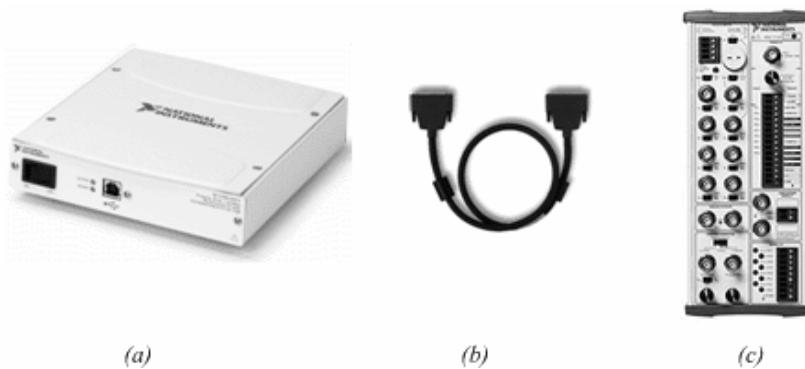


Figura 38 - (a) Placa de aquisição de dados (b) Cabo de conexão (c) Placa de conexões. Fonte: www.ni.com.

A placa de aquisição possui uma placa de conexões (NI-BNC2120) para ligação dos sinais de entrada. Nela, os sinais são conectados através de cabos BNC⁷. Este tipo de cabo tem pouca suscetibilidade a ruídos eletromagnéticos e é recomendado para sistemas de aquisição de sinais (ver Figura 39).



Figura 39 - Cabo BNC utilizado para conexão dos sinais da sonda Hall e do sensor de posição.

Ambos os sinais lidos pela placa são sinais de tensão em Volts, sendo necessária a sua conversão para Gauss no caso da sonda Hall e para milímetros no caso do sensor de posição. Para a leitura dos dados da placa de aquisição e controle dos sinais de saída que controlam o inversor do motor de passo, foi utilizado o programa Labview®, também da *National Instruments*. Este programa permite a manipulação dos dados lidos e sua gravação ou conversão em diversos formatos de

⁷ BNC: Um dos significados associados à sigla é *British Naval Connector*, ou *Conector naval britânico*.

arquivo. A Figura 40 mostra o painel frontal de entrada e saída de dados do programa.

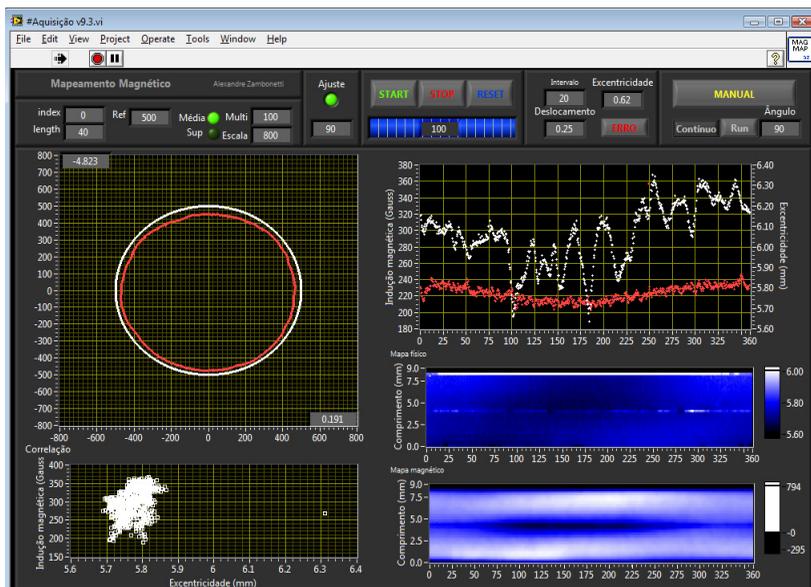


Figura 40 - Programa utilizado para aquisição de dados durante o mapeamento das amostras.

A rotina do teste foi elaborada de forma que cada ciclo de um teste corresponde a uma revolução completa do ímã, ou seja, 360° . Isso representa 800 pulsos digitais de controle para o inversor, 800 leituras com a sonda Hall e 800 pontos de excentricidade com o sensor laser. Assim que a rotação do ímã é concluída, o avanço manual do eixo z é feito e um novo ciclo é iniciado. Os dados dos ciclos são agrupados e, depois de concluído todo o teste, os mapas magnéticos e de excentricidade do ímã são salvos em arquivo do Labview®. A Figura 41 e a Figura 42 mostram exemplos de um mapa magnético completo e de um mapa de excentricidade completo, respectivamente.

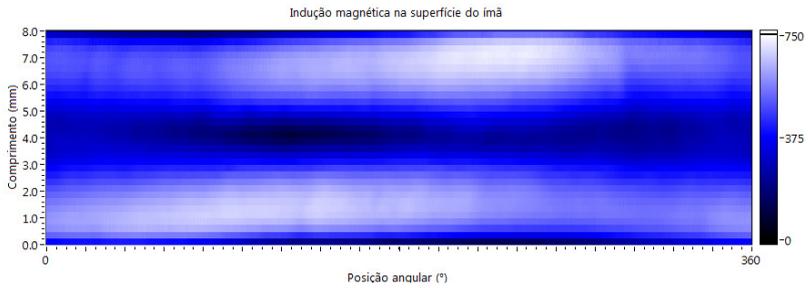


Figura 41 - Exemplo de mapa magnético completo de uma amostra.

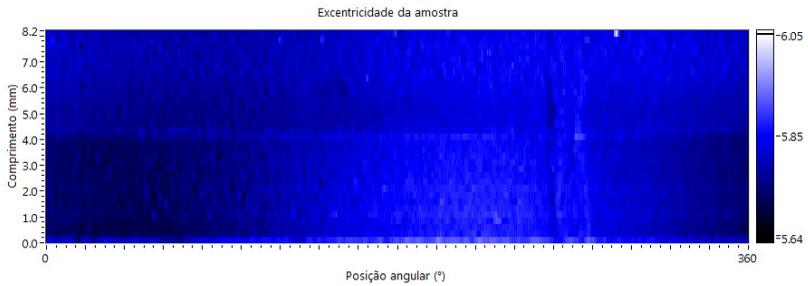


Figura 42 - Exemplo de mapa superficial completo de uma amostra. Os valores de excentricidade estão representados em milímetros.

Além do mapa magnético e do mapa superficial, o programa exibe também o perfil magnético da amostra para facilitar a visualização do desequilíbrio e da indução magnética resultante na superfície da amostra, como mostrado em resultado apresentado na Figura 43.

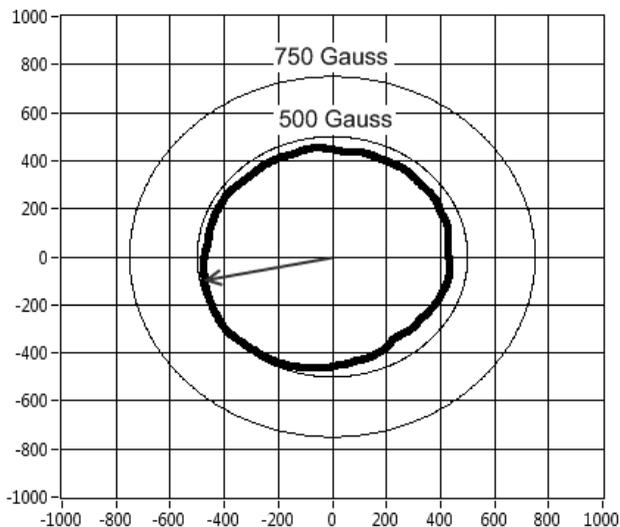


Figura 43 - Perfil magnético completo de uma amostra (linha espessa).

3.3.3. Validação do método

Para garantir que o método de mapeamento magnético superficial é válido e as medidas obtidas são reais, foram utilizadas diversas ferramentas que procuram eliminar ou reduzir o efeito dos fatores que podem gerar incertezas.

3.3.3.1. Calibração da sonda Hall: display e saída analógica

A sonda Hall está equipada com uma saída de sinal analógico⁸, que é proporcional ao valor de indução magnética lida pela sonda. Para verificação da calibração deste sinal, foi criada uma curva de correlação entre a indução magnética lida pela sonda e o valor da tensão gerada pela saída analógica. Utilizando uma rotina padrão de regressão linear para os pontos obtidos, foi determinada uma equação que correlaciona as duas grandezas (equação 3.1).

$$B = A_0 + A_1 \cdot V \quad (3.1)$$

⁸ Este sinal não vem diretamente do sinal de tensão gerada pelo sensor Hall, mas sim, de um circuito eletrônico responsável pelo condicionamento e amplificação desta tensão.

Onde:

- B = Indução magnética (Gauss)
- A_0 = Fator aditivo = 29,603 Gauss
- A_1 = Fator multiplicativo = 827,04 Gauss/Volt
- V = Tensão lida (Volts)

A partir dos coeficientes encontrados, foi avaliada a linearidade das leituras através do valor de Coeficiente de Determinação, R^2 [MONTGOMERY]. Este é uma função direta da correlação entre as variáveis, sendo que valores próximos da unidade indicam forte relação entre elas e é calculado através das equações seguintes:

$$SSE = \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - f_i)^2 \quad (3.2)$$

$$SST = \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.3)$$

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.4)$$

Onde:

- y_i = i -ésimo elemento de Y .
- f_i = i -ésimo elemento da regressão linear.
- \bar{y} = valor médio de Y .

O Quadro 5 mostra os valores de tensão e de indução obtidos durante a calibração da sonda.

Tensão (V)	Indução (Gauss)
2,564	2148
2,335	1960
2,499	2096
1,911	1609
0,654	576
-0,952	-757
-0,228	-164
0,167	171
0,208	206
-0,064	-22
-0,601	-474

Quadro 5 - Calibração do sinal de saída analógico da sonda Hall.

Utilizando os valores obtidos no Quadro 5, foi gerado o gráfico da Figura 44.

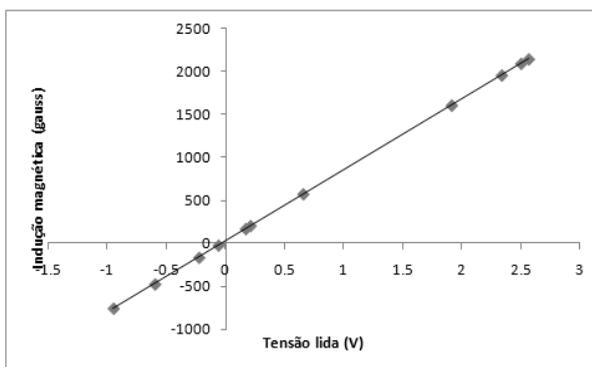


Figura 44 - Gráfico de correlação entre a tensão lida e a indução magnética

A partir destes valores, foi encontrado o valor de R^2 , igual a **0.999988**, demonstrando forte correlação entre as tensões lidas e a indução magnética correspondente e validando a utilização desta equação de correlação para a leitura de indução magnética.

3.3.3.2. Avaliação de nível de variação de sinal (ruído) e nível de zero do sistema

O conhecimento do nível de ruído do sistema é de fundamental importância, principalmente quando se deseja observar variações pequenas nas medições. Além disso, o valor inicial do sistema, ou seja, o valor lido pelo mesmo quando não há amostras sendo medidas, mostra se os valores absolutos encontrados sofreram influência do sistema de medição e aquisição.

Para esta avaliação, foram realizadas cinco leituras consecutivas com o sistema (ciclos de 360°) sem que fosse colocada amostra alguma. Os resultados obtidos são mostrados na Figura 45 e na Tabela 6.

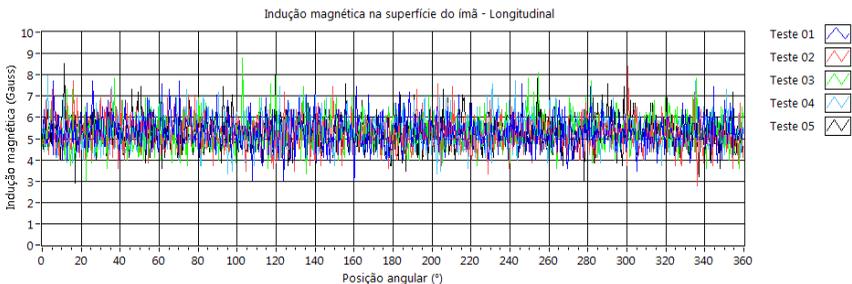


Figura 45 - Indução magnética lida pelo sistema sem amostra.

Os valores médios e de pico encontrados estão mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 - Valores médios e de pico encontrados.

Teste	Indução magnética em 360°	
	Valor médio	Variação
1	5,3	±2,3
2	5,2	±2,8
3	5,3	±2,9
4	5,3	±2,3
5	5,3	±2,8
Média	5,3	±2,6

Com os valores obtidos em cada um dos testes, foi encontrado um valor médio de variação do sinal igual a $\pm 2,6$ gauss. Assim também foi obtido o valor inicial de leitura do sistema, sendo este igual a 5,3 gauss.

3.3.3.3. Calibração de valor absoluto pelo fabricante

O gaussímetro TLMP-Hall-02 utilizado foi calibrado com padrões rastreáveis no próprio fabricante, sendo os resultados obtidos apresentados no Quadro 7.

Campo padrão (Gauss) Origem: IPT – LME/ATEE/DME	Campo indicado (Gauss)	
	Normal	Sonda invertida
209,6±0,5	+ 215	- 220
1005±2	+ 1007	- 1006
9975±23	--	--

Quadro 7 - Informações de calibração do instrumento fornecidas pelo fabricante.

A partir destes resultados, pode-se perceber que a precisão de leitura do equipamento aumenta com o valor absoluto lido, mas ainda assim apresenta variações pequenas em valores de indução magnética baixos.

3.3.4. Procedimento de medida

O procedimento de medida tem como objetivo garantir que as medidas realizadas não apresentem variações devido a erros de montagem e posicionamento dos instrumentos.

Inicialmente, são ligados os instrumentos e a ventilação do inversor de acionamento do motor de passo para evitar superaquecimento. A amostra é então posicionada, sempre com o ponto de referência de magnetização voltado para a posição inicial do giro. Em seguida, verifica-se a posição da sonda Hall para que o ponto exato de medição da sonda esteja na posição inicial de giro e também pressione levemente a amostra. O laser é colocado na mesma posição que a sonda Hall em relação ao comprimento do ímã⁹. É então iniciado o ciclo de movimento rotacional do ímã e leitura dos valores de indução magnética pela sonda Hall. Após o final de cada volta, a amostra é deslocada 0,25 mm em relação ao eixo x, sendo este o passo de leitura que poderá ser observado nos mapas magnéticos. Depois de percorrido todo o comprimento da amostra, o mapa magnético é salvo em arquivo do Labview® juntamente com o mapa físico gerado pelas leituras do laser.

⁹ Como visto na seção 3.3.2.3, o sensor laser está na mesma posição que a sonda em relação à altura do ímã, mas defasado 90° em relação à sua circunferência.

3.4. Força eletromotriz

Para a medição da força eletromotriz dos ímãs, foram empregados dois motores lineares tubulares ligados através de um eixo comum. Um dos motores funcionou como motor, recebendo corrente elétrica e gerando o movimento linear, e o outro motor funcionou como gerador, utilizando o movimento gerado pelo outro motor para gerar tensão em sua bobina.

O deslocamento e a frequência foram mantidos constantes para todas as amostras. Os dois motores foram construídos da mesma forma, utilizando fio de cobre esmaltado em seu estator.¹⁰ A Figura 46 mostra o esquema tridimensional dos motores utilizados.

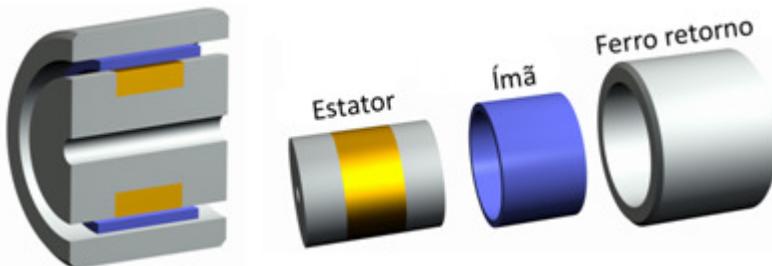


Figura 46 - Motor linear utilizado para avaliação da força eletromotriz em corte e em vista explodida.

As linhas de fluxo magnético para uma das posições do ímã no motor durante o seu funcionamento podem ser vistas na Figura 47, bem como o desenho em corte do motor montado.

¹⁰ Os detalhes construtivos do motor foram excluídos por não ser permitida a sua divulgação por parte da empresa Whirlpool S/A.

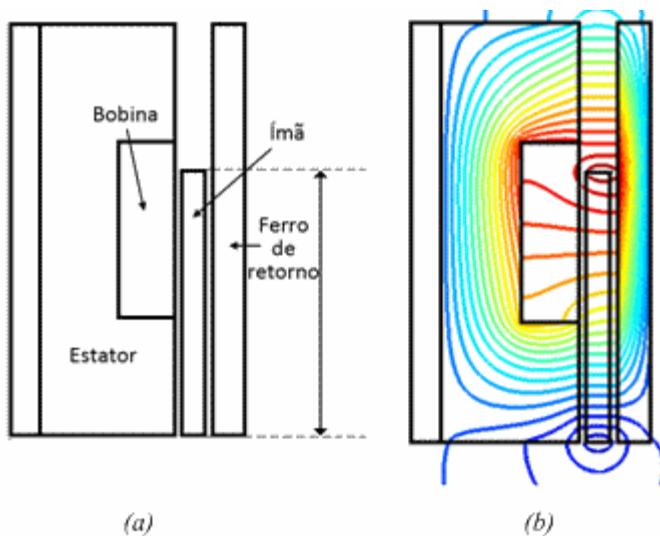


Figura 47 - (a) Esquema e (b) linhas de fluxo magnético para o motor tubular linear utilizado.

4 Simulações e tratamento de dados

A análise de sistemas através de simulações numéricas é de fundamental importância para diversas áreas do conhecimento, principalmente na engenharia. Com as simulações, é possível prever o comportamento de tais sistemas sem a necessidade de que eles sequer existam. Além disso, diferentes combinações de parâmetros construtivos (dimensões, materiais, elementos, entre outros) podem ser testadas e comparadas sem que todos estes elementos sejam construídos, o que demandaria uma quantidade de recursos humanos e materiais muito maiores. Infelizmente, as simulações possuem limitações: geralmente é impossível que sejam consideradas todas as variáveis físicas existentes em um único modelo matemático. Por isso, muitas vezes é necessária a validação e verificação de uma parte das simulações para garantir que o modelo utilizado representa (ao menos em parte) o sistema real.

Muitos programas numéricos utilizam o método de **elementos finitos** no cálculo de sistemas. Neste método, o objeto ou sistema é representado por um modelo geométrico dividido em pequenas regiões chamadas de **elementos finitos**. Considerações físicas e equações de equilíbrio, bem como condições de contorno, são consideradas e aplicadas em cada um dos elementos. Dessa forma, são criados grandes sistemas de equações, normalmente resolvidos através de aproximações ou métodos computacionais. O resultado deste sistema de equações pode ser aprimorado se o número de elementos for aumentado, com o custo do aumento do tempo de simulação. O uso deste método é muito comum em determinações de tensões em elementos mecânicos, transferência de calor, dinâmica de fluidos e eletromagnetismo. A Figura 48 mostra um exemplo de modelo geométrico dividido em diversas partes utilizado para simulação numérica.

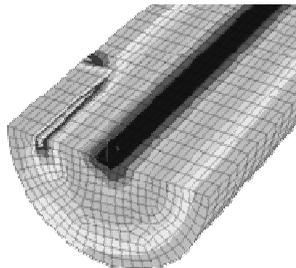


Figura 48 - Modelo utilizado para simulação através do método de elementos finitos.

4.1. Programas de simulação computacional

Para este trabalho foi utilizado o programa *FEMM*¹¹ (*Finite Element Method Magnetics*, Magnetismo em método de elementos finitos) para as simulações de indução magnética superficial e força eletromotriz.

O FEMM é uma ferramenta para simulação de sistemas e dispositivos eletromagnéticos. Nele, é possível construir modelos planos (seção transversal de motores, circuitos magnéticos, entre outros) ou simétricos em relação ao eixo de centro (cilindros, motores lineares, anéis). Para a simulação, inicialmente são desenhados os modelos. Posteriormente, determinadas características dos materiais e dos circuitos que compõem o sistema são acrescentadas. Em seguida, são definidos os tamanhos dos elementos finitos e é então iniciada a resolução das equações pelo computador. Depois de finalizado o cálculo, é exibida a solução do modelo, que pode conter linhas de fluxo, vetores ou gradientes de densidade de fluxo magnético. Também é possível obter os valores de campo magnético, indução magnética, fluxo, produto de energia, densidade de corrente, entre outras variáveis. A Figura 49 mostra um modelo e os resultados de uma simulação realizada pelo FEMM.

¹¹ O FEMM é um programa é gratuito e pode ser obtido através do endereço <http://www.femm.info>.

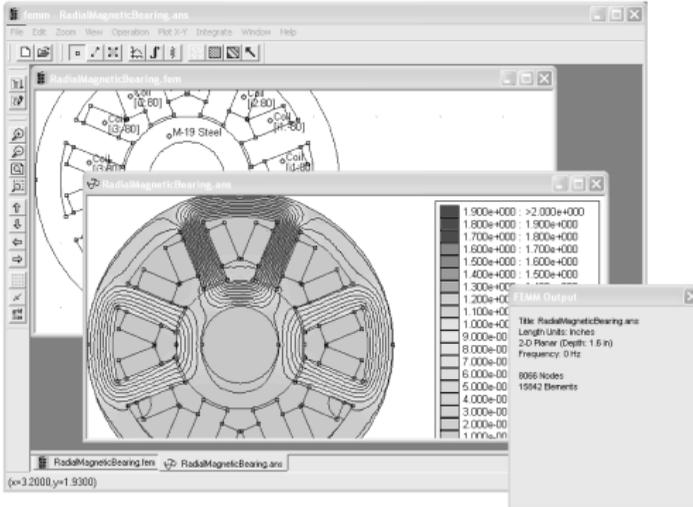


Figura 49 - Imagem de tela mostrando modelo e resultados de uma simulação de motor elétrico realizada pelo FEMM.

4.2. Simulação de fluxo magnético superficial

Com o software FEMM e as curvas de histerese do $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compósito, foram determinados diversos parâmetros importantes para a análise dos anéis. Para sua utilização no FEMM, os dados obtidos do segundo quadrante da curva de histerese passaram por um ajuste¹²: a curva foi deslocada para o primeiro quadrante, sendo o valor de coercividade considerado o ponto (0,0) do gráfico, conforme a Figura 50.

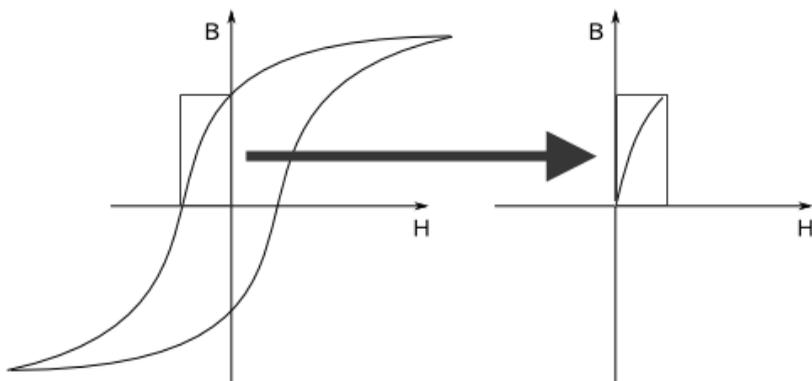


Figura 50 – Representação do ajuste da curva de histerese necessário para utilização dos dados no FEMM

A curva resultante, obtida a partir do próprio FEMM, pode ser vista na Figura 51.

¹² Este ajuste é necessário para utilização de curvas de histerese no FEMM e está descrito no manual de uso do programa.

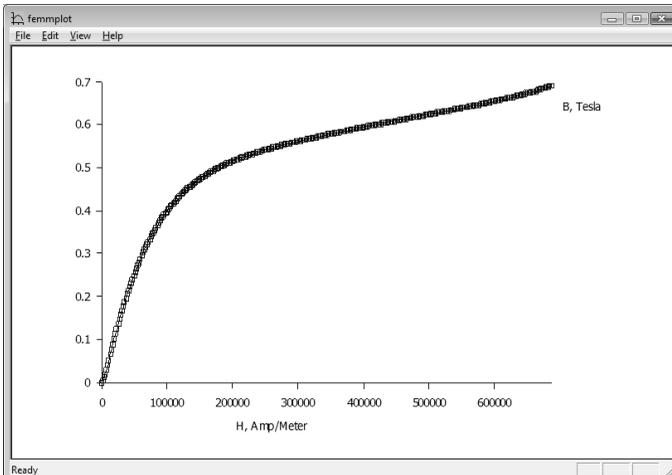


Figura 51 - Curva de histerese dos anéis de $Nd_2Fe_{14}B$ magnetizados axialmente adaptada para utilização no FEMM.

Esta curva foi utilizada para todas as simulações envolvendo os anéis compostos de $Nd_2Fe_{14}B$. Como se tratam de anéis, as simulações realizadas têm simetria axial, ou seja, o domínio de cálculo utilizado é a seção transversal da amostra, que sofre uma revolução ao longo dos 360° .

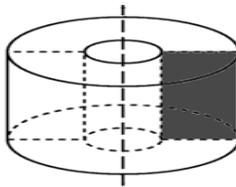


Figura 52 - Representação da região utilizada como domínio de cálculo para a simulação de um anel.

Os anéis foram divididos em oito partes. Dessa forma cada parte poderia ter suas características relacionadas à magnetização alteradas independentemente, conforme a Figura 53.

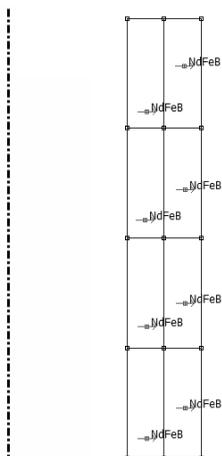


Figura 53 - Seção transversal do anel considerada como domínio de cálculo.

A linha tracejada representa a linha de centro do anel, sendo esta o início do eixo r do sistema de coordenadas cilíndricas das simulações.

4.2.1. Distância real entre o sensor Hall e a amostra

Como descrito anteriormente, a sonda Hall utilizada é composta por um elemento sensor Hall montado em uma haste plástica. Este sensor capta o fluxo magnético que passa por ele perpendicularmente à sua superfície. No entanto, este campo pode não ser exatamente o campo que está saindo da superfície do material. Isso se deve principalmente aos fatores construtivos da haste e do elemento sensor e não podem ser controlados ou alterados.

Para avaliar a diferença entre o valor de indução magnética lida pela sonda e o valor que deveria estar presente na superfície do ímã, foi montada uma simulação numérica que avalia a indução magnética normal à superfície externa do ímã em diferentes distâncias a partir desta superfície.

Para isso, foram consideradas superfícies com o mesmo comprimento do ímã e espaçadas 0,1 mm entre si. Estas foram posicionadas a partir de 0,1 mm de distância da superfície externa do ímã, conforme a Figura 54.

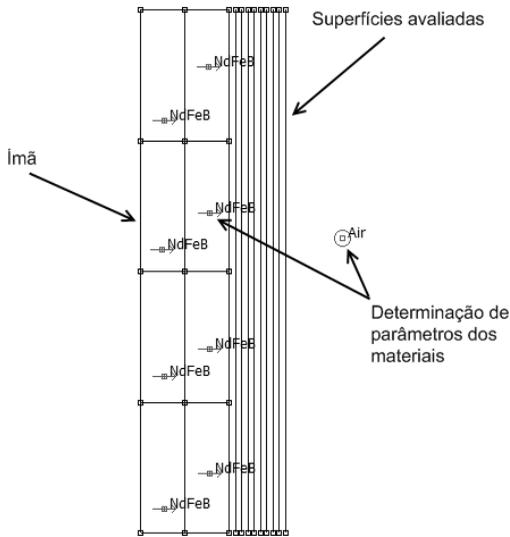


Figura 54 - Representação do domínio de cálculo com as superfícies consideradas.

Através desta simulação, foram encontrados os valores de indução magnética normal à superfície do ímã ao longo de seu comprimento, conforme a Figura 55.

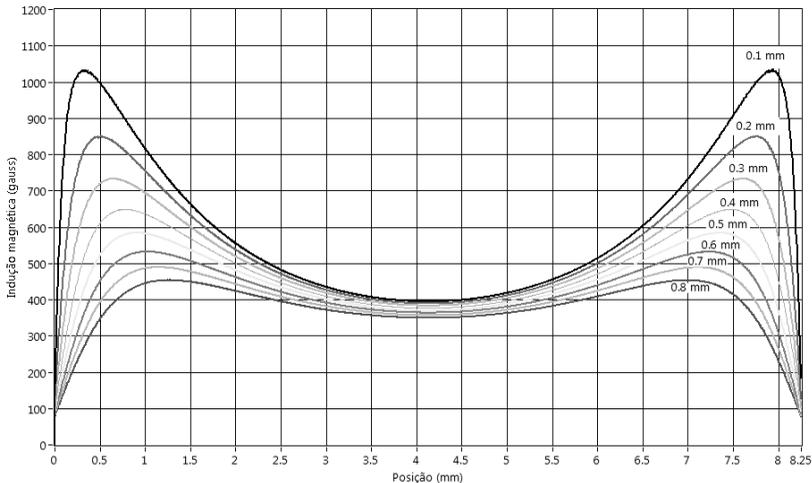


Figura 55 – Gráfico de indução magnética normal ao longo do ímã quando medida em diferentes distâncias a partir de sua superfície.

Como se pode perceber na Figura 55, durante as medições, devem ser percebidos dois picos de indução magnética ao longo do comprimento do ímã, sendo que o valor de pico cai de acordo com a distância da sonda para a superfície. A comparação dos valores de pico encontrados na simulação com os valores máximos medidos nas amostras servirá como indicativo¹³ da distância real entre a superfície da amostra e o sensor Hall.

4.2.2. Influência da colagem dos anéis.

Apesar de representar satisfatoriamente o comportamento das amostras reais, a simulação anterior precisa de um ajuste. A cola que é utilizada para unir os anéis insere um pequeno espaço entre os ímãs. Este espaço é suficiente para que os valores de indução apresentem uma súbita queda nesta região.

A determinação da influência da colagem foi realizada medindo-se a altura de seis anéis que não foram magnetizados. Feito isso, os anéis foram magnetizados e colados e a altura total foi medida novamente, tendo resultados apresentados na Tabela 8:

Tabela 8 - Valores encontrados no teste de colagem.

Amostras		Altura (mm)			Variação (mm)
		Antes da colagem		Depois da colagem	
A	1	4,17	8,32	8,33	0.01
	2	4,15			
B	3	4,14	8,29	8,34	0.05
	4	4,15			
C	5	4,15	8,31	8,32	0.01
	6	4,16			
Média		4,15	8,30	8,33	0,02

Uma comparação qualitativa pode ser feita entre os resultados de simulações considerando o intervalo entre os ímãs gerado pela cola, conforme pode ser visto no resultado da simulação apresentado na

¹³ Todas as amostras utilizadas estão sujeitas a falhas de fabricação e, por isso, não há como garantir que os valores máximos de indução obtidos nos experimentos dependam apenas da distância do sensor Hall até o anel.

Figura 56. Este gráfico apresenta as curvas de indução magnética no sentido normal à superfície obtidas para uma simulação normal e uma simulação com um espaço de 0,05 mm representando a cola entre os anéis.

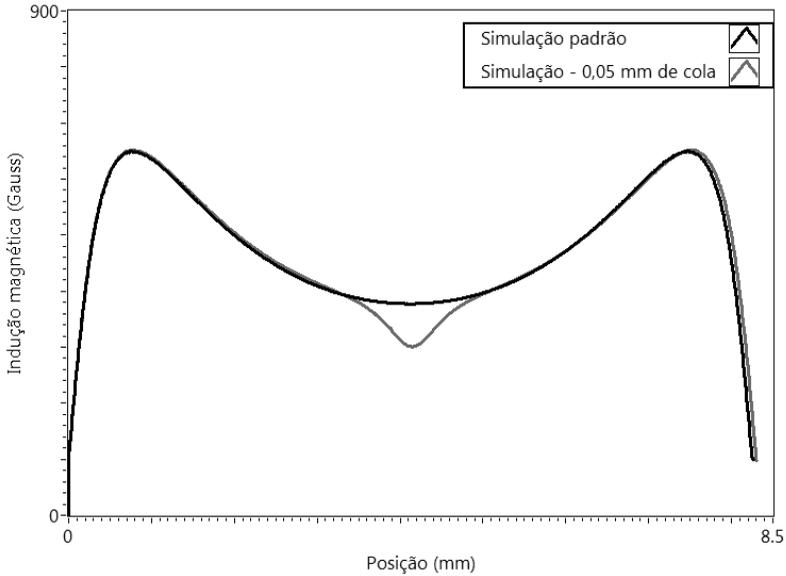


Figura 56 - Simulação de fluxo magnético superficial considerando o espaço entre os ímãs criado pela cola.

4.3. Simulação da força eletromotriz

A força eletromotriz gerada pelo ímã também foi simulada com o software FEMM. A simulação considerou os mesmos parâmetros utilizados nas medições experimentais de indução magnética. Os resultados obtidos e sua comparação com os valores medidos estão apresentados no Quadro 9.

Redução de espessura	Força eletromotriz (V)
Nenhuma (padrão)	6,776
Em 25% da superfície	5,850
Em 50% da superfície	4,781
Em 75% da superfície	3,593
Em 25% da superfície	2,129
Apenas um ímã mag.	3,409

Quadro 9 - Resultados da simulação de força eletromotriz.

Estes valores serão utilizados para comparações com as medidas realizadas nos anéis correspondentes (ver seção 0).

4.4. Tratamento de dados

Para compilar e tratar os dados obtidos durante os testes foram criados vários programas computacionais utilizando o Labview®. Esta ferramenta permitiu a rápida criação dos gráficos e detecção dos pontos máximos e mínimos de indução das amostras, além de comparar o mapeamento de duas amostras ao mesmo tempo.

4.4.1. Criação de mapas magnéticos

O programa utilizado para a criação dos mapas possui três gráficos: o mapa magnético completo da amostra e os cortes transversal e longitudinal do mapa no ponto de máxima indução magnética. Além disso, o programa detecta os pontos de máxima e mínima indução de acordo com o Quadro 10.

Variável	Descrição
MAX1	Valor máximo de indução do anel inferior
MINH1	Valor mínimo de indução encontrado na mesma altura do valor MAX1
MINV1	Valor mínimo de indução encontrado na mesma posição angular de MAX1
MAX2	Valor máximo de indução do anel superior
MINH2	Valor mínimo de indução encontrado na mesma altura do valor MAX2
MINV2	Valor mínimo de indução encontrado na mesma posição angular de MAX2

Quadro 10 - Descrição das variáveis utilizadas nos mapas magnéticos das amostras.

O painel frontal do programa mostra os três gráficos utilizados para análises dos ímãs: o mapa completo do anel, o corte transversal e o corte longitudinal do ímã inferior em seu ponto de máxima indução.

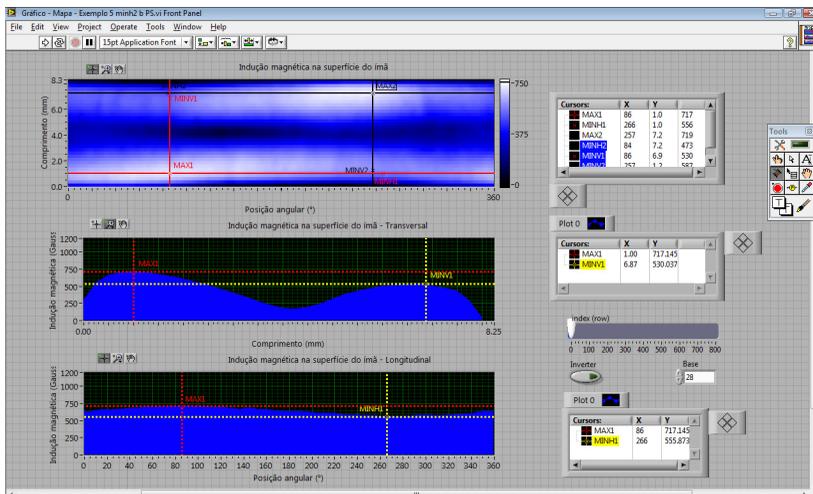


Figura 57 - Programa utilizado para criação dos mapas magnéticos.

Os valores de indução máximos e mínimos para o anel superior também são detectados pelo programa. Além disso, foi implantada uma ferramenta que permite inverter o sentido de orientação de campo magnético lido pela sonda. Esta ferramenta é útil para o caso de serem magnetizados ímãs com sentido invertido de campo magnético.

4.4.2. Comparação entre mapas magnéticos

Este programa foi criado para permitir a comparação entre duas amostras ou mesmo o efeito causado por algum agente externo em uma amostra. Assim, comparam-se os mapas das condições inicial e final do ímã.

Além do mapa magnético completo, um gráfico foi adicionado ao programa. Neste gráfico pode ser representado o corte transversal ou longitudinal do mapa completo. Para facilitar a visualização das diferenças entre as amostras, o gráfico é animado, o que permite uma avaliação intuitiva da variação de indução magnética ao longo do comprimento do ímã ou de sua revolução.

Além disso, o programa compara automaticamente as diferenças entre os valores máximos e mínimos das duas amostras analisadas para cada ponto de corte. A Figura 58 mostra o painel frontal do programa.

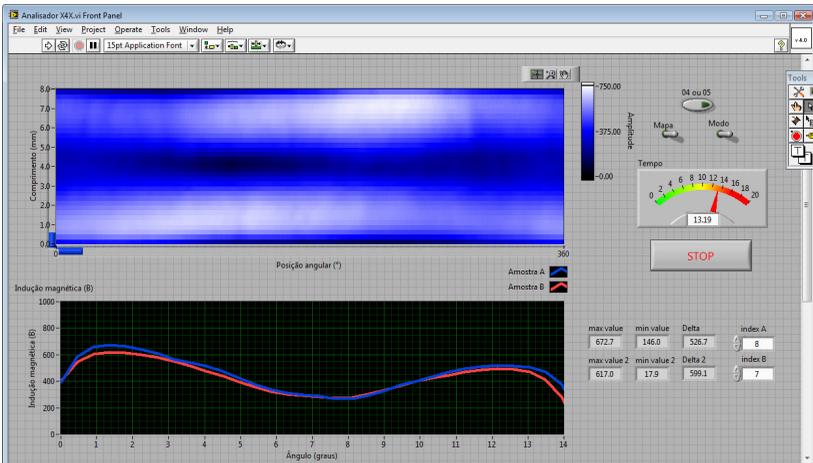


Figura 58 – Painel frontal do programa utilizado para comparação de dois mapas magnéticos simultaneamente.

4.4.3. Criação de perfis magnéticos

Para avaliação do desbalanceamento de indução magnética, foi criado um programa que mostra graficamente o desvio do perfil de magnetização do anel. É criado um gráfico de coordenadas polares onde a intensidade da indução magnética em cada ponto da superfície do ímã é relacionado com a distância de cada ponto à origem do gráfico. Enquanto isso, o ângulo de cada ponto em relação ao eixo das abscissas representa a posição do ímã em que foi realizada a medida (em relação à sua circunferência). A Figura 59 mostra um exemplo de gráfico de perfil magnético.

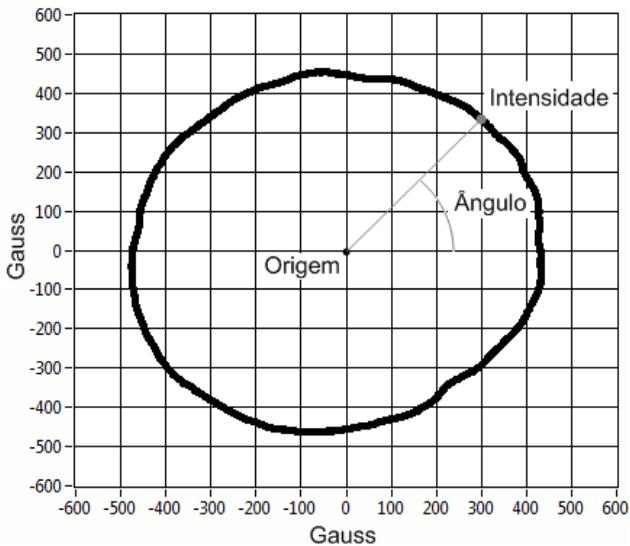


Figura 59 - Gráfico de perfil magnético

A Figura 60 mostra o painel frontal do programa utilizado para criação destes gráficos.

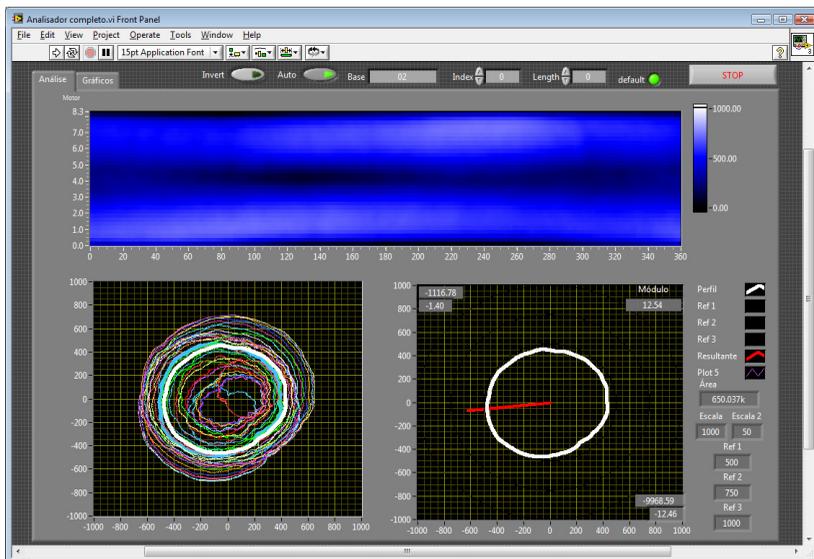


Figura 60 - Programa utilizado para criação do perfil magnético dos ímãs.

A partir desta curva média, é feita a média dos valores de indução em relação aos eixos das abscissas e das ordenadas, sendo que esta média é utilizada como parâmetro para avaliação do desequilíbrio de indução magnética superficial em cada direção. O programa fornece também o somatório das leituras de indução magnética para cada ímã. Cada ponto de medição corresponde a uma área, conforme pode ser visto na Figura 61.

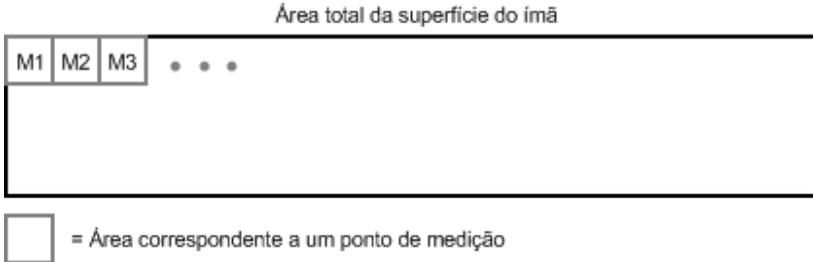


Figura 61 - Representação plana da superfície do ímã dividida em partes.

Cada medida de indução magnética está associada a uma pequena parte do ímã, representada na Figura 61 por M_n . Assim, o fluxo magnético nesta área corresponde à indução magnética lida no ponto dividida pela área correspondente a uma leitura, conforme a equação (4.1).

$$B_1 \cdot A = \Phi_1 \quad (4.1)$$

Assim, o fluxo total superficial pode ser obtido através da soma de todas as leituras de indução magnética superficial multiplicadas pela área de correspondente, conforme a equação (4.2).

$$\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots = \Phi_T \quad (4.2)$$

Como pode ser visto nas equações (4.3) e (4.4), a soma dos valores de indução magnética superficial multiplicada pela área de um elemento é igual ao fluxo total.

$$(\Phi_1 \cdot A) + (\Phi_2 \cdot A) + \dots = \Phi_T \quad (4.3)$$

$$A \cdot (\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \dots) = \Phi_T \quad (4.4)$$

A área de um ponto de medição pode ser obtida dividindo-se a área total da superfície do ímã pelo número de medições realizadas, conforme equação (4.5).

$$A = \frac{A_T}{N} \quad (4.5)$$

Com isso, pode-se obter a equação (4.6), que fornece o valor de fluxo magnético para toda a superfície do ímã, de acordo com os valores de indução magnética superficial lidas, a área total da superfície e o número de medições realizadas.

$$\Phi_T = \sum_1^N B_n \cdot \frac{A_T}{N} \quad (4.6)$$

Para garantir a validade deste método de cálculo, é importante conhecer o tamanho do sensor Hall que está sendo utilizado. Se a área considerada para uma medição (ou o “passo” utilizado) for diferente do tamanho da sonda, deve ser corrigido o valor do fluxo magnético obtido (ver).

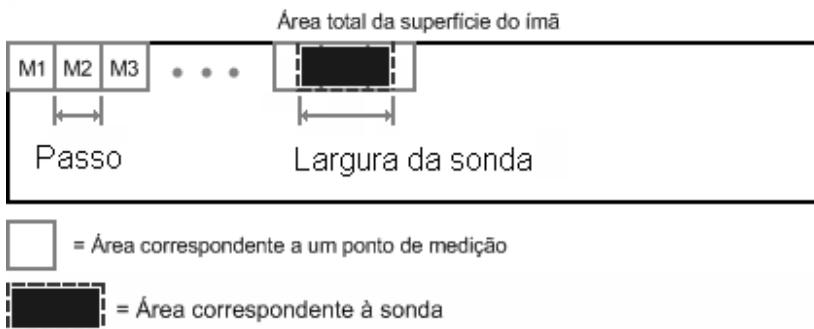


Figura 62 - Comparação entre passo e tamanho do sensor Hall

Esta correção deve ser realizada da seguinte forma: Conhecendo-se o valor do passo nas duas direções (“x” e “y”) e também as dimensões da sonda, deve-se dividir o valor do passo em cada direção pela dimensão da sonda na direção correspondente. Em seguida, multiplicam-se os fatores obtidos para as duas direções pelo valor total de indução magnética medida pela sonda ao longo de toda a superfície do ímã, conforme a equação (4.7).

$$\frac{P_x}{DS_x} \cdot \frac{P_y}{DS_y} \cdot \sum_1^N B_n = \sum B_{n-\text{corrigido}} \quad (4.7)$$

Onde:

- P_x = passo na direção x ;
- P_y = passo na direção y ;
- DS_x = dimensão da sonda correspondente à direção x e
- DS_y = dimensão da sonda correspondente à direção y .

O somatório corrigido dos valores de indução magnética lidos pela sonda representa uma aproximação razoável quando não é possível utilizar um passo de mesmo tamanho que as dimensões da sonda utilizada.

Para este trabalho, será considerado apenas o somatório de leituras de indução magnética superficial como meio de comparação entre as amostras, não sendo calculado o valor de somatório de indução magnética corrigido ou mesmo o fluxo magnético total das amostras. Isso se deve ao fato de que todas apresentam a mesma área superficial e número de medições. Assim, foi definido o termo *somatório* para se referir à soma de leituras de indução magnética superficial em um anel.

4.4.4. Análise de força eletromotriz

O programa que faz a análise da força eletromotriz foi criado de forma a permitir uma comparação visual intuitiva entre os valores obtidos para cada amostra. O programa captura automaticamente todas as leituras de todas as amostras e as coloca em um gráfico que correlaciona a tensão gerada pelo ímã em função da posição do mesmo. Assim, podem ser obtidos os valores máximos de tensão, sendo que estes são usados para comparar o desempenho dos ímãs. Na Figura 63 está apresentado o painel frontal do programa utilizado.

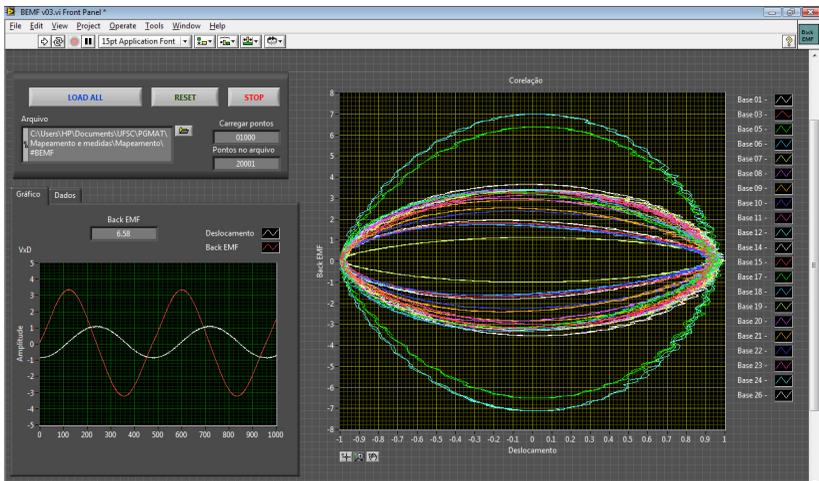


Figura 63 - Programa utilizado para avaliação da força eletromotriz.

5 Resultados e análises

5.1. Avaliação das propriedades extrínsecas do material

Para avaliação de coercividade e remanência do material magnético dos anéis, foram utilizados o histeresígrafo e o magnetômetro de amostra vibrante (MAV).

5.1.1. Histeresígrafo: curva de histerese

Foram analisados quatro anéis de ímãs de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compostos magnetizados na direção axial. Esta direção de magnetização é necessária, pois é a única maneira de avaliar o anel em histeresígrafo.

A partir do segundo quadrante da curva de histerese das amostras, foram determinados os valores de indução remanente (B_r) e coercividade (H_c) do material. A partir das curvas medidas para os quatro anéis, foi criada uma curva média que foi utilizada para todas as simulações computacionais envolvendo estes ímãs. Os valores encontrados são apresentados no Quadro 11 e os gráficos na Figura 64, que mostra também a curva média dos resultados.

Amostra	Indução remanente (T)	Coercividade (kA/m)
1	0,677	668,5
2	0,717	660,0
3	0,667	688,5
4	0,679	718,7
Média	0,685	683,9

Quadro 11 - Indução remanente e coercividade das amostras.

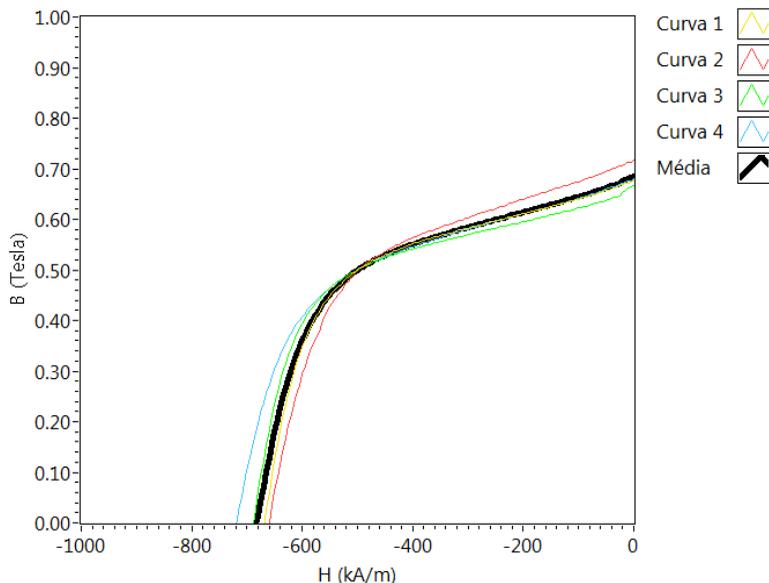


Figura 64 - Segundo quadrante da curva de histerese dos anéis utilizados.

5.1.2. Magnetômetro de amostra vibrante (MAV): coercividade

Além do histeresígrafo, também o magnetômetro de amostra vibrante (MAV) foi empregado para análise dos ímãs. No entanto, apenas serão considerados os resultados obtidos em relação à coercividade do material, sendo descartados os valores encontrados para indução remanente. Isso se deve ao fato de terem sido utilizadas partes dos próprios anéis para análise em MAV, o que dificulta o cálculo do fator desmagnetizante¹⁴ (essencial para garantir a precisão do valor de remanência encontrado). Além disso, o corte manual dos anéis faz com que cada parte tenha um formato ligeiramente diferente, aumentando a variação do fator desmagnetizante. Para esta análise de MAV, foram utilizados quatro anéis magnetizados radialmente. Foram cortadas pequenas partes destes anéis, de acordo com a Figura 65.

¹⁴ O fator desmagnetizante está relacionado à desmagnetização causada pelo campo gerado pelo próprio ímã.

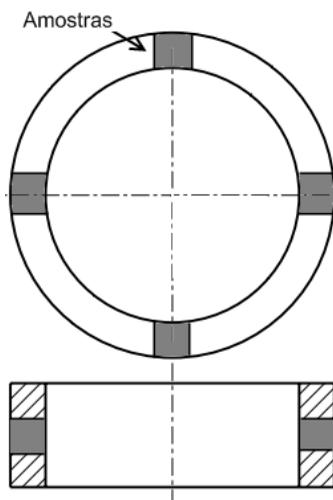


Figura 65 - Região retirada dos anéis para análise em MAV

Cada uma das partes medida e seus resultados apresentados na

Tabela 12.

Tabela 12 - Valores de coercividade obtidos para as quatro partes das quatro amostras e valores médios de cada amostra.

Amostra		Coercividade (kA/m)	Coercividade média (kA/m)
A	1	602,1	590,2
	2	581,8	
	3	590,6	
	4	586,2	
B	1	581,7	591,6
	2	596,7	
	3	589,9	
	4	597,9	
C	1	599,1	597,3
	2	602,2	

	3	588,3	
	4	599,4	
D	1	607,3	594,2
	2	598,9	
	3	583,2	
	4	587,2	
Média geral			593,3

A coercividade média encontrada foi de 593,3 kA/m. Pode-se perceber que os valores de coercividade encontrados para os anéis são inferiores aos valores encontrados quando testados no histeresígrafo. Como as amostras testadas em MAV estavam magnetizadas radialmente (diferentemente daquelas testadas em histeresígrafo, que foram magnetizadas axialmente), este teste sugere que o magnetizador radial não está conseguindo obter as máximas propriedades do material em relação à coercividade.

5.2. Resultados do mapeamento

Os resultados do mapeamento magnético das amostras serão apresentados através dos gráficos de intensidade de indução magnética. Nos mapas serão mostrados os valores máximos e mínimos de indução magnética detectados, bem como a posição de cada ponto. Tais pontos são identificados conforme a seção 4.4.1.

Para uma melhor visualização dos valores máximos e mínimos, bem como da diferença apresentada pelos mesmos, foram criados gráficos de corte transversal e longitudinal do mapa completo.

5.2.1. Amostras padrão

Inicialmente, serão mostrados os resultados das amostras consideradas padrão. Considera-se amostra padrão aquela que não sofreu nenhuma alteração proposital. Os gráficos dos cortes transversais e longitudinais apresentados a seguir estão localizados no ângulo e na altura do ponto de MAX1, respectivamente, ou seja, no ângulo e na altura onde foi encontrado o máximo valor de indução magnética superficial do anel inferior.

Os quadros Quadro 13, Quadro 14, Quadro 15 apresentam os valores críticos para cada uma das amostras padrão ensaiadas e as Figura 66, Figura 67 e Figura 68 mostram os gráficos dos mapeamentos das amostras padrão 02, 04 e 05, respectivamente.

Resultados para a amostra 02

Variável	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	717	86	1,0
MINH1	556	266	1,0
MINV1	530	86	6,9
MAX2	719	257	7,2
MINH2	473	84	7,2
MINV2	587	257	1,2

Quadro 13 - Resultados do mapeamento da amostra 02.

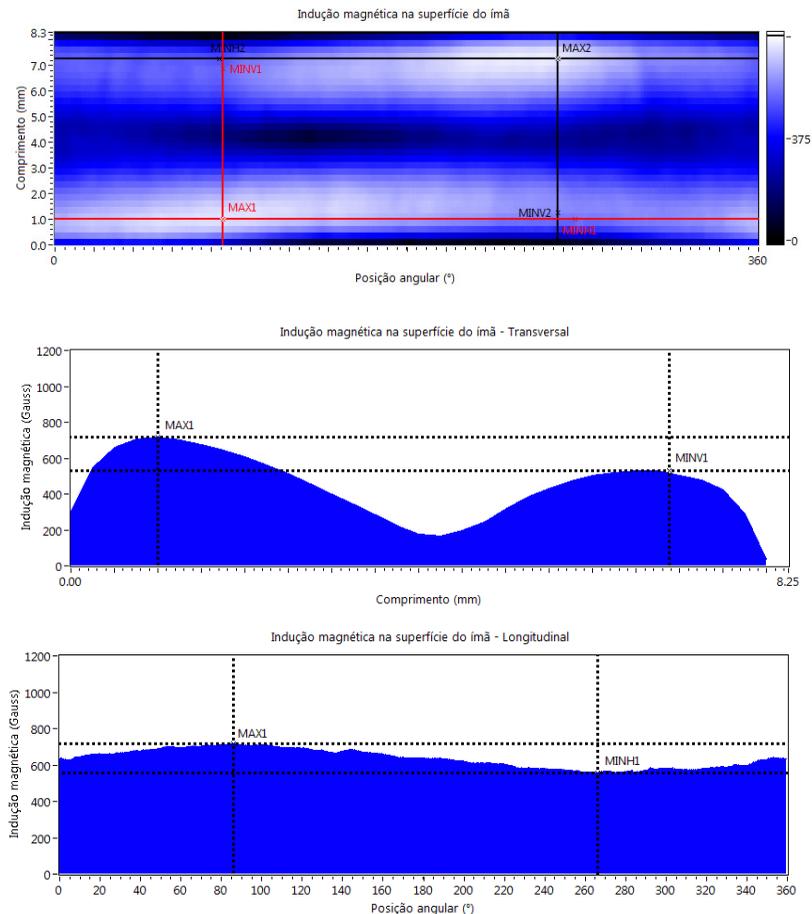


Figura 66 - Mapa magnético e cortes da amostra 02.

Resultados para a amostra 04

Variável	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	727	90	1,0
MINH1	549	252	1,0
MINV1	552	90	7,1
MAX2	670	223	6,5
MINH2	509	52	6,5
MINV2	559	223	1,0

Quadro 14 - Resultados do mapeamento da amostra 04.

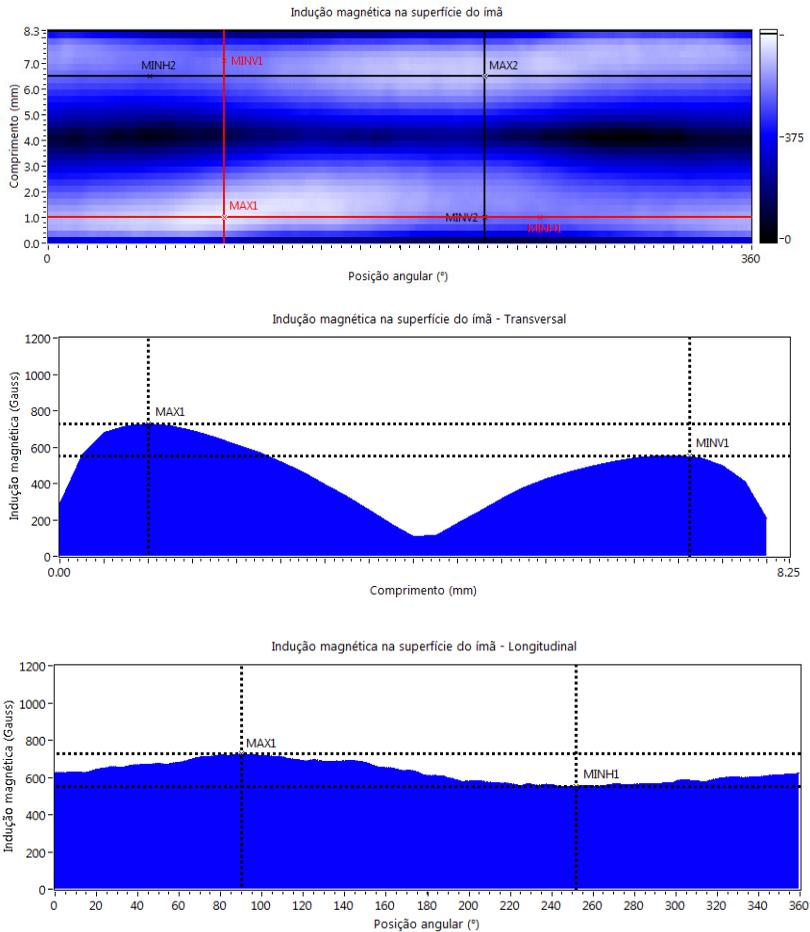


Figura 67 - Mapa magnético e cortes da amostra 04.

Resultados para a amostra 05

Variável	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	726	90	1,2
MINH1	545	299	1,2
MINV1	557	90	6,6
MAX2	729	212	7,0
MINH2	497	55	7,0
MINV2	616	212	1,2

Quadro 15 - Resultados do mapeamento da amostra 05.

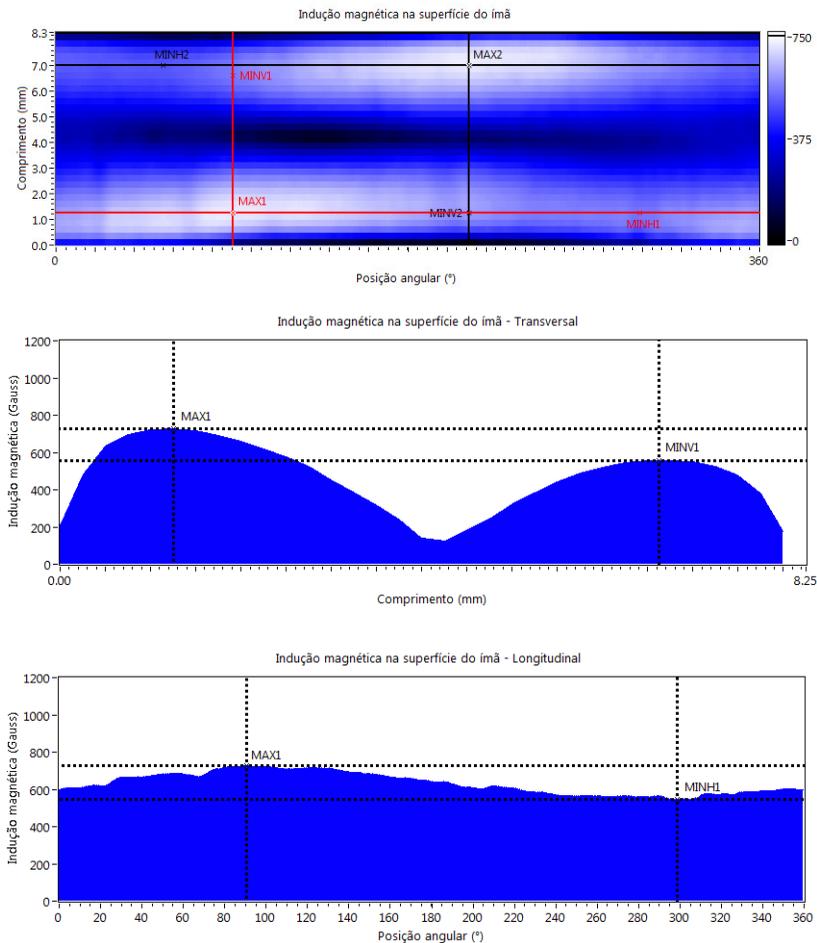


Figura 68 - Mapa magnético e cortes da amostra 05.

A Tabela 16 resume os resultados encontrados, apresentando a média para todas as variáveis e a variação máxima encontrada em cada ímã. Esta variação foi calculada através da diferença entre o valor máximo e o valor mínimo das variáveis de cada amostra.

Tabela 16 - Resumo das medidas de indução magnética encontrados para as amostras padrão.

Variável	Indução magnética (Gauss)				
	Base 02	Base 04	Base 05	Média	
MAX1	717	727	726	723,3	714,7
MAX2	719	670	729	706,0	
MINH1	556	549	545	550,0	544,2
MINV1	530	552	557	546,3	
MINH2	473	509	497	493,0	
MINV2	587	559	616	587,3	
Varição máxima	246	218	232	232,0	170,5
	34,2%	30,0%	31,8%	32,0%	23,9%

Em relação a estes resultados, podem-se fazer as seguintes observações:

- A média dos valores máximos de indução (MAX1 e MAX2) foi igual a 714,7 gauss. No anel superior da amostra 04, foi encontrada uma indução igual a 670 Gauss, bem inferior à média, sugerindo que esta amostra está com problemas de magnetização.
- A média dos valores mínimos encontrados (MINV1, MINH1, MINV2 e MINH2) foi igual a 544,2 gauss. A diferença entre este valor e a média dos valores máximos é igual a 170,5 Gauss, ou 23,9%. Esta diferença mostra que a não-homogeneidade dos ímãs é significativa.

5.2.2. Anéis com redução de espessura de parede

Os anéis que tiveram paredes reduzidas apresentaram grandes diferenças nos valores de indução lidos. A redução de espessura corresponde a 50% da espessura total do ímã, sendo realizada ao longo de comprimentos diferentes.

a) Redução de 50% de espessura de parede em 25% do comprimento do ímã.

A Tabela 17 mostra os resultados do mapeamento magnético para as amostras 07 e 13, que tiveram sua espessura reduzida ao longo de 25% do comprimento do anel (ver seção 3.1.2). A Figura 69 e a Figura 70 mostram os mapas magnéticos das amostras.

Tabela 17 - Resultados do mapeamento da amostras 07 e 13.

Variável	Amostra 07			Amostra 13		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	771	79	1,0	673	192	0,8
MINH1	517	264	1,0	527	359	0,8
MINV1	401	79	5,6	425	192	5,2
MAX2	489	247	6,0	483	198	5,2
MINH2	302	41	6,0	375	68	5,2
MINV2	598	247	1,2	561	298	0,8
Variação máxima	469			298		
	60.8%			44.3%		

Resultados para a amostra 07

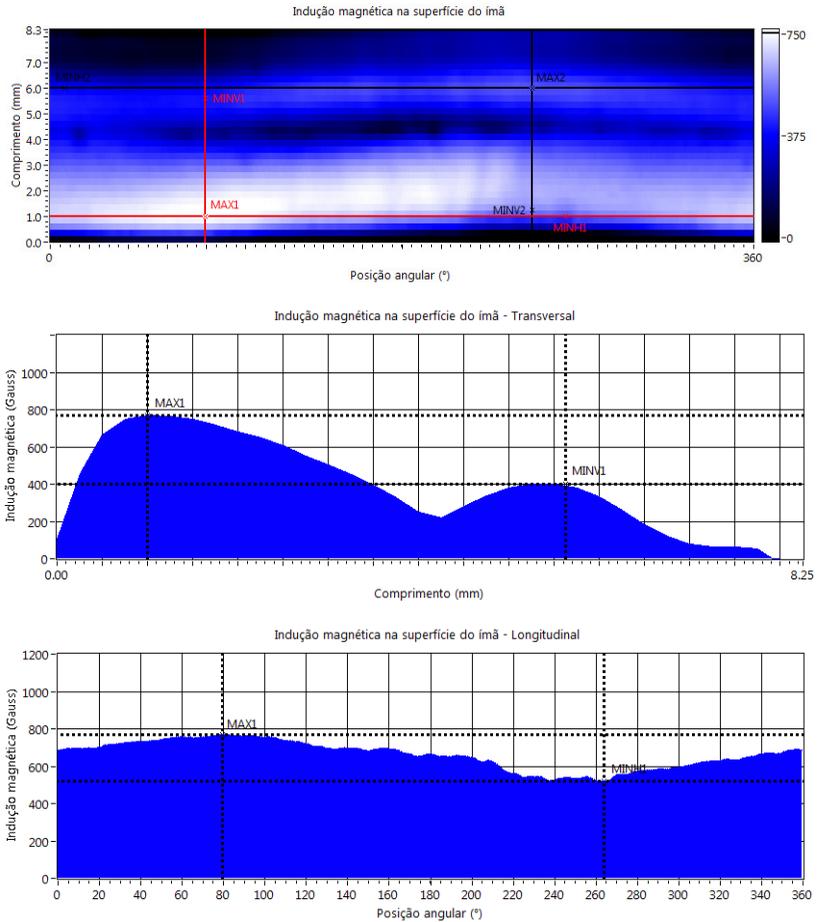


Figura 69 - Mapa magnético e cortes da amostra 07.

Resultados para a amostra 13

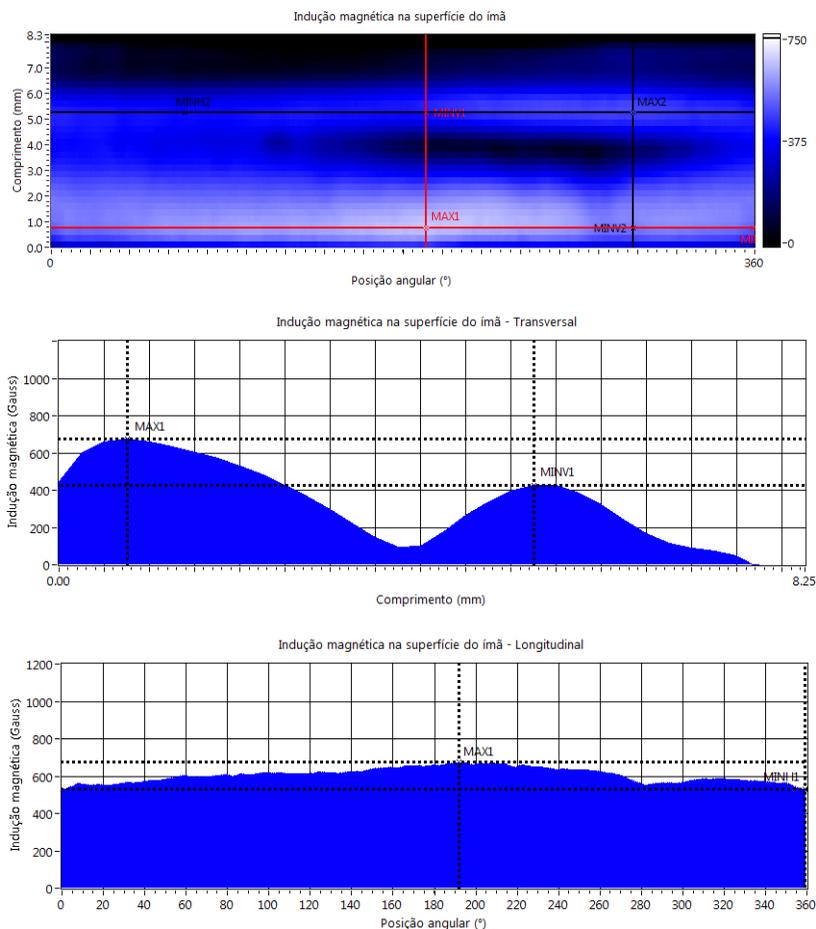


Figura 70 - Mapa magnético e cortes da amostra 13.

A partir destes resultados, pode-se perceber que a parte do ímã que teve sua espessura reduzida apresentou indução magnética superficial muito abaixo dos valores encontrados nos ímãs que não tiveram espessura alterada. Além disso, os valores máximos de indução encontrados nos anéis inferiores das amostras 07 e 13 (MAX1, 771 Gauss e 673 Gauss) sugerem que a amostra 13 não estava completamente magnetizada.

b) Redução de 50% de espessura de parede em 50% do comprimento do ímã.

A Tabela 18 apresenta os resultados de mapeamento para as amostras 08 e 21, que tiveram sua espessura reduzida ao longo de 50% do comprimento da amostra (ver seção 3.1.2).

Tabela 18 - Resultados do mapeamento da amostras 08 e 21.

Variável	Amostra 08			Amostra 21		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	821	203	1,2	824	93	1,5
MINH1	545	91	1,2	675	279	1,5
MINV1	213	203	7,9	322	93	4,1
Variação máxima	608			502		
	74.1%			60.9%		

Percebe-se que os valores máximos encontrados para a região que sofreu redução de espessura são bem diferentes (213 e 322 gauss, respectivamente). A causa desta diferença provavelmente está relacionada a uma redução de espessura maior para a amostra 08 e não a um problema de magnetização, pois os valores de MAX1 estão próximos (821 e 824 gauss, respectivamente). Os mapas magnéticos das amostras 08 e 21 estão apresentados na Figura 71 e na Figura 72, respectivamente.

Resultados para a amostra 08

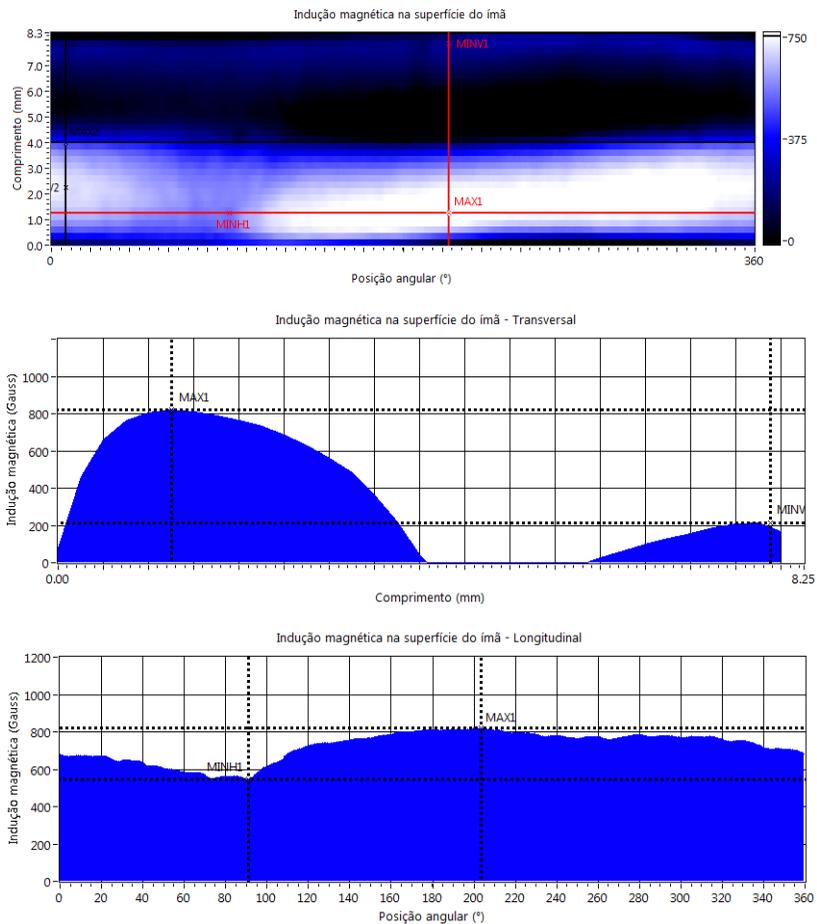


Figura 71 - Mapa magnético e cortes da amostra 08.

Resultados para a amostra 21

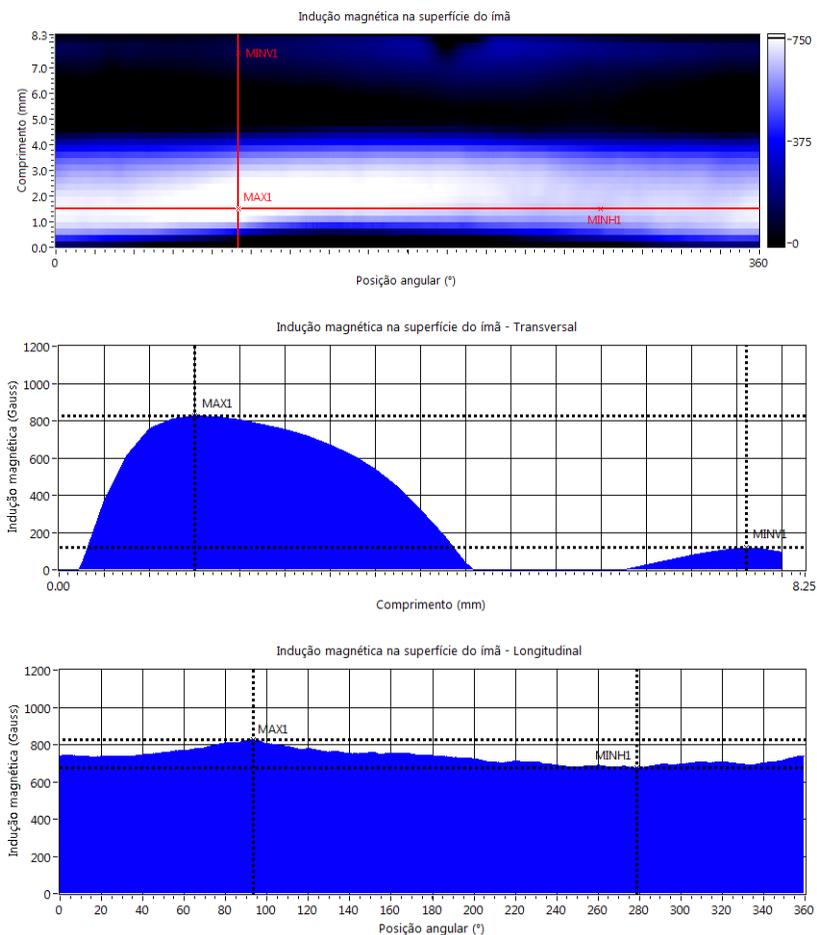


Figura 72 - Mapa magnético e cortes da amostra 21.

c) Redução de 50% de espessura de parede em 75% do comprimento do ímã.

A Tabela 19 apresenta os resultados de mapeamento para as amostras 08 e 21, que tiveram sua espessura reduzida ao longo de 75% do comprimento da amostra (ver seção 3.1.2).

Tabela 19 - Resultados do mapeamento da amostras 09 e 24.

Variável	Amostra 09			Amostra 24		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	555	224	1,2	811	149	0,8
MINH1	428	31	1,2	661	321	0,8
MINV1	134	224	7,1	241	149	7,4
Variação máxima	421			570		
	75,9%			70,3%		

O valor de MAX1 encontrado para a amostra 24 (811 Gauss) ficou muito acima das demais amostras, sugerindo que esta amostra está fora da faixa de indução máxima das demais amostras. Os mapas magnéticos das amostras 09 e 24 estão apresentados na Figura 73 e na Figura 74, respectivamente.

Resultados para a amostra 09

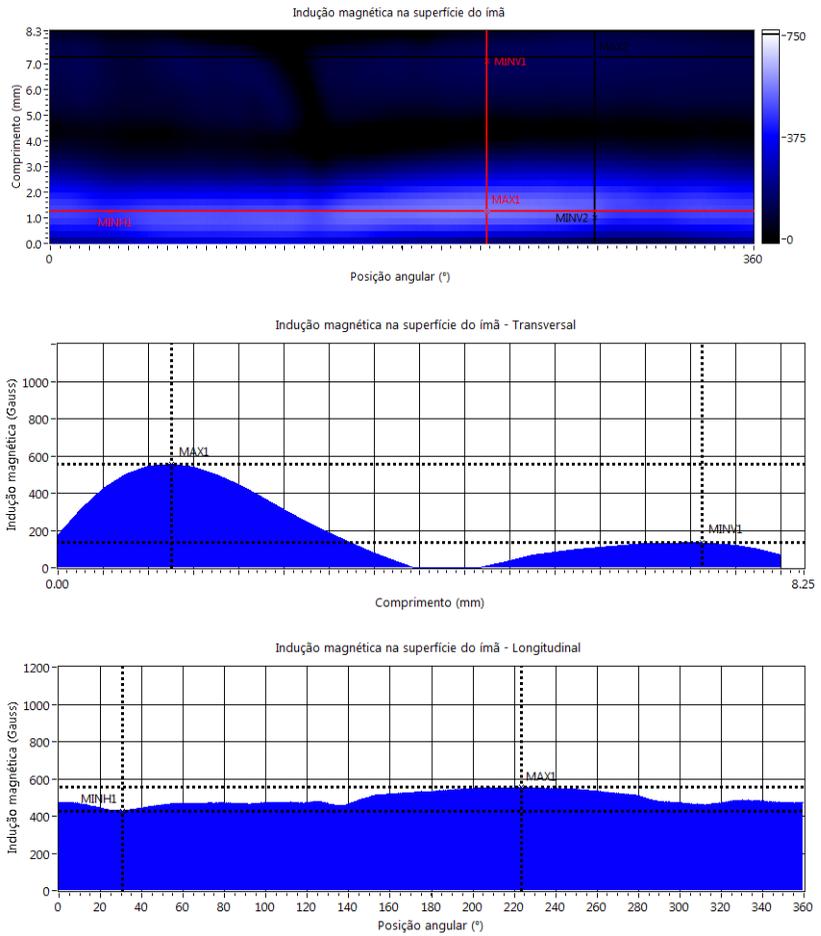


Figura 73 - Mapa magnético e cortes da amostra 09.

Resultados para a amostra 24

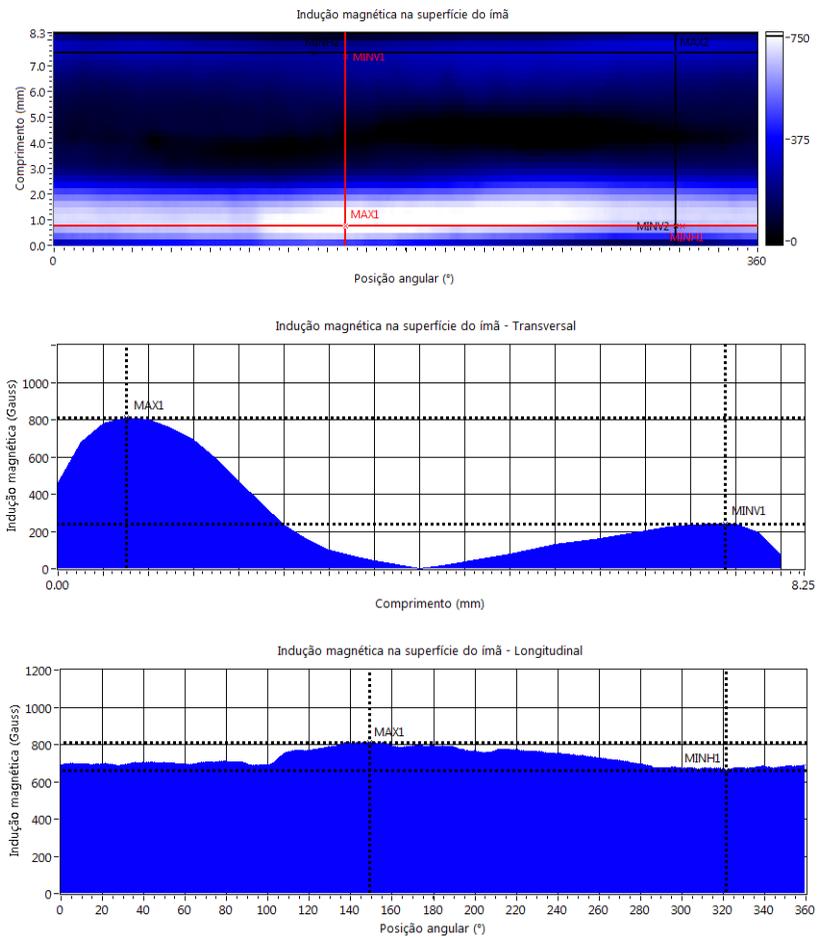


Figura 74 - Mapa magnético e cortes da amostra 24.

d) Redução de 50% de espessura de parede em todo do comprimento do ímã.

As amostras 18 e 29 tiveram sua espessura reduzida ao longo de todo o comprimento do ímã. A Tabela 20 apresenta os resultados do mapeamento de tais amostras.

Tabela 20 - Resultados do mapeamento das amostras 18 e 29.

Variável	Amostra 18			Amostra 29		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	398	42	0,8	322	270	0,2
MINH1	224	138	0,8	175	92	0,2
MINV1	202	42	7,4	276	270	7,4
MAX2	326	232	7,5	330	102	7,5
MINH2	154	67	7,5	236	289	7,5
MINV2	262	232	1,0	184	102	0,2
Variação máxima	244			155		
	61,3%			47,0%		

A partir destes resultados, pode-se perceber que a redução de espessura reduziu drasticamente a indução magnética superficial das amostras, como era esperado. Além disso, acentuou ainda mais o percentual de variação máxima devido à redução dos valores absolutos. Os mapas magnéticos das amostras 18 e 29 estão apresentados na Figura 75 e na Figura 76, respectivamente.

Resultados para a amostra 18

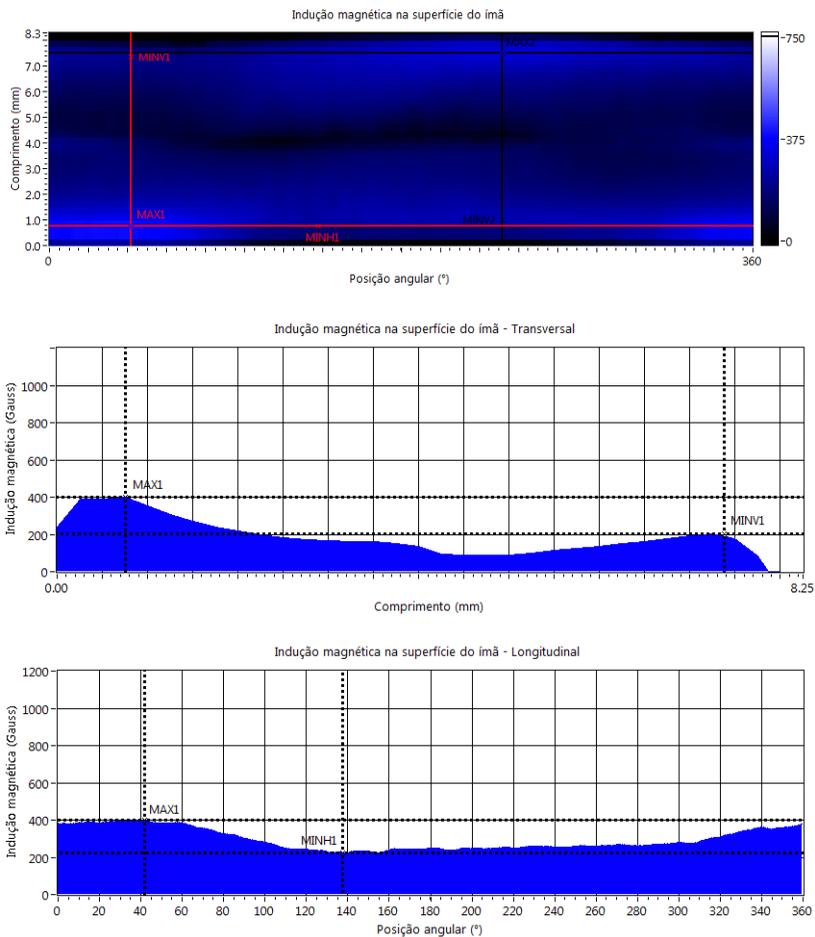


Figura 75 - Mapa magnético e cortes da amostra 18.

Resultados para a amostra 29

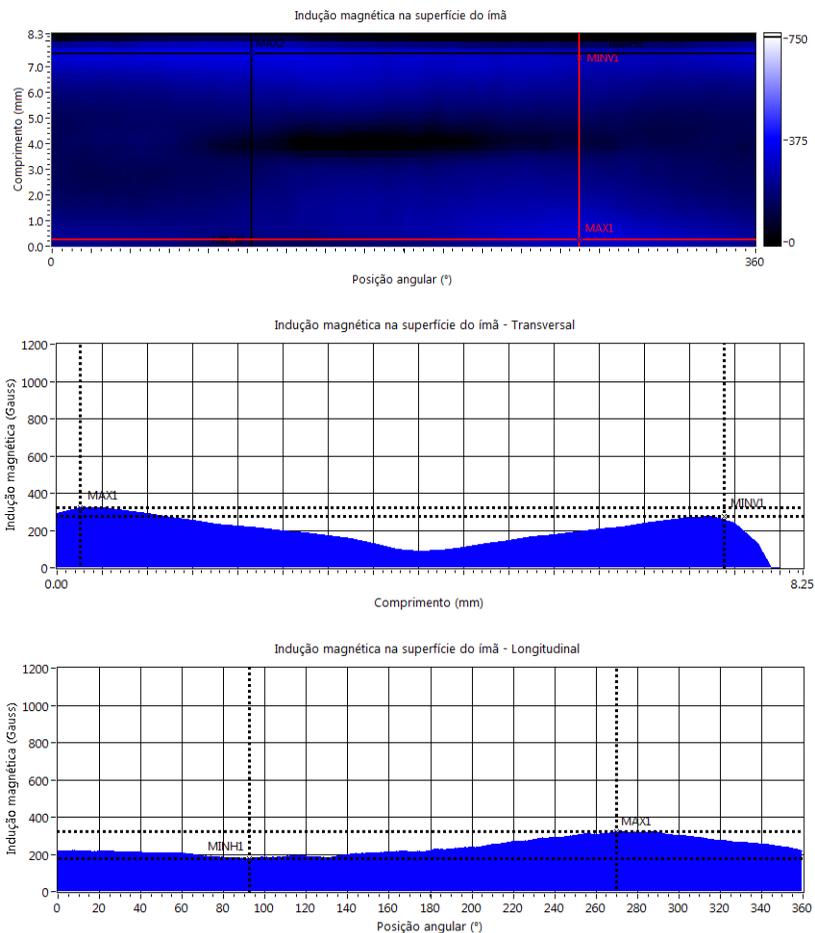


Figura 76 - Mapa magnético e cortes da amostra 29.

e) Apenas um dos anéis magnetizado

Neste caso, somente um dos anéis do par montado estava magnetizado. O outro anel foi colado ao conjunto sem magnetização alguma. Na Tabela 21 pode-se ver os resultados do mapeamento das amostras 14 e 17.

Tabela 21 - Resultados do mapeamento da amostras 14 e 17.

Variável	Amostra 14			Amostra 17		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	983	280	2,0	967	243	2,2
MINH1	739	76	2,0	779	57	2,2
Variação	244			188		
	24,8%			19,4%		

Como pode ser visto na Figura 77 e na Figura 78, a região que representa o anel que não foi magnetizado não apresentou nenhum sinal de magnetização, mostrando que os anéis originalmente possuem indução remanente praticamente nula.

Resultados para a amostra 14

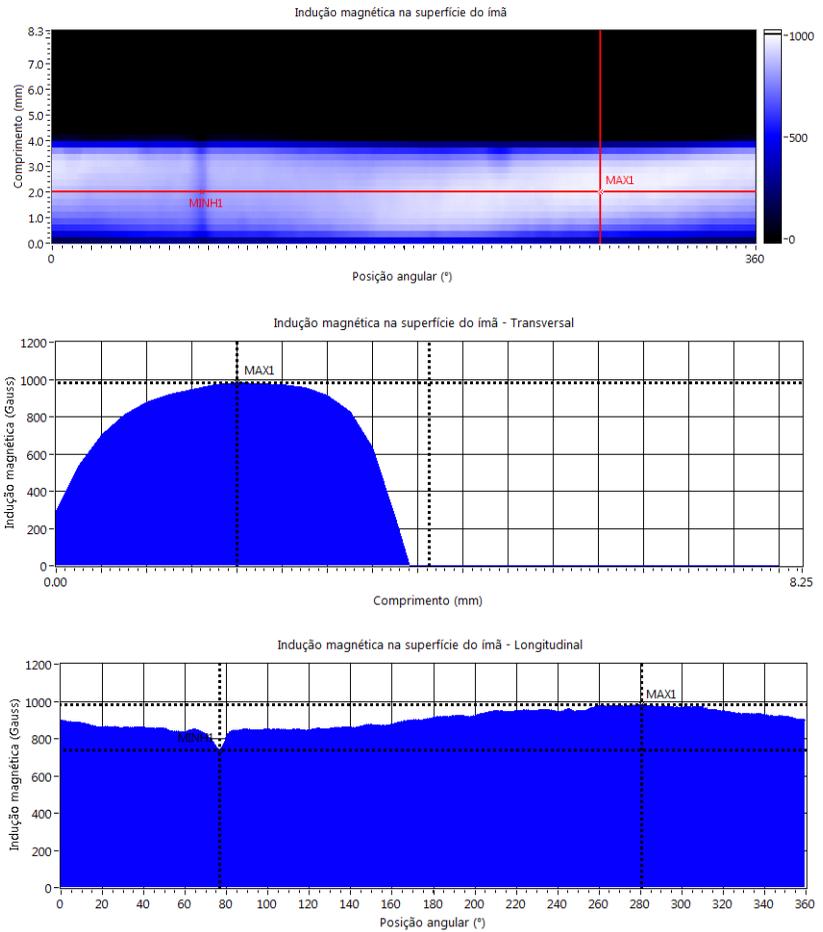


Figura 77 - Mapa magnético e cortes da amostra 14.

Resultados para a amostra 17

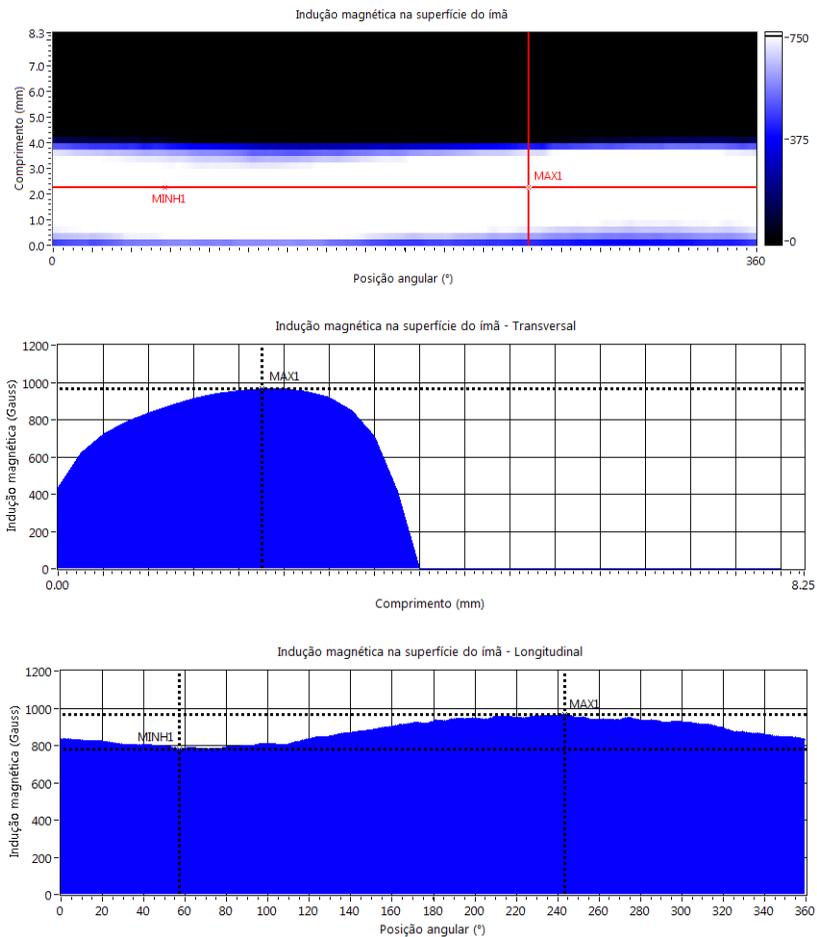


Figura 78 - Mapa magnético e cortes da amostra 17.

5.2.3. Redução variável de espessura

A espessura de um dos anéis da amostra 22 foi reduzida no ponto onde foi encontrado o máximo valor de indução magnética superficial. Com isso, pode-se mostrar que a variação da espessura altera a indução magnética superficial do ímã e pode corrigir picos de indução magnética. A redução de espessura foi realizada perto do ângulo 180°, onde foi encontrado o valor máximo de indução para o anel superior (MAX2). A Tabela 22 apresenta os resultados do mapeamento da amostra 22 antes e depois da redução de espessura. Como pode-ser perceber pela comparação dos valores encontrados, a posição do valor máximo de indução foi deslocado.

Tabela 22 - Resultados do mapeamento da amostra 22 antes e depois da redução de espessura.

Variável	Amostra 22 ANTES			Amostra 22 DEPOIS		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	738	76	0,8	745	83	0,8
MINH1	500	271	0,8	490	182	0,8
MINV1	569	76	6,9	575	83	6,9
MAX2	735	200	7,0	743	242	7,2
MINH2	522	51	7,0	386	187	7,2
MINV2	618	200	1,0	591	242	1,2
Variação máxima	238			359		
	32,2%			48,2%		

A Figura 79 e a Figura 80 mostram os mapas magnéticos para a amostra 22 antes e depois da redução de espessura, respectivamente.

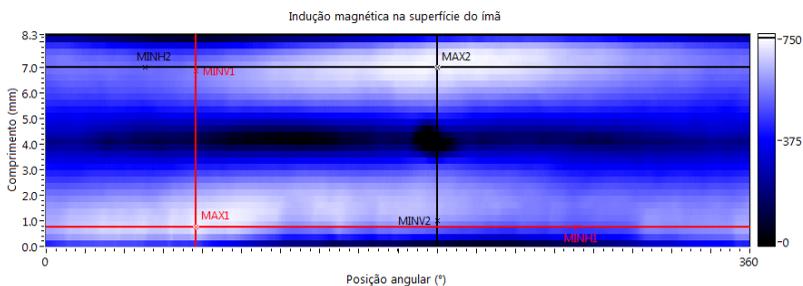


Figura 79 - Mapeamento da amostra 22 antes da redução de espessura.

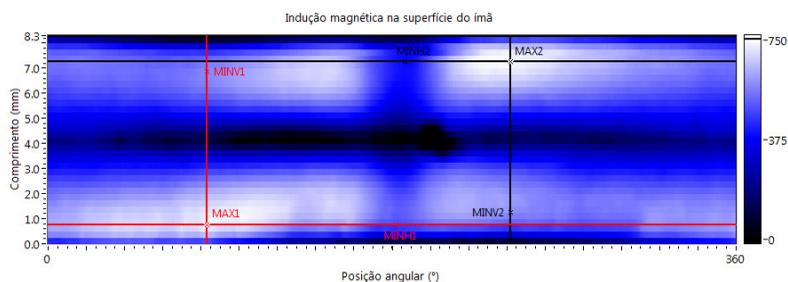


Figura 80 - Mapeamento da amostra 22 depois da redução de espessura.

Como se pode perceber na Figura 80, a redução de espessura causou uma redução no valor de indução magnética superficial do ímã alterando o valor de MINH2 de 522 gauss para 386 gauss (ver Tabela 22). Na amostra 01 foi realizada a redução de espessura em três pontos diferentes do ímã em seu anel superior. Os resultados do mapeamento são mostrados na Figura 81 e na Figura 82.

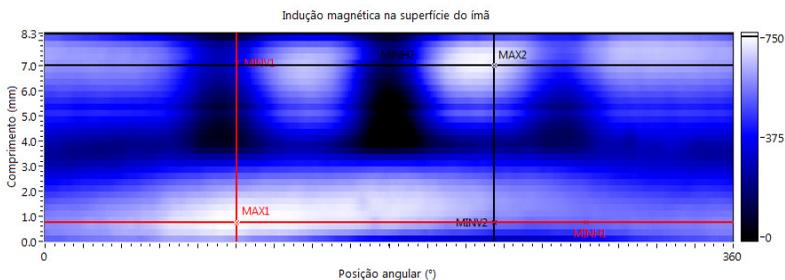


Figura 81 - Mapeamento magnético da amostra 01.

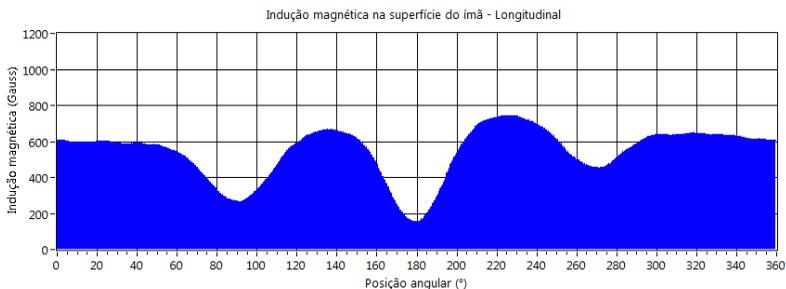


Figura 82 - Corte longitudinal do mapa magnético da amostra 01 na altura de MAX2.

Através das figuras Figura 81 e Figura 82, percebe-se que a indução magnética superficial do ímã é diretamente afetada pela redução de espessura do mesmo. Além disso, quanto menor a espessura resultante, menor o valor máximo de indução magnética superficial.

5.2.4. Anéis perfurados

Apresenta-se a seguir o estudo realizado com anéis perfurados. As perfurações realizadas nas paredes dos anéis puderam ser facilmente percebidas nos mapas de indução magnética e de excentricidade dos ímãs. A Figura 83 e a Figura 84 mostram os mapeamentos magnéticos da amostra 23 antes e depois da perfuração proposital, respectivamente.

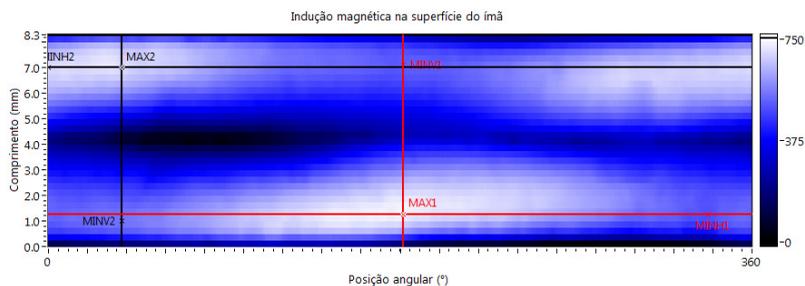


Figura 83 - Mapeamento da amostra 23 antes da perfuração.

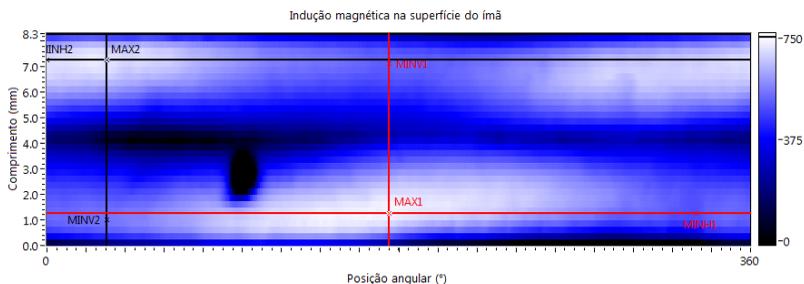


Figura 84 - Mapeamento da amostra 23 depois da perfuração.

Como se pode perceber, a perfuração não alterou nenhuma outra região do ímã além do próprio furo. Na Tabela 23 estão os resultados do mapeamento da amostra 23 antes e depois da perfuração. Pode-se perceber que praticamente não houve alterações nas variáveis. Com isso, fica mais evidente como a influência da perfuração dos anéis é localizada e não afeta regiões distantes do furo.

Tabela 23 - Resultados do mapeamento da amostra 23 antes e depois da perfuração.

Variável	Amostra 23 ANTES			Amostra 23 DEPOIS		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	742	182	1,2	744	175	1,2
MINH1	495	338	1,2	492	332	1,2
MINV1	514	182	7,1	519	175	7,1
MAX2	706	38	7,0	709	31	7,2
MINH2	507	175	7,0	502	207	7,0
MINV2	547	38	1,0	548	31	1,0
Variação máxima	247			252		
	33,3%			33,9%		

Para avaliar a representatividade e a resolução¹⁵ do mapa de excentricidade, foram feitas três perfurações com diâmetros diferentes na amostra 06. A e a mostram o mapa magnético e de excentricidade da amostra após as perfurações.

¹⁵ Aqui, a resolução está relacionada à capacidade de representar detalhes, neste caso, o diâmetro diferente dos três furos.

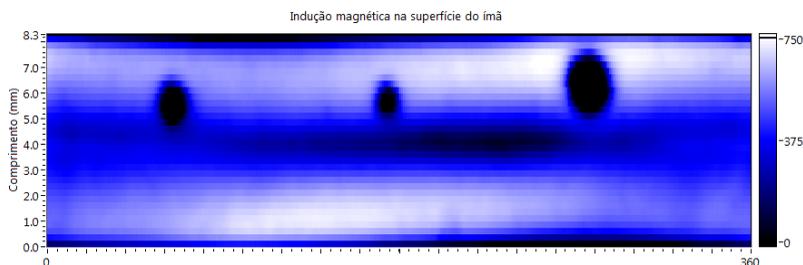


Figura 85 - Mapeamento magnético da amostra 06 depois da perfuração.

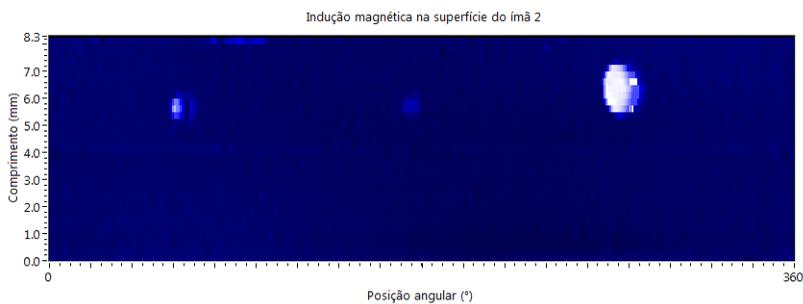


Figura 86 - Mapeamento da excentricidade da amostra 06 depois da perfuração.

Comparando-se o mapa magnético e o de excentricidade, pode-se perceber que o mapeamento magnético reflete com considerável precisão as falhas existentes na indução magnética superficial do ímã e que a resolução do mapa de excentricidade permite que sejam percebidas pequenas alterações ou variações na superfície.

5.2.5. Aquecimento pontual

O aquecimento dos ímãs pode influenciar diretamente na indução remanente dos mesmos. Para comprovar este efeito, um anel foi superaquecido em diversos pontos. A amostra utilizada, mesmo sem o aquecimento pontual, apresenta distribuição não-uniforme de campo ao longo de sua superfície. No entanto, como o mesmo foi medido em sua condição inicial e após cada aquecimento, as diferenças encontradas em cada ponto descrevem o efeito do aquecimento. Este teste tem como objetivo obter resultados qualitativos do efeito do aquecimento. Não é possível realizar uma análise quantitativa pois, não sendo controlados precisamente a temperatura máxima do ímã ou o tempo de aplicação, não se tem as condições de teste precisamente definidas.

Neste teste, foi realizado o mapeamento magnético do anel em teste apenas em sua região central e não em toda a sua superfície. Para o seu aquecimento, foi utilizada uma estação de solda de chumbo-estanho com temperatura regulável. A temperatura foi regulada em aproximadamente 375°C. O tempo de aplicação da alta temperatura foi de 15 segundos para cada teste, sendo os resultados apresentados nas figuras Figura 87, Figura 88, Figura 89, Figura 90 e Figura 91.

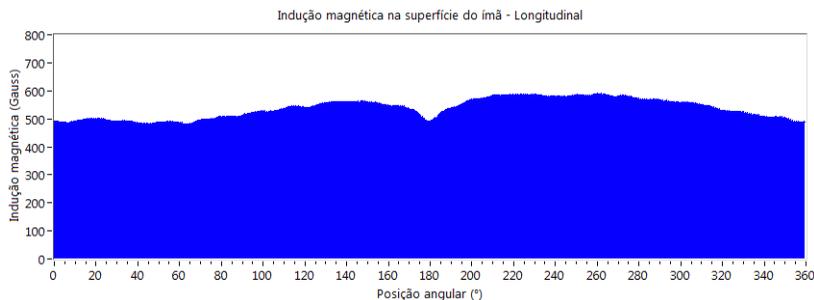


Figura 87 - Mapeamento inicial da amostra

Após o primeiro aquecimento pontual, o mapeamento da amostra apresentou resultado de acordo com a Figura 88.

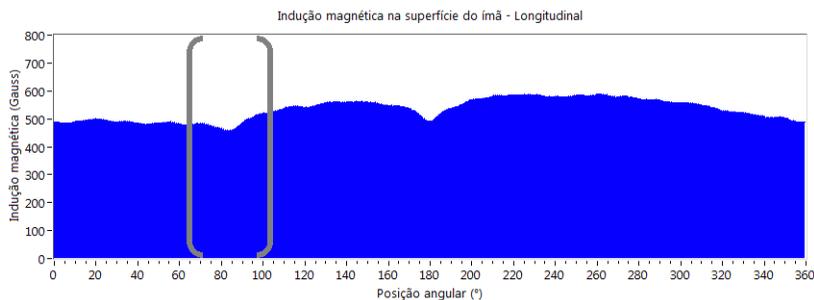


Figura 88 - Mapeamento da amostra após o primeiro aquecimento.

Pode-se perceber a redução de indução magnética superficial em torno do ângulo de 85° (região entre os colchetes na Figura 88). As três etapas de aquecimento pontual seguintes apresentaram resultados de acordo com as figuras Figura 89, Figura 90 e Figura 91.

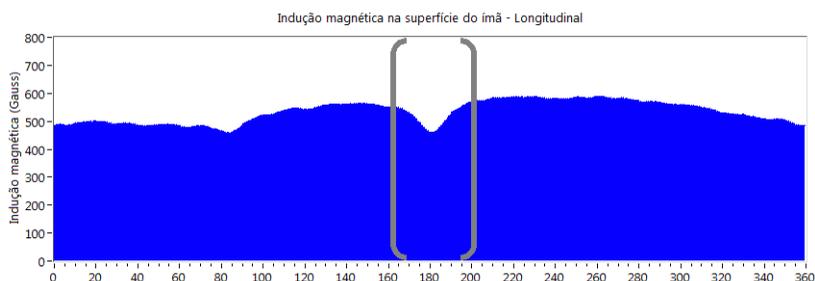


Figura 89 - Mapeamento da amostra após o segundo aquecimento.

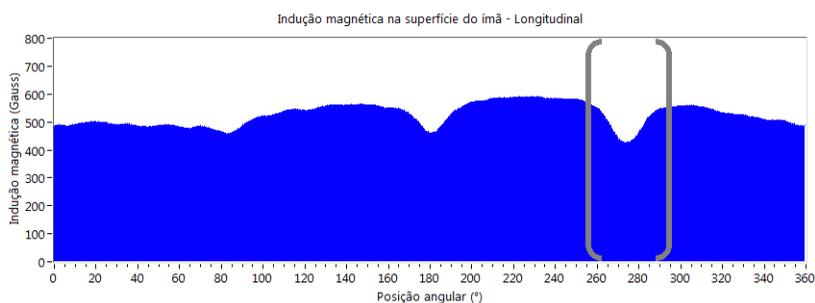


Figura 90 - Mapeamento da amostra após o terceiro aquecimento.

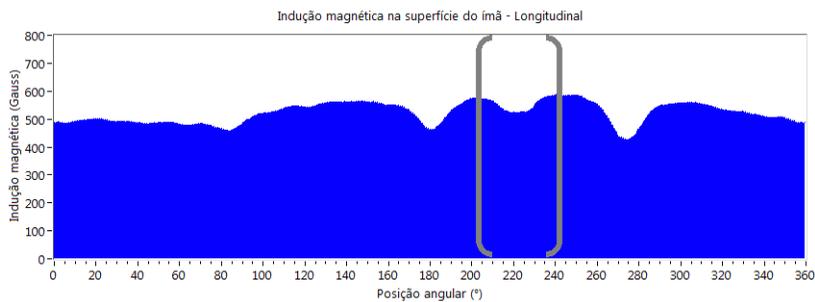


Figura 91 - Mapeamento da amostra após o quarto aquecimento.

A

Tabela 24 apresenta os valores de indução medidos no ponto de aquecimento após cada uma das etapas do teste.

Tabela 24 - Resultados do mapeamento da amostra 19 após cada etapa de aquecimento.

Condição	Ângulo (°)	Indução magnética no ponto (Gauss)		
		Antes	Depois	Varição
AQ1	85	509	460	-49
AQ2	181	495	461	-34
AQ3	275	580	428	-152
AQ4	220	589	522	-67

A variação apresentada na mostra que cada etapa de aquecimento pontual provocou uma redução diferente nos valores indução magnética superficial dos ímãs. Com os resultados deste teste, pode-se comprovar que a indução dos anéis pode ser reduzida pontualmente através do aquecimento da superfície da amostra.

5.3. Avaliação de perfil de indução magnética remanente.

Apesar de representarem as variações de indução magnética na superfície dos ímãs, os mapas apresentados não fornecem diretamente informações sobre o desequilíbrio apresentado pelos ímãs em relação ao seu perfil. Para permitir uma análise rápida e direta do desbalanceamento dos anéis foi utilizado um gráfico de perfil de indução magnética. A Figura 92 mostra um exemplo de perfil magnético obtido a partir do mapeamento de uma das amostras.

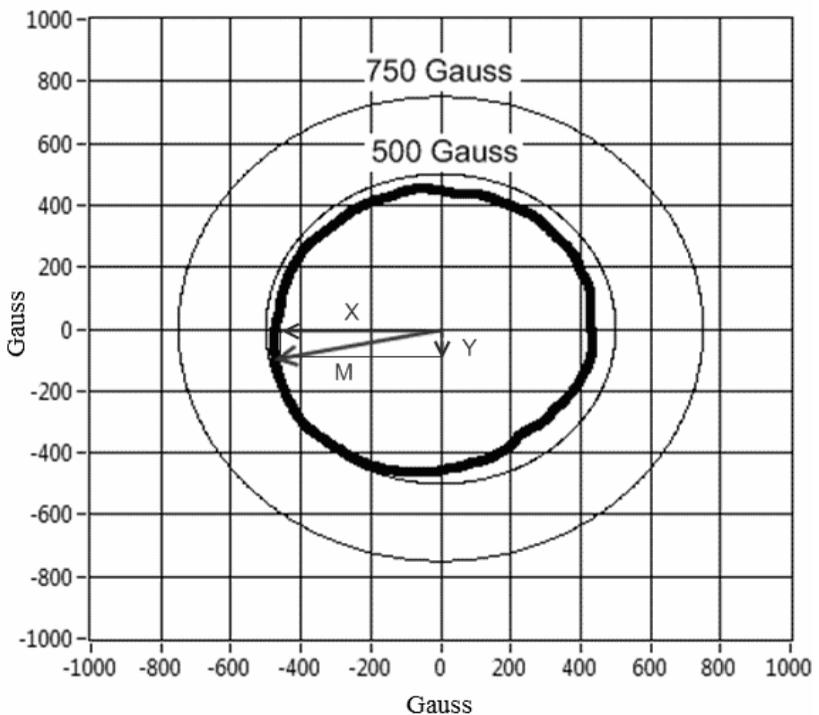


Figura 92 - Exemplo de perfil magnético de um anel com magnetização radial.

A linha espessa representa o perfil magnético, enquanto as linhas finas servem como referências de 500 e 750 gauss. A seta representa a direção resultante do desequilíbrio de indução magnética. A partir desse perfil, pode-se perceber que a indução magnética na superfície do ímã, além de não uniforme, possui uma distribuição que não é aleatória, criando assim um desequilíbrio de indução resultante no

sentido radial. Para avaliar este desbalanceamento, são avaliados os valores médios de indução magnética em relação a cada eixo e a intensidade de seu vetor resultante, conforme os valores críticos apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 - Exemplo de valores resultantes de indução magnética.

Indução resultante média (Gauss)			
X	Y	M	Somatório (k)
-12,46	-1,40	12,54	650,0

Nesta tabela, **X** representa a indução magnética média em relação ao eixo das abscissas, **Y** o mesmo para o eixo das ordenadas e **M** é o módulo ou intensidade do vetor resultante (ver Figura 92). O Somatório representa a soma dos valores de indução magnética total do perfil magnético do ímã, em quilogauss (ver seção 4.4.3).

5.3.1. Amostras padrão

Inicialmente, foram avaliadas três amostras padrão: 02, 04 e 05. Foram criados os perfis com valores de indução média e os resultados estão apresentados na Figura 93.

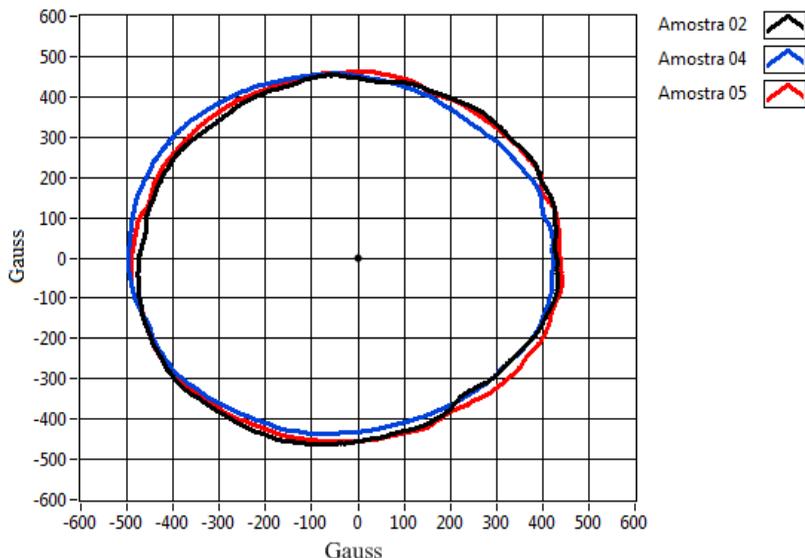


Figura 93 - Perfil magnético das amostras de referência 02, 04 e 05.

Na Tabela 26 são apresentados os resultados obtidos para as três amostras. Nas três amostras consideradas, foi percebido um valor de desequilíbrio muito maior em **X** do que em **Y**. Além disso, os valores apresentados foram sempre negativos em **X**.

Tabela 26 - Resultados da análise do perfil magnético das amostras 02, 04 e 05.

Amostra	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)
	X	Y	R	
02	-12,46	-1,40	12,54	650,0
04	-20,46	3,84	20,82	641,7
05	-12,00	-0,44	12,01	664,8

Limitando as possibilidades de falhas aos processos de compactação do pó magnético e de magnetização dos anéis, é provável que as amostras consideradas apresentem problemas de magnetização. Isso porque a posição de mapeamento usou como referência uma determinada posição de magnetização, sendo que a compactação foi realizada sem qualquer referência de posição em relação à magnetização.

5.3.2. Redução variável de espessura

Uma das maneiras de alterar o desbalanceamento de indução magnética resultante na superfície das amostras é reduzindo a espessura da superfície. Com menor espessura, esta região terá menor fluxo magnético em sua superfície. Este fato pode ser comprovado através do teste da amostra 22, cujo mapa magnético já foi avaliado e apresentado nas figuras Figura 79 e Figura 80. Na Figura 94 pode-se perceber claramente a influência da alteração da indução magnética na superfície do ímã quando ocorre a redução da espessura do anel.

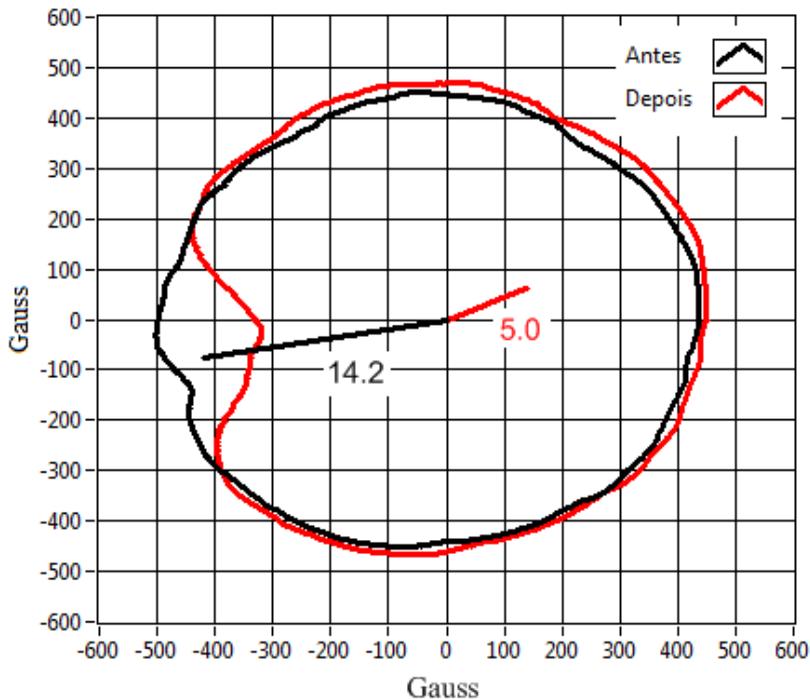


Figura 94 - Perfis magnéticos gerados antes e depois da redução da espessura em uma região da parede do anel.

Os valores obtidos a partir da análise do gráfico estão apresentados na tabela seguinte:

Tabela 27 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 22 antes e depois da redução de espessura.

Condição	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)
	X	Y	M	
Antes da redução	-14,0	-2,6	14,2	644,2
Depois da redução	4,5	2,0	5,0	641,7

Os valores de indução resultante mostram que o desbalanceamento em relação à indução magnética foi reduzido tanto na direção X (de -14,0 para 4,5) quanto na direção Y (de -2,6 para 2,0), sendo o módulo do vetor resultante **M** reduzido de 14,2 para apenas 5,0.

5.3.3. Anéis perfurados

Da mesma forma que a redução de espessura, qualquer procedimento que retire material magnético do anel reduz a indução magnética em sua superfície. Assim, a perfuração de um anel reduz drasticamente a indução magnética podendo causar grande desbalanceamento em relação aos eixos “x” e “y”. Foi realizado o mapeamento da amostra 23 antes e após a perfuração de sua parede, sendo os perfis magnéticos para as duas condições apresentados na Figura 95.

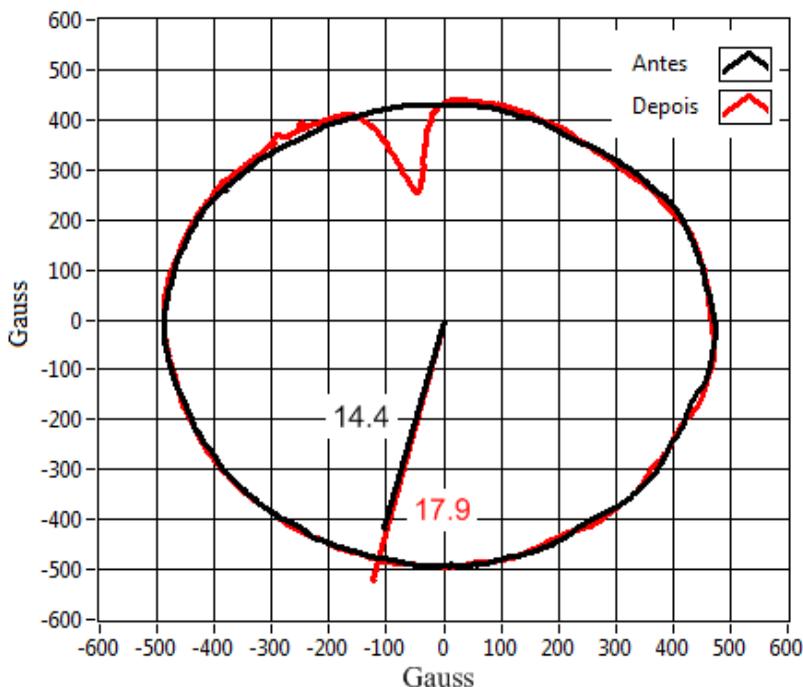


Figura 95 - Perfis magnéticos gerados antes e depois da perfuração do anel.

Os valores obtidos a partir da análise do gráfico estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 23 antes e depois da perfuração.

Condição	Indução resultante média (Gauss)	Somatório (quilogauss)
----------	----------------------------------	------------------------

	X	Y	M	
Antes da perfuração	-3,5	-13,9	14,4	684,8
Depois da perfuração	-4,1	-17,4	17,9	680,6

Como se pode perceber nos resultados apresentados na Figura 95, a perfuração gerou uma grande alteração na indução resultante no eixo Y, sem alterar de forma significativa o desequilíbrio no eixo X. Além disso, o somatório também não sofreu alteração significativa.

5.3.4. Aquecimento pontual

A indução magnética superficial dos anéis pode ser alterada não somente pela remoção de material magnético, mas também pela degradação das propriedades magnéticas do material de forma pontual.

A avaliação do desequilíbrio de indução magnética resultante de uma amostra (amostra 19) apresentou um módulo igual a 21,4, sendo X igual a -14,9 e Y igual a -15,4. O superaquecimento pontual em diversos pontos do anel reduziu o módulo do desbalanceamento para 14,2, conforme pode ser visto na Figura 96.

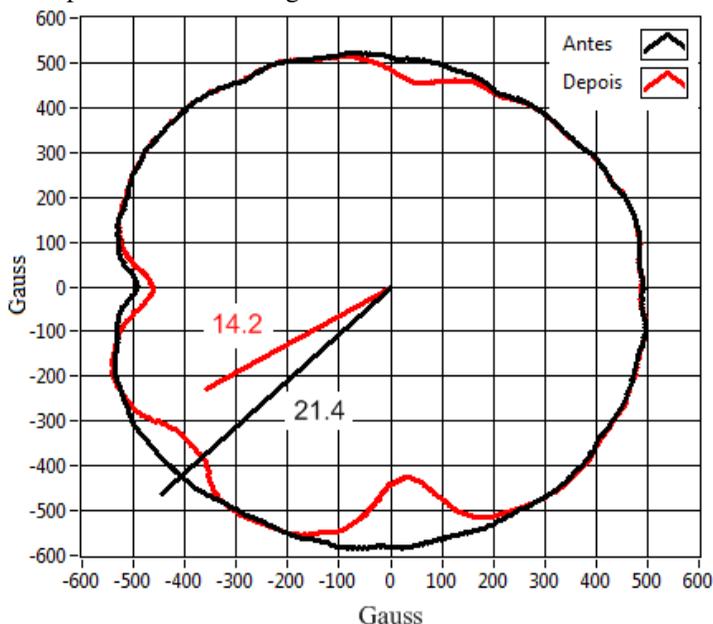


Figura 96 - Perfis magnéticos gerados antes e depois do superaquecimento pontual do anel.

Os valores obtidos a partir da análise do gráfico estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 - Resultados da análise do perfil magnético da amostra 19.

Condição	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)
	X	Y	M	
Inicial	-14.9	-15.4	21.4	909.6
1	-15.3	17.8	23.5	899.1
2	-13.9	-17.7	22.5	897.0
3	-14.4	-9.7	17.3	870.4
4	-12.0	-7.6	14.2	859.0

O superaquecimento afeta uma área relativamente grande da amostra devido à transferência de calor ser uniforme em todas as direções dentro da amostra. Assim, ao invés de uma grande depressão pontual, o superaquecimento gera uma redução de indução magnética superficial com maior ângulo e menor intensidade.

5.4. Comparação medida e simulação de indução magnética superficial

A Figura 97 mostra as curvas obtidas na simulação computacional da indução magnética superficial dos ímãs (4.2.1) e uma medição da amostra 02 (região preenchida do gráfico).

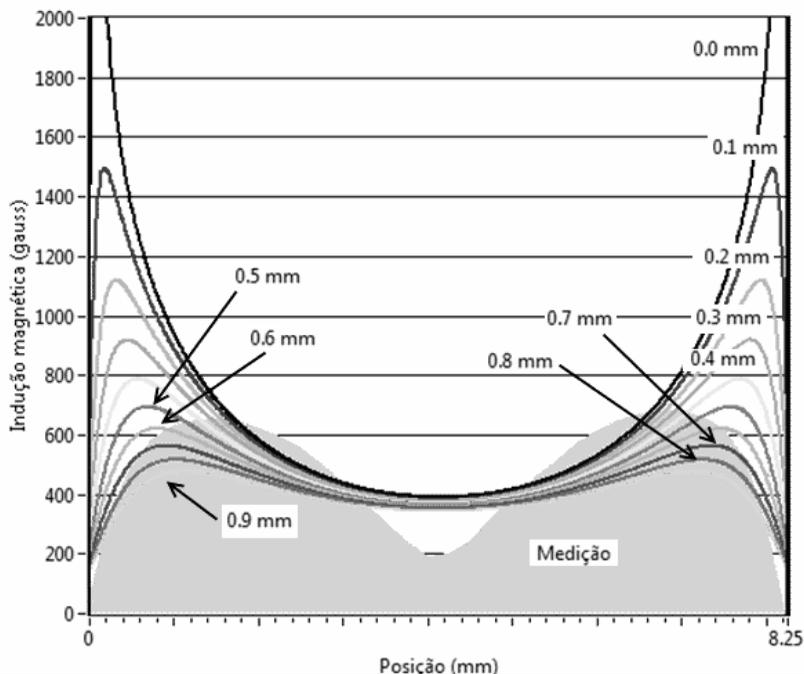


Figura 97 - Comparação entre simulações e leitura real de indução magnética superficial normal.

Na simulação numérica em questão, foram utilizadas as características magnéticas dos próprios ímãs através da utilização de curvas de histerese obtidas em histeresígrafo (ver seção 0). No entanto, na Figura 97 percebe-se que o formato das curvas obtidas na simulação não equivale à curva obtida através do mapeamento da amostra padrão 02. Este fato sugere que as amostras não apresentam magnetização completamente radial (condição considerada na simulação). Se for considerado apenas o valor máximo de indução magnética obtido na medição da amostra 02, este se aproxima do valor máximo de indução obtido na simulação numérica que considera a sonda a 0,5 mm de distância da superfície do anel.

5.5. Correlação entre força eletromotriz e perfil magnético.

Várias amostras foram avaliadas em relação à força eletromotriz gerada pelas mesmas quando forçadas a se deslocar em um movimento linear com curso e frequência definidos (seção 3.4). Este teste foi realizado com o intuito de verificar se é possível estabelecer uma relação entre a força eletromotriz gerada pelas amostras e o somatório medido através do perfil magnético das mesmas. Os resultados estão representados no quadro abaixo:

Tabela 30 - Comparação entre os valores de força eletromotriz e área do perfil magnético das amostras.

Grupo	Tipo	Força eletromotriz (V)	Somatório (quilogauss)
Anéis compósitos duplos	Padrão	6,805	664,8
	25% de redução de parede	5,877	488,2
	50% de redução de parede	4,941	334,5
	75% de redução de parede	3,771	231,0
	100% de redução de parede	2,116	99,6
	Somente um anel magnetizado	3,586	156,4
	Furos	6,726	627,4
	Redução de parede distribuída	6,464	624,2
	Aquecimento pontual	6,707	614,3
Compactação em disco	Anel único	7,225	726,9
Anel com seis partes	Anel único	6,173	995,4

Um gráfico pode ser criado relacionando a força eletromotriz com a área do perfil, facilitando assim a visualização da relação entre as grandezas.

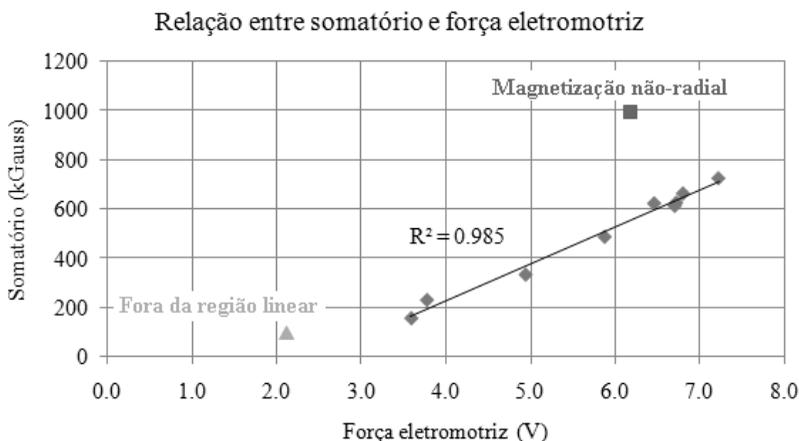


Figura 98 - Comparação entre simulações e leitura real de indução magnética superficial normal.

Pode-se perceber que há uma relação linear ($R^2 = 0,985$) entre força eletromotriz e o somatório medido através do perfil magnético das amostras em quase todos os casos. Apenas uma das amostras que possui magnetização radial ficou fora da região linear, assim como a amostra que apresenta magnetização não-radial.

5.6. Comparação entre força eletromotriz simulada e medida

Os valores de força eletromotriz obtidos na simulação e sua comparação com os valores medidos estão apresentados na Tabela 31.

Tabela 31 - Resultados da simulação de força eletromotriz.

Redução de espessura	Força eletromotriz (V)		
	Real	Simulado	Diferença
Nenhuma (padrão)	6,776	6,838	-0,062
Em 25% da superfície	5,850	5,696	0,154
Em 50% da superfície	4,781	4,981	-0,200
Em 75% da superfície	3,593	4,299	-0,706
Em 100% da superfície	2,129	3,244	-1,115
Apenas um ímã mag.	3,409	3,276	0,133

Como se pode perceber, os resultados encontrados na simulação apresentam considerável diferença se comparados aos valores das medições quando é considerada uma redução de espessura em mais de 50% da superfície dos anéis. Este fato pode ter sido causado imprecisão na usinagem das peças, visto que um pequeno erro representa uma grande variação percentual na espessura, pois a espessura original dos anéis era de 0,9 mm. A redução de espessura os deixou com 0,45 mm, sendo que a tolerância da usinagem é de $\pm 0,05$ mm, ou seja, em torno de 20%. Além disso, pode haver não homogeneidade de propriedades magnéticas nas peças ao longo da espessura dos anéis.

5.7. Testes em motores

Após a avaliação de amostras preparadas, foram testados dois ímãs empregados em testes de motores lineares. Estes anéis estiveram em teste por diversas horas e suas características magnéticas foram avaliadas com a ajuda do mapeamento magnético superficial. Feitos a partir do método de extrusão reversa, dois anéis de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ foram utilizados para avaliação do desempenho de dois motores lineares (A e B) em relação ao seu rendimento e consumo de energia. Após uma bateria de testes intensos, percebeu-se que os motores tiveram uma queda acentuada de desempenho e suspeitou-se que os ímãs haviam perdido parte de suas propriedades magnéticas iniciais.

Para verificar a integridade dos ímãs, estes foram comparados através do mapeamento magnético superficial com amostras de ímãs do mesmo lote que nunca haviam sido utilizadas.

O mapeamento a seguir mostra a intensidade e uniformidade de um anel de mesmas características que os anéis utilizados para a confecção das amostras A e B, mas que nunca foi utilizado (virgem).

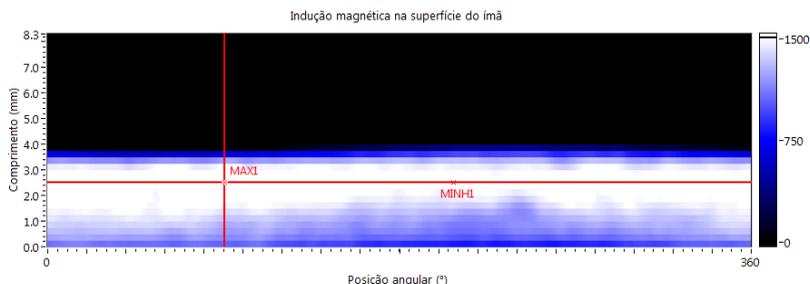


Figura 99 - Mapa magnético do anel virgem.

Na Tabela 32 são mostrados os valores de indução magnética máxima encontrados no anel original.

Tabela 32 - Resultados do mapeamento do anel original.

Original	Indução magnética (Gauss)	Posição	
		Ângulo (°)	Altura (mm)
MAXI	1680	90	2,5
MINHI	1513	207	2,5

Os valores encontrados são muito superiores àqueles vistos para amostras de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compósito.

A Tabela 33 mostra os resultados do mapeamento das amostras A e B, bem como seus valores de indução máxima.

Tabela 33 - Resultados do mapeamento das amostras A e B.

Variável	Amostra A			Amostra B		
	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)	Indução magnética (Gauss)	Ângulo (°)	Altura (mm)
MAX1	1334	324	1,0	1207	130	0,8
MINH1	1150	81	1,0	844	210	0,8
MINV1	1022	324	5,9	1070	130	5,2
MAX2	1031	245	5,5	1131	181	5,5
MINH2	336	80	5,5	690	11	5,5
MINV2	1267	245	1,0	1157	181	0,8

De fato, os valores máximos encontrados para estas amostras mostram que as mesmas sofreram perda considerável de indução remanente conforme indica o seu baixo valor de indução magnética superficial ao longo de toda a superfície. Além disso, a amostra A apresenta uma falha no anel superior (imperceptível a olho nu), como pode ser visto nos resultados apresentados na Figura 100 e na Figura 101. Nota-se que há uma região que sofreu grande degradação na amostra A (região superior esquerda do mapa), o que não aconteceu na amostra B (ver Figura 101).

Resultados para a amostra A

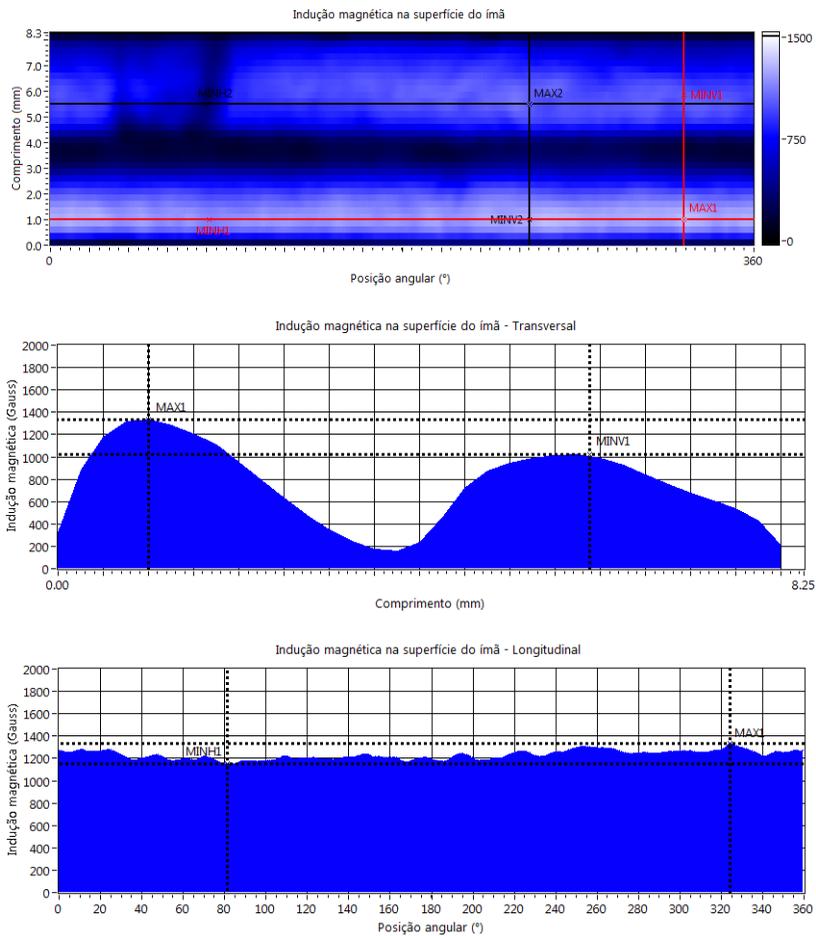


Figura 100 - Mapa magnético e cortes da amostra A.

Resultados para a amostra B

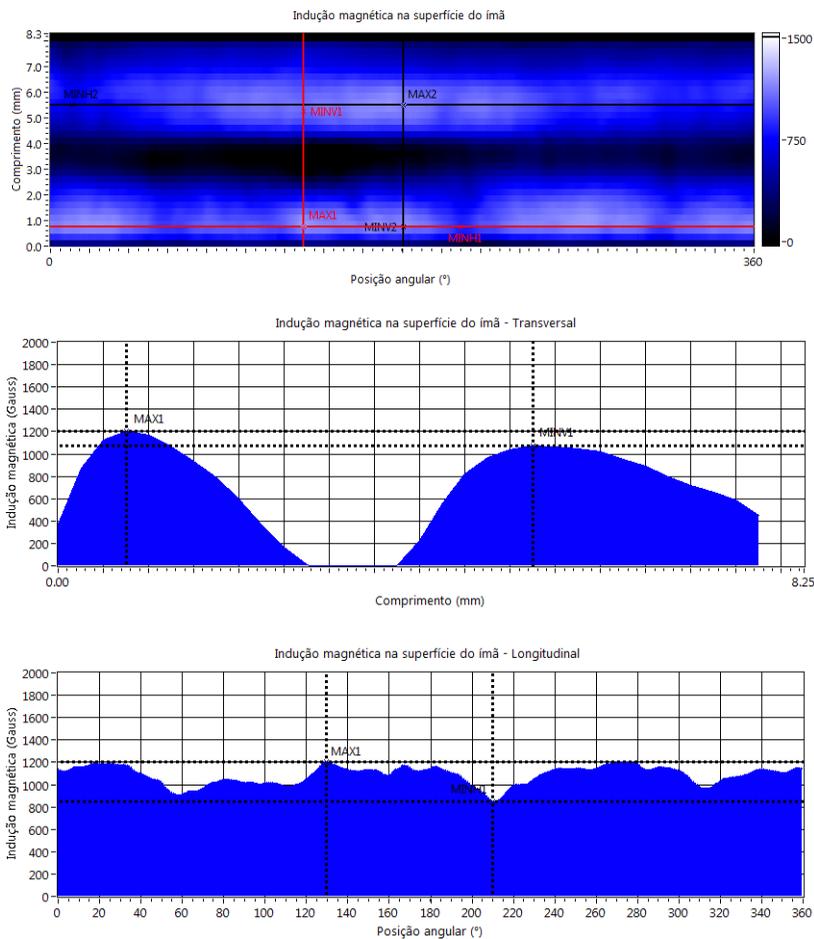


Figura 101 - Mapa magnético e cortes da amostra B.

O mapa de perfil magnético apresentado na Figura 102 mostra para as amostras A e B o perfil de indução magnética superficial das amostras A e B em comparação com um anel virgem.

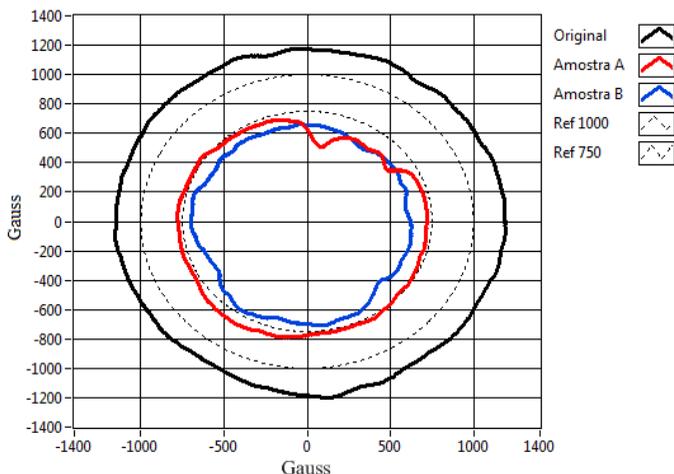


Figura 102 - Comparação entre perfis magnéticos.

Os resultados da análise dos perfis das amostras A e B e também do anel original estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores de desequilíbrio de indução magnética superficial encontrados para as amostras A, B e para o anel original.

Amostra	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (kGauss)
	X	Y	M	
A	-21,6	-35,0	41,1	1,683
B	-13,75	-10,15	17,09	1,360
Original	9,16	3,07	9,66	4,278

Assim, com dos dados obtidos através do mapeamento magnético, fica claro que as amostras A e B possuem desequilíbrio elevado (elevados valores de **R**) e indução magnética remanente¹⁶ inferior ao seu estado original (comparação com anel original).

¹⁶ A indução magnética remanente está diretamente ligada ao fluxo magnético gerado pelo ímã, sendo este proporcional ao *somatório* (seção 4.4.3)

5.8. Avaliação do magnetizador

A análise dos perfis magnéticos pode fornecer informações não apenas das amostras ou anéis avaliados, mas também dos métodos e processos utilizados. Para avaliar a influência do magnetizador de pulsos no nível de magnetização das amostras, três anéis foram magnetizados com um pulso magnético enquanto outras três amostras semelhantes receberam dois pulsos (Seção 3.1.3). Os resultados do mapeamento para as amostras com um pulso de magnetização são apresentados na Figura 103 em forma de perfil magnético.

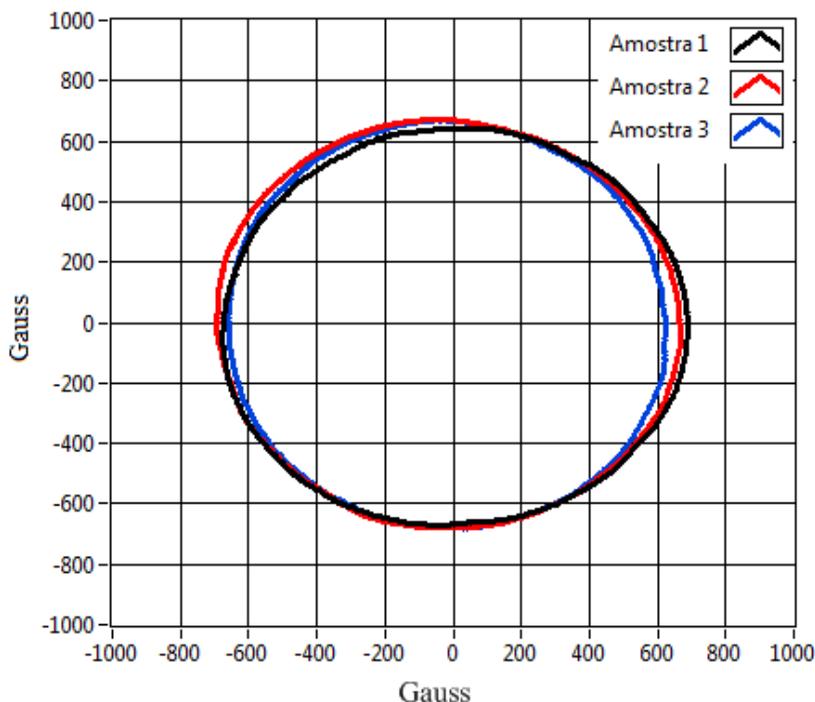


Figura 103 - Perfis magnéticos das três amostras que receberam apenas um pulso de magnetização.

Através dos perfis magnéticos, pode-se perceber que as amostras apresentam diferenças em relação à sua indução magnética superficial em diversas regiões do anel. No entanto, seu desequilíbrio em relação aos eixos **X** e **Y** é relativamente baixo (ver tabela 35 - Resultados do mapeamento das amostras que receberam apenas um pulso magnético).

Amostra		Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)
		X	Y	M	
1 pulso	A	2,62	-8,30	8,70	1404,0
	B	-7,56	-2,42	7,94	1434,0
	C	-8,63	-4,33	9,66	1360,0
	Média	-4,52	-5,02	8,77	1399,3

A Figura 104 apresenta o perfil magnético das amostras que receberam dois pulsos magnéticos. Pode-se perceber uma maior uniformidade em relação aos seus perfis magnéticos.

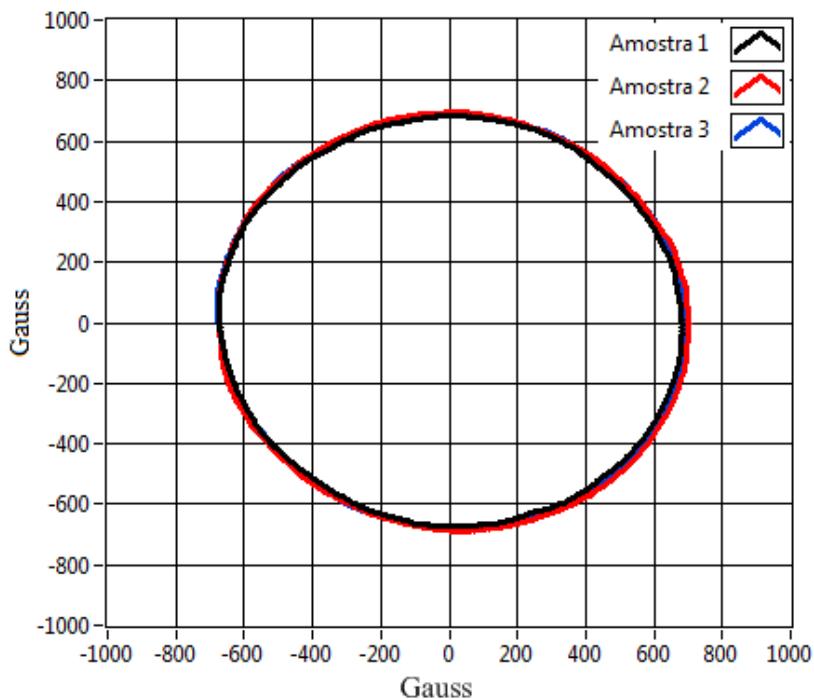


Figura 104 - Perfis magnéticos das três amostras que receberam dois pulsos de magnetização.

A Tabela 36 mostra que os valores de desequilíbrio para estas amostras são relativamente baixos e uniformes, tendo todos a mesma direção, mesmo que com intensidades ligeiramente diferentes:

Tabela 36 - Resultados do mapeamento da amostras que receberam dois pulsos magnéticos.

Amostra		Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)
		X	Y	M	
2 pulsos	A	4,36	2,86	5,21	1429,0
	B	7,35	1,58	7,52	1485,0
	C	6,38	2,86	6,99	1466,0
	Média	6,03	2,43	6,57	1460,00

A Tabela 37 mostra uma comparação dos dados de desequilíbrio encontrados para os casos de pulso único e de pulso duplo de magnetização. Nota-se que através da comparação entre as curvas de perfil magnético das amostras que receberam um único pulso e das que receberam dois pulsos, pode-se perceber que as do segundo caso são praticamente idênticas, enquanto as do primeiro apresentam desvios em diversas regiões. Os valores de desequilíbrio (Tabela 37) mostram também um menor desequilíbrio total e uma maior área do perfil para as amostras com dois pulsos.

Tabela 37 - Comparação dos resultados de desequilíbrio entre amostras com pulso único e com pulso duplo.

Condição	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (kGauss)
	X	Y	M	
1 pulso	-4,52	-5,02	8,77	1399,3
2 pulsos	6,03	2,43	6,57	1460,0
Variação	10,55	7,45	2,19	60,7

Estes resultados indicam que o magnetizador possivelmente não está conseguindo obter as máximas propriedades magnéticas dos anéis de $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ compósitos com apenas um pulso magnético em uma única direção. Uma possível causa para este problema é a não uniformidade do campo magnético gerado pelo magnetizador de pulsos causada por limitações construtivas das bobinas de magnetização.

5.9. Avaliação do processo de compactação.

Para avaliar as condições do pó de que foram feitos os anéis e o impacto do processo de compactação em formato de anel, foram compactados dois discos. O formato em disco, como mostra a Figura 105, torna possível a sua avaliação em histeresígrafo.



Figura 105 - $Nd_2Fe_{14}B$ compactado em forma de disco e posterior usinagem em forma de anel.

Os resultados para as duas amostras são apresentados na Figura 106. A partir do segundo quadrante da curva de histerese de duas amostras, foram determinados os valores de indução remanente (B_r) e coercividade (H_c) do material. Estes valores são apresentados na Tabela 38.

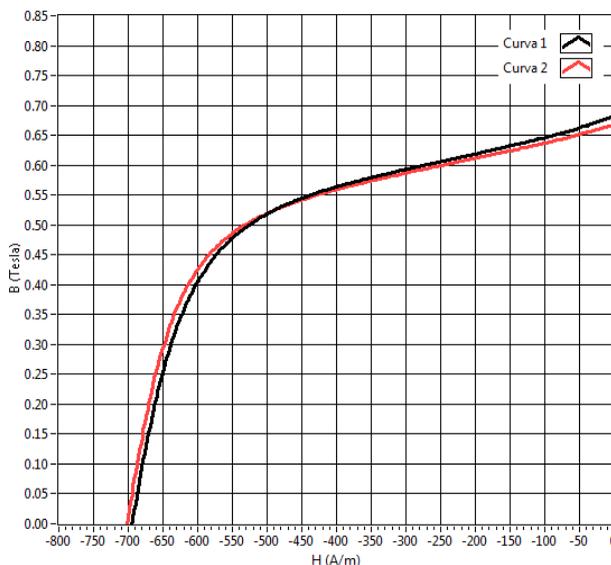


Figura 106 - Segundo quadrante da curva de histerese do disco de $Nd_2Fe_{14}B$.

Estes dados podem ser comparados com aqueles obtidos para os anéis compactados e magnetizados em sentido axial, conforme tabela a seguir:

Tabela 38 - Comparação de remanência e coercividade entre anéis e discos compactados.

Amostra		Indução remanente (T)	Coercividade (kA/m)		
Anéis	1	0,677	0,685	668,5	683,9
	2	0,717		660,0	
	3	0,667		688,5	
	4	0,679		718,7	
Discos	1	0,682	0,675	694,8	698,3
	2	0,667		701,8	

Esta comparação não permite avaliar a uniformidade do processo de compactação em forma de anéis, mas mostra que a coercividade das amostras é afetada pelo mesmo. Obviamente, estes resultados não sofrem influência do magnetizador radial, pois estes anéis foram magnetizados em sentido axial para sua avaliação em histeresígrafo. Para incluir a influência do magnetizador radial, foram

confeccionados anéis a partir de discos idênticos a esses, que foram magnetizados radialmente. A Tabela 39 mostra os resultados obtidos para o perfil magnético dos anéis obtidos a partir do disco em relação à média dos anéis considerados referência (amostras 02, 04 e 05).

Tabela 39 - Comparação de remanência e coercividade entre anéis e discos compactados.

Compactação	Indução resultante média (Gauss)			Somatório (quilogauss)	Força eletromotriz (V)
	X	Y	M		
Disco	1,7	-6,4	6,6	726,9	7,2
Anéis	-15,0	0,7	15,1	652,2	6,8

A média dos valores de indução resultante de desbalanceamento encontrado para os anéis feitos a partir do disco foi significativamente menor que a média dos anéis considerados como referência. Assim, é possível que a compactação tenha influência sobre a uniformidade do campo magnético superficial gerado pelos anéis.

Conclusões

Este trabalho abordou a validação e aplicação de um método de análise de indução magnética superficial de ímãs em formato de anel com magnetização radial. As principais contribuições foram:

- a) A validação do método de mapeamento magnético superficial de ímãs;
- b) A avaliação quantitativa da não uniformidade de indução magnética superficial de ímãs com magnetização radial;
- c) A determinação das possíveis causas da não-uniformidade do fluxo magnético superficial dos anéis e
- d) A análise da força eletromotriz gerada pelos ímãs e sua comparação com seu perfil magnético.

Também são propostos alguns trabalhos futuros para complementar os resultados obtidos e determinar de forma quantitativa o efeito dos métodos de correção de não-uniformidade nos ímãs.

5.10. Validade do método de mapeamento de fluxo magnético superficial

O mapeamento magnético pode ser utilizado para identificação de não-uniformidade de indução magnética na superfície de ímãs em formato de anel com magnetização radial. Desde pequenas variações até grandes desvios ou mesmo falhas causadas por problemas durante o uso dos ímãs podem ser detectadas (visto que muitas não são perceptíveis à olho nu).

O mapeamento magnético não possui restrições quanto ao tamanho ou intensidade de campo magnético do ímã, bastando apenas a adequação do suporte mecânico e troca, se necessário, da sonda Hall de acordo com a faixa de medição. Tanto o controle do sistema quanto o tratamento de dados para geração dos mapas podem ser empregados para analisar diferentes ímãs, desde que sejam em formato de anel.

Além disso, como já citado, o mapeamento possui diversas vantagens em relação a outras formas de avaliação de propriedades magnéticas (como histeresígrafo e MAV):

- O processo de mapeamento não é destrutivo,
- Peças podem ser medidas antes e depois de serem utilizadas,

- As peças podem ser mapeadas em seu formato final.

5.11. Quanto ao grau de uniformidade dos ímãs.

Através das análises dos mapas magnéticos e do perfil magnético dos ímãs compósitos com magnetização radial testados neste trabalho, pode-se afirmar que os mesmos possuem variações de fluxo magnético superficial de quase 35% em comparação com amostras padrão.

5.12. Quanto às causas da não uniformidade

Os testes realizados em histeresígrafo e MAV mostraram que o material magnético utilizado apresenta características de acordo com as especificações de indução remanente e coercividade indicadas pelo fabricante, além de relativa uniformidade entre estes valores para diferentes peças. Ainda assim, os valores de indução magnética superficial obtidos em simulações numéricas (seção 0) considerando os resultados destes testes são muito superiores aos valores medidos. Isso sugere que o material magnético não apresenta problemas, mas sim as operações posteriores: compactação e magnetização.

A compactação das amostras pode gerar problemas como os seguintes:

- i) A distribuição de material magnético em relação ao componente polimérico pode não ser uniforme devido à mistura deficiente entre estes materiais.
- ii) A compactação pode gerar gradientes de densidade nas amostras, concentrando uma maior quantidade de material magnético em uma região em detrimento de outra.

A partir da comparação entre os valores de indução remanente e coercividade entre os anéis e os discos (seção 5.9), percebe-se pequena redução de coercividade para os anéis. No caso da magnetização, o teste com dois pulsos na mesma amostra (seção 3.1.3) mostra que possivelmente o magnetizador não consegue maximizar as características magnéticas dos anéis com apenas um pulso, pois o somatório do perfil magnético das amostras com dois pulsos é maior.

Assim, é indicada uma análise detalhada do dispositivo magnetizador para verificar a simetria das bobinas e os valores máximos de campo magnético que são obtidos.

5.13. Quanto à relação entre o perfil magnético e a força eletromotriz

A partir dos testes da seção 5.5, pode-se concluir,

- i) Há uma relação muito linear entre a força eletromotriz gerada por amostras com magnetização radial e a área do perfil magnético gerado pelo mapeamento de sua superfície. Prova disso é o valor obtido para R^2 , igual a 0,985.
- ii) Esta relação está limitada a um valor mínimo de força eletromotriz, a partir do qual a relação não é mais linear. É o caso da amostra com 100% de redução de espessura de parede, que está fora da região linear do gráfico.
- iii) Somente devem ser comparadas amostras com magnetização de mesmo tipo. A amostra feita a partir de tijolos com magnetização unidirecional apresentou um valor muito diferente das demais amostras com magnetização radial.

5.14. Sugestões para trabalhos futuros

5.14.1. Avaliação quantitativa do efeito do aquecimento pontual da superfície dos anéis.

Para permitir que sejam feitas correções precisas dos valores de indução magnética superficial, é necessário que seja determinada uma correlação entre tempo e temperatura que deve ser aplicado o aquecedor pontual nas amostras. Além disso, podem ser testadas pontas com áreas diferentes para aumentar ou diminuir a área de aplicação do calor.

5.14.2. Avaliação do gradiente de densidade das amostras.

A avaliação do gradiente de densidade das amostras ou mesmo a simulação numérica desta, através do conhecimento dos parâmetros utilizados na compactação das peças, pode trazer informações importantes para determinação das causas da não uniformidade das

amostras. Além disso, podem ser criadas peças com gradientes propositais para quantificar a influência do mesmo.

5.14.3. Desenvolvimento de um ferramental para simulações que tenha resultados próximos à condição de magnetização e desempenho dos ímãs.

Como a simulação não apresentou resultados de indução magnética superficial semelhantes aos valores medidos, os parâmetros do ímã utilizados na simulação não representam a condição real do anel.

Desta forma, pode-se partir para o caminho reverso: alterar os parâmetros do ímã, principalmente em relação às direções de magnetização, até que os resultados da simulação representem os valores encontrados nas medições

6 Referências bibliográficas

- [1] BEATY, H. W.; KIRTLEY, J. L. Jr. **Electric Motor Handbook**. McGraw-Hill, 1998.
- [2] BOLDEA, I; NASAR, S. **The induction machine handbook**. CRC Press, 2002.
- [3] BUSCHOW, K. H. J.; de BOER, F. R. **Physics of Magnetism and Magnetic Materials**, Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, 2003, p 81.
- [4] COEY, J.M.D. **Rare-Earth Iron Permanent Magnets**. Clarendon Press - Oxford, 1996.
- [5] CULLITY, B. D., **Introduction to Magnetic Materials**, Reading: Addison-Wesley, 1972.
- [6] GIERAS, J. F.; PIECH, Z. J. **Linear Synchronous Motors: Transportation and automation systems**. Florida, CRC Press, 1999.
- [7] GOTTLIEB, I. **Practical Electric Motor Handbook**. Butterworth-Heinemann Elsevier. 1997.
- [8] HOR, P. J.; ZHU, Z. Q.; HOWE, D.; RESS-JONES, J. **A novel tubular linear motor equipped with radially anisotropic NdFeB ring magnets**.
- [9] <http://superconductors.org>. Visitado em 9 de abril de 2009.
- [10] <http://www.femm.info>. Visitado em 10 de junho de 2009.
- [11] JILES, D. **Introduction to Magnetism and magnetic materials**. Chapman & Hall, 1991.
- [12] MAGNETICS BUSINESS & TECHNOLOGY, **High Coercivity**: A Column by Dr. Peter Campbell as published in Summer 2007 - The Next Great Magnet. <http://www.magnetweb.com/Col02.htm> – Acessado em 18.01.10.
- [13] MEEKER, David. **Finite Element Method Magnetics**. [Online]
- [14] MONTGOMERY, D.C., RUNGER, G. C. **Applied Statistics & probability for Engineers**. 3^a Edição. John Wiley & Sons, 2003. Pg 397.
- [15] SADIKU, M. N. **Elements of electromagnetic**. Oxford University Press. 2001.

- [16] SAMPAIO, L. C; GARCIA, F.; CERNICCHIARO, G. R. C; TAKEUCHI, A. Y. **Técnicas de magnetometria**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 22, no. 3, Setembro, 2000.
- [17] STEINGROEVER, E. **Magnetization, demagnetization and calibration of permanent magnet systems**. Magnet-Physik.
- [18] TEIXEIRA, C. S. **Estudo sobre processamentos de homogeneização e nitretação de Sm₂Fe₁₇ em ligas de procedência industrial**. Dissertação de mestrado, Florianópolis, UFSC, 2008.
- [19] ESCHRIG, H. **Theory of Superconductivity, A Primer**. Dresden University of Technology. 2001, pg 6.
- [20] GIESEL, T. **Estudo e projeto de motores de alta velocidade para aplicação em compressores herméticos**. Dissertação de mestrado, Florianópolis, UFSC 2007.
- [21] www.siemens.com. Visitado em 3 de fevereiro de 2009.
- [22] CMS Times, 16 de outubro de 2006. Obtido de http://cms.web.cern.ch/cms/Media/Publications/CMStimes/2006/10_16/index.html. Visitado em 18 de abril de 2009.
- [23] www.ni.com. Visitado em 12 de março de 2009.
- [24] www.honeywell.com. Visitado em 19 de junho de 2009