Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Eloi Benicio de Melo Junior

Susceptômetro de varredura utilizando sensores de efeito Hall para detecção de defeitos em chapas de aço

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo programa de Pós-graduação em Física do Departamento de Física da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Jefferson Ferraz Damasceno Félix Araújo

Rio de Janeiro
Março de 2020

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Pontifícia Universidade Católica
do Rio de Janeiro

Eloi Benicio de Melo Junior

Susceptômetro de varredura utilizando sensores de efeito Hall para detecção de defeitos em chapas de aço

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Física da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo.

Prof. Jefferson Ferraz Damasceno Félix Araújo
Orientador
Departamento de Física - PUC-Rio

Prof. Leonardo Alfredo Forero Mendoza
Departamento de Engenharia Elétrica - UERJ

Prof. Geronimo Perez
INMETRO

Rio de Janeiro, 06 de março de 2020

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Eloi Benicio de Melo Junior

Graduou-se em Licenciatura em Física na Universidade Federal do Acre – UFAC em 2018.

Ficha Catalográfica

Junior, Eloi Benicio de Melo

Susceptômetro de varredura utilizando sensores de efeito Hall para detecção de defeitos em chapas de aço / Eloi Benicio de Melo Junior; orientador: Jefferson Ferraz Damasceno Félix Araújo. –2020.
130 f.: il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física, 2020.
Inclui referências bibliográficas.

1. Física – Dissertações. 2. Instrumentação. 3. Susceptômetros. 4. Aço SAE 1020 I. Araújo, Jefferson. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus pelo dom da vida e aos meus pais, irmão (Edwardy), primo (Kennon) e tia (Dinha) por todo apoio desde o sonho dessa jornada e por todo amor e abraços sempre que foi preciso.

Agradeço ao meu orientador Jefferson Ferraz por ter acreditado em mim desde o início, por sua amizade, por todos os conselhos acadêmicos e pessoais, por todo seu amor à ciência e ao Departamento de Física da PUC-Rio, enfim, por ter contribuído na minha formação profissional e pessoal de forma ímpar.

À minha namorada Gabriela Oliveira por partilhar a vida e sonhos comigo, por me apoiar desde o início, por toda a força e por acreditar sempre que posso e podemos, por compreender meu tempo sempre curto e me ajudar nos momentos complicados.

Aos professores da PUC-Rio Thiago Guerreiro, Marcelo Eduardo, Isabel Carvalho e Carla Göbel pelas oportunidades, conselhos, por acreditarem na minha capacidade e no meu desenvolvimento acadêmico. Ao professor Antonio Carlos por abrir as portas do laboratório de instrumentação. Aos professores da UFAC Marcelo Castanheira e Romero Pinheiro que me auxiliaram e me incentivaram no início dessa jornada.

Ao Fredy Gutiérrez por todo auxílio, bom trabalho, dedicação e por sua parceria.

Ao João da oficina mecânica por seus valorosos trabalhos.

Aos meus e minhas colegas, em especial, Amanda Santos, Daniel Rabaça, Fred Osório, Fernanda, Luciano, Christian Medina, Aline Magalhães, Gleice Germano, Hugo, Byron, Alexandre e João.

Aos meus amigos e minhas amigas que longe ou perto me apoiaram com uma piada, abraços ou palavra de incentivo, em especial, Paulo, Alesson, Everton, Kennon e Edwardy (os traíras), Débora, Bruna Zaire, Bruna Lima, Thalita, Krisla, Netão, Diego e Cleson (EDPJ), à Beatriz Bernardino e ao grande Eduardo parceiro de almoço e boas conversas.

À Giza por todo seu cuidado, carinho e atenção, à Marcia e Laís por toda sua presteza e simpatia e ao grande Julinho pelo café, simpatia e simplicidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e CNPq.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Resumo

Junior, Eloi Benicio de Melo; Araújo, Jefferson Ferraz Damasceno Felix. **Susceptômetro de varredura utilizando sensores de efeito Hall para detecção de defeitos em chapas de aço.** Rio de Janeiro, 2020. 130p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Instrumentos de varredura magnética em estruturas, componentes e materiais têm sido objeto de pesquisa científica e são potenciais protótipos para uso na indústria, sobretudo em inspeção não destrutiva, para identificar defeitos em estruturas metálicas sujeitas a condições extremas como altas temperaturas, pressão e forte tensão. Essas condições podem levar à falhas dessas estruturas comprometendo sua operação, acarretando prejuízos e possíveis acidentes. Nesse sentido, construímos um instrumento para varredura da resposta magnética em placas de aço com defeitos utilizando dois sistemas de medição. No primeiro sistema utilizamos um equipamento comercial: Gaussímetro da marca F.W. BELL (modelo 9950), com três sensores de efeito Hall perpendiculares entre si. No segundo, um gradiômetro construído no Laboratório de Instrumentação do Departamento de Física da PUC-Rio composto de dois sensores de efeito Hall da marca Melexis (modelo 90215). Para a varredura de ambos os sistemas de medição foram utilizados dois atuadores lineares da marca Zaber (modelo T-LLS260C). Com o instrumento construído foi possível identificar defeitos manufaturados por eletroerosão em placas de aço SAE 1020. O segundo sistema de medição se mostrou mais eficiente em detectar defeitos com diâmetros da ordem de 0,90 mm e 10 μm de profundidade. Também construímos um sistema de filtros em uma placa de circuito impresso para atenuar o ruído presente. A partir da análise de sinal-ruído notou-se que o circuito foi eficaz e permitiu uma melhor identificação dos defeitos. Para reforçar a aplicação desse equipamento na pesquisa científica e na indústria, desenvolvemos uma rotina em MATLAB para estimar a profundidade dos defeitos e obtivemos resultados com erro de 3,54%.

Palavras-chave

Sistema gradiométrico; sensor Hall; aço SAE 1020; materiais magnéticos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Abstract

Junior, Eloi Benicio de Melo; Araújo, Jefferson Ferraz Damasceno Felix (Advisor). **Scanning susceptometer using Hall effect sensors to detect defects in steel sheets**. Rio de Janeiro, 2020. 130p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Magnetic scanning instruments in structures, components, and materials have been the object of scientific research and are potential prototypes to be used in the industry, especially in non-destructive inspection to identify defects in metal structures subject to extreme conditions, such as high temperatures, pressure, and high tension. These conditions may lead to the failure of these structures, affecting their operation and resulting in losses and possible accidents. In this sense, we developed an instrument for scanning the magnetic response in defective steel plates using two measurement systems. In the first system, we used commercial equipment: Gaussmeter (F.W.BELL, model 9950), with three Hall-effect sensors perpendicular to each other, and in the second one, a gradiometer, composed of two Hall-effect sensors (Melexis, model 90215), developed at the Instrumentation Laboratory of the Physics Department of the PUC-Rio. For scanning both measurement systems, two linear actuators (Zaber, model T-LLS260C) were used. The instrument allows us to identify defects caused by electrical discharge machining on SAE 1020 steel plates. The second measurement system proved to be more efficient in detecting defects with diameters in the order of 0.90 mm and 10 μm in depth. A filter system was also built on a printed circuit board to attenuate noise. The signal-noise analysis showed that the circuit was effective and made possible a better identification of the defects. To reinforce the application of this instrument in scientific research and industry, a routine in MATLAB was developed to estimate the depth of the defects, resulting in an error of 3.54%.

Keywords

Gradiometric system; Hall sensor; SAE 1020 steel; magnetic materials.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Sumário

1 Introdução 19
1.1. Microscópio Magnético de Varredura e Susceptômetro 21
1.2. Materiais magnéticos (moles e duros) 22
1.3. Aço e eletro erosão 23

2 Objetivo 26

3 Equipamento 27
3.1. Microscópio Magnético de Varredura 27
3.2. Sensores 28
3.2.1. Sensor GMR 29
3.2.2. Sensor TMR ou STJ 30
3.2.3. Sensor SQUID 30
3.2.4. Sensor Hall 31
3.3. Sistema de leitura de campo magnético 31
3.3.1. Gaussímetro marca F. W. Bell modelo 9950 32
3.3.2. Sensor Melexis e Sistema Gradiométrico 34
3.4. Ímã de Geometria Anel 38
3.5. Sistema de posicionamento 41
3.6. Montagem 42
3.6.1 Montagem do equipamento de varredura utilizando um Gaussímetro comercial F.W. BELL 9950 42
3.6.2 Montagem do equipamento de varredura utilizando o sistema gradiométrico 45
3.7. Procedimento de medida 48
3.7.1 Medida com o Gaussímetro 9950 48
3.7.2 Medida com o Gradiômetro 52

4 Resultados e Discussões 58
4.1. Placas de aço SAE 1020 58

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4.2. Uniformidade de magnetização das placas 63
4.3. Mapas magnéticos 67
4.3.1. Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com um defeito 67
4.3.2. Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com dois defeito 70
4.3.3. Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com um defeito aleatório e nove defeitos 74
4.4. Relação sinal-ruído 76
4.3.1. Medidas magnéticas com a placa de circuito 78

5 Modelo Teórico 88
5.1. Modelo de um prisma retangular 88
5.2. Simulação 90
5.3. Processo de estimar a profundidade dos defeitos 96
5.3.1. Placa E3 99
5.3.2. Placa D5 100
5.3.3. Placa E4 101

6 Conclusão 104

7 Referências bibliográficas 105

7 Apêndice 110

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Lista de Figuras

FIGURA 3.1: DESENHO ESQUEMÁTICO DO EFEITO HALL 31

FIGURA 3.2: GAUSSÍMETRO F.W. BELL 9950 33

FIGURA 3.3: ESQUEMA DE PROBE TRI-AXIAL COM INDICAÇÃO DE LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES (RETIRADO DE MANUAL F.W. BELL) 33

FIGURA 3.4: PLACA PROGRAMADORA MELEXIS PTC-01 35

FIGURA 3.5: CARACTERÍSTICAS DO SENSOR MLX 90215 (RETIRADO DE MANUAL MELEXIS). 36

FIGURA 3.6: ESQUEMA DE MONTAGEM DO SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 36

FIGURA 3.7: (A) ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA GRADIOMÉTRICO NA (A) PRIMEIRA SITUAÇÃO, (B) SEGUNDA SITUAÇÃO. 38

FIGURA 3.8:(A) ÍMÃ ACOPLADO NA BASE CIRCULAR DE ACRÍLICO. (B) PROBE DO GAUSSÍMETRO F.W. BELL 9950 ATRAVESSANDO A ABERTURA DA BASE CIRCULAR. 39

FIGURA 3.9: MAPA MAGNÉTICO DA PLACA D5 DE AÇO SAE 1020. 40

FIGURA 3.10: (A) SUPORTE CILÍNDRICO PARA O GRADIÔMETRO E O ÍMÃ NA SUA BASE. (B) BASE DO ÍMÃ E GRADIÔMETRO POSICIONADOS NO SUPORTE CILÍNDRICO. 41

FIGURA 3.11: (A) POSICIONADOR DA MARCA ZABER MODELO T-LLS260C. (B) POSICIONADOR DA MARCA ZABER MODELO T-LA60A (RETIRADO DE MANUAL ZABER MODELO TLL). 41

FIGURA 3.12: (A) VISTA FRONTAL DA ESTRUTURA DO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO E DO GAUSSÍMETRO F.W. BELL 9950. (B) DETALHE DA PROBE E DO ÍMÃ. 43

FIGURA 3.13: DIAGRAMA DE BLOCO DO EQUIPAMENTO CONSTRUÍDO. 44

FIGURA 3.14: PAINEL PRINCIPAL DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O SISTEMA COM O GAUSSÍMETRO F.W. BELL 9950. 45

FIGURA 3.15: (A) EQUIPAMENTO DE VARREDURA MONTADO NO LABORATÓRIO. (B) DETALHE DA ESTRUTURA ONDE SÃO REALIZADAS AS MEDIDAS DE VARREDURA. 46

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

FIGURA 3.16: DIAGRAMA DE BLOCOS DO EQUIPAMENTO DE VARREDURA UTILIZANDO O SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 46
FIGURA 3.17: PAINEL PRINCIPAL DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 48
FIGURA 3.18: SUPORTE DE ACRÍLICO ONDE AS PLACAS SÃO FIXADAS. 49
FIGURA 3.19: PLACA D5 DE AÇO SAE 1020. 49
FIGURA 3.20: MAPA MAGNÉTICO DA PLACA D5 COMPLETA E DEFEITO. 50
FIGURA 3.21: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA D5. 50
FIGURA 3.22: DISPOSITIVO DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ) E CABO BNC NO PROCEDIMENTO DE MEDIDA COM O GAUSSÍMETRO F.W. BELL 9950. 51
FIGURA 3.23: (A), (B) DIAGRAMA DO PROGRAMA EM LABVIEW RESPONSÁVEL PELO COMANDO DESLOCAMENTO DOS POSICIONADORES ZABER MODELO T-LLS260C NO ESPAÇO X E Y. (C) DIAGRAMA DO PROGRAMA EM LABVIEW RESPONSÁVEL PELO COMANDO DE DESLOCAMENTO DO POSICIONADOR ZABER MODELO T-LA60A. 52
FIGURA 3.24: DIAGRAMA DO PROGRAMA EM LABVIEW RESPONSÁVEL PELO ARQUIVAMENTO DOS DADOS DO SENSOR. 52
FIGURA 3.25: SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ) E CABOS BNC CONECTADOS AOS CANAIS 06 E 07, REFERENTES AOS SENSORES S1 E S2 RESPECTIVAMENTE. 53
FIGURA 3.26: DIAGRAMA DO LABVIEW REFERENTE A AQUISIÇÃO DE DADOS SUBTRAÇÃO DOS SENSORES S1 E S2. 54
FIGURA 3.27: TERMINAL DE ALIMENTAÇÃO DO DAQ COM CONDENSADOR AGREGADO. 54
FIGURA 3.28: PLACA DE CIRCUITO CONSTRUÍDA NO LABORATÓRIO 55
FIGURA 3.29: (A) PLACA DE CIRCUITO COM IDENTIFICAÇÃO DA ALIMENTAÇÃO DA PLACA E DOS SENSORES GRADIOMÉTRICOS, (B) CIRCUITO DA PLACA. 56
FIGURA 3.30: (A), (B) DIAGRAMA DAS ROTINAS QUE CONTROLAM A MOVIMENTAÇÃO DOS POSICIONADORES ZABER T-LLS260C. (C) DIAGRAMA DAS ROTINAS QUE CONTROLAM A MOVIMENTAÇÃO DOS POSICIONADORES ZABER T-LA60A. 56
FIGURA 3.31: (A) DIAGRAMA DA ROTINA EM LABVIEW QUE SALVA OS DADOS DA SUBTRAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PELOS SENSORES. (B)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

DIAGRAMA DA ROTINA LABVIEW QUE SALVA OS DADOS PUROS, SEM A SUBTRAÇÃO, DOS VALORES DE SAÍDA DOS SENSORES. 57
FIGURA 4.1: PRIMEIRO GRUPO DE PLACAS, ONDE P É A PROFUNDIDADE DOS DEFEITOS, (A) PLACA E3, (B) PLACA E4, (C) PLACA D5. 59
FIGURA 4.2: SEGUNDO GRUPO DE PLACAS, ONDE P É A PROFUNDIDADE DOS DEFEITOS, (A) PLACA M1, (B) PLACA E1, (C) PLACA E2. 60
FIGURA 4.3: TERCEIRO GRUPO DE PLACAS, ONDE P É A PROFUNDIDADE DO DEFEITO, (A) PLACA J1, (B) PLACA B1. 61
FIGURA 4.4: PLACA J1 COM IDENTIFICAÇÃO DE PONTOS DE MEDIDA DE PROFUNDIDADE. 62
FIGURA 4.5: PLACA B1 COM IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS. 63
FIGURA 4.6: MAPA COMPLETO DA PLACA D5 OBTIDO ATRAVÉS DO PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA. 64
FIGURA 4.7: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA D5 OBTIDO COM F.W. BELL 9950. 65
FIGURA 4.8: MAPA MAGNÉTICO DA PLACA D5 OBTIDO ATRAVÉS DO SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA. 65
FIGURA 4.9: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA D5 OBTIDO ATRAVÉS DO SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA. 66
FIGURA 4.10: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA E3 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO) 67
FIGURA 4.11: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA D5 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO) 68
FIGURA 4.12: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA E4 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO) 69
FIGURA 4.13:MAPA MAGNÉTICO DOS DEFEITOS DA PLACA M1 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO) 70
FIGURA 4.14: DESTAQUE DOS DEFEITOS DA PLACA M1 IDENTIFICADOS PELO GRADIÔMETRO. 71

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

FIGURA 4.15:MAPA MAGNÉTICO DOS DEFEITOS DA PLACA E1 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO) 71
FIGURA 4.16: MAPA MAGNÉTICO DOS DEFEITOS DA PLACA E1 COM IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS, OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO). 72
FIGURA 4.17: MAPA MAGNÉTICO DOS DEFEITOS DA PLACA E2 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO). 72
FIGURA 4.18: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA E2 COM IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS, OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO). 73
FIGURA 4.19: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO ALEATÓRIO DA PLACA J1 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO). 74
FIGURA 4.20: MAPA MAGNÉTICO DO DEFEITO DA PLACA B1 OBTIDO A PARTIR DO (A) PRIMEIRO SISTEMA DE MEDIDA (F.W. BELL 9950) E (B) SEGUNDO SISTEMA DE MEDIDA (GRADIÔMETRO). 75
FIGURA 4.21: DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCEDIMENTO DE MEDIDA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO PARA O GRADIÔMETRO SEM PLACA DE CIRCUITO E O F.W. BELL. 77
FIGURA 4.22: DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCEDIMENTO DE MEDIDA DA RELAÇÃO SINAL-RUÍDO PARA O GRADIÔMETRO COM A PLACA DE CIRCUITO. 77
FIGURA 4.23: ESPECTROS DE SINAL-RUÍDO DO GRADIÔMETRO COM E SEM A PLACA E DO EQUIPAMENTO COMERCIAL F.W. BELL MODELO 9950. 78
FIGURA 4.24: MAPAS MAGNÉTICOS DA PLACA E3 OBTIDOS A PARTIR DE (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 79
FIGURA 4.25: MAPAS MAGNÉTICOS DA PLACA E3 OBTIDOS A PARTIR DE (A) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO E (B) F.W. BELL 9950. 80
FIGURA 4.26: MAPAS MAGNÉTICOS DO DEFEITO DA PLACA E1 OBTIDOS COM (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 80

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

FIGURA 4.27: MAPA MAGNÉTICO COM IDENTIFICAÇÃO DOS DEFEITOS DA PLACA E1 81
FIGURA 4.28: MAPAS MAGNÉTICOS DOS DEFEITOS DA PLACA E1 OBTIDOS COM (A) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO E (B) F.W. BELL 9950. 81
FIGURA 4.29: MAPAS MAGNÉTICOS DOS DEFEITOS DA PLACA M1 OBTIDOS A PARTIR DE (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 82
FIGURA 4.30: MAPA MAGNÉTICO DOS DEFEITOS DA PLACA B1 OBTIDOS COM (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO 83
FIGURA 4.31: MAPAS MAGNÉTICOS DA PLACA B1 OBTIDOS A PARTIR DO (A) F.W. BELL 9950, (B) GRADIÔMETRO E (C) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 84
FIGURA 4.32: MAPAS MAGNÉTICOS DO DEFEITO DA PLACA J1 OBTIDOS COM (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 84
FIGURA 4.33: MAPA MAGNÉTICO DA PLACA J1 COM IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS DE MEDIDA DE PROFUNDIDADE. 85
FIGURA 4.34: PORTA AMOSTRA E ESFERA DE NÍQUEL 86
FIGURA 4.35: MAPAS MAGNÉTICOS DA ESFERA DE NÍQUEL OBTIDOS A PARTIR DE (A) GRADIÔMETRO E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 86
FIGURA 4.36: MAPAS MAGNÉTICOS DA ESFERA DE NÍQUEL OBTIDOS A PARTIR DO (A) F.W. BELL 9950 E (B) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 87
FIGURA 5.1: ESQUEMA UTILIZADO PARA CALCULAR O CAMPO MAGNÉTICO DE UM ÍMÃ DE GEOMETRIA DE PRISMA RETANGULAR (CAMACHO; SOSA 2013) 18
FIGURA 5.2: DIAGRAMA DE BLOCOS DAS ETAPAS EFETUADAS DURANTE A SIMULAÇÃO. 90
FIGURA 5.3: ESQUEMA DA PLACA COM AS DIVISÕES. 91
FIGURA 5.4: VISTA FRONTAL DA PLACA E DO DEFEITO. 92
FIGURA 5.5: CURVATURA OBTIDA APÓS A RESOLUÇÃO DA EQ. 22. 93
FIGURA 5.6: (A) SIMULAÇÃO DA PLACA D5. (B) MEDIDA EXPERIMENTAL REALIZADA PELO SISTEMA GRADIOMÉTRICO DA PLACA D5. 94
FIGURA 5.7: SIMULAÇÃO DA PLACA (A) D5, (B) E1, (C) E2, (D) E3, (E) E4. 95
FIGURA 5.8: DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO REALIZADO PELA ROTINA EM MATLAB PARA ESTIMAR A PROFUNDIDADE DOS DEFEITOS DAS PLACAS. 96

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

FIGURA 5.9: (A) EXEMPLO DE UM PLOT DOS DADOS EXPERIMENTAIS E CORRIGIDOS E (B) RECORTE DE UMA REGIÃO DO GRÁFICO. 97
FIGURA 5.10: (A) PLOT DO MAPA EXPERIMENTAL, (B) PLOT DA CURVA NORMALIZADA DO MAPA EXPERIMENTAL, (C) PLOT DO MAPA SIMULADO, (D) PLOT DA CURVA NORMALIZADO DO MAPA SIMULADO. 98
FIGURA 5.11: PLACA E3 CURVA TEÓRICO E EXPERIMENTAL (A) (F. W. BELL 9950), (B) GRADIÔMETRO, (C) GRADIÔMETRO E PLACA DE CIRCUITO. 99
FIGURA 5.12: PLACA D5 (A) CURVA TEÓRICO E EXPERIMENTAL (F. W. BELL 9950), (B)CURVA TEÓRICO E EXPERIMENTAL (GRADIÔMETRO). 100
FIGURA 5.13: PLACA E4 (A) CURVA TEÓRICO E EXPERIMENTAL (F. W. BELL 9950), (B)CURVA TEÓRICO E EXPERIMENTAL (GRADIÔMETRO). 101
FIGURA 7.1: ROTINA EM LABVIEW PARA RESETAR OS POSICIONADORES NO SISTEMA COM O F.W. BELL 9950. 122
FIGURA 7.2: ROTINA QUE SALVA OS DADOS DA LEITURA MAGNÉTICA COM O F.W. BELL 9950. 122
FIGURA 7.3: ROTINA PARA POSICIONAR O ATUADOR ZABER T-LLS260C NO SISTEMA COM O F.W. BELL 9950. 122
FIGURA 7.4: PAINEL PRINCIPAL DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O F.W. BELL 9950. 123
FIGURA 7.5: VISÃO GERAL DO DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O F.W. BELL 9950. 123
FIGURA 7.6: ROTINA EM LABVIEW PARA RESETAR OS POSICIONADORES NO SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 123
FIGURA 7.7: ROTINA QUE SALVA OS DADOS DA LEITURA MAGNÉTICA PARA O SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 123
FIGURA 7.8: ROTINA EM LABVIEW PARA ZERAR OS SENSORES DO GRADIÔMETRO. 123
FIGURA 7.9: ROTINA PARA POSICIONAR O ATUADOR ZABER T-LLS260C NO SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 123
FIGURA 7.10: ROTINA DE ESPERA ENTRE TIRADA DE AMOSTRAS DO SISTEMA GRADIOMÉTRICO. 123

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

FIGURA 7.11: PAINEL PRINCIPAL DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O GRADIÔMETRO. 123
FIGURA 7.12: VISÃO GERAL DO DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROGRAMA EM LABVIEW PARA O GRADIÔMETRO. 123

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Sensores utilizados em MMV com as respectivas sensibilidades e dimensões. (Michelena; DataSheet Micro Magnetics sensor STJ 201; Noguchi, et al, 2017; DataSheet Melexis sensor 90215) 29

Tabela 3.2: Especificações do Gaussímetro F.W. Bell 9950 (manual gaussímetro F.W. Bell 9950). 33

Tabela 3.3: Principais especificações do sensor melexis MLX 90215. (manual melexis 90215). 34

Tabela 3.4: Principais especificações do sensor melexis MLX 90215 utilizado neste trabalho. (manual melexis 90215). 35

Tabela 3.5: Especificações dos posicionadores da marca Zaber modelos T-LSS260C e T-LA60A. (manual Zaber modelo TLL). 42

Tabela 4.1: Placas e profundidade do primeiro grupo. 61

Tabela 4.2: Placas e profundidade do segundo grupo. 62

Tabela 4.3: Placas e profundidade do terceiro grupo. 63

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada utilizados na simulação. 91

Tabela 5.2: Desvio padrão (Σ) da medida experimental da profundidade dos defeitos das placas do primeiro grupo. 102

Tabela 5.3: Desvio padrão (Σ) da estimativa de profundidade dos defeitos a partir da rotina em MATLAB. 103

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Rápido ou lento todo progresso é um progresso

Autor desconhecido

1
Introdução

O início do magnetismo e utilização de materiais magnéticos tem sua origem, relatada na literatura, há mais de 3500 anos na região conhecida como Ásia menor, em pedras que hoje são conhecidas como magnetitas (Fe_3O_4). Também consta na literatura, que as primeiras bússolas podem ter sido manufaturadas na China antiga por volta do ano 1088 no século XI, esses materiais apresentavam inicialmente uma forma de colher. No século seguinte a bússola foi reinventada na Europa o que permitiu a expansão da navegação e a descoberta da América por Cristóvão Colombo em 1492. No ano de 1600 (séc. XVI), foi publicado o primeiro trabalho científico sobre magnetismo, o livro On the magnet do físico inglês William Gilbert, no seu trabalho conseguiu apresentar uma boa ideia do campo magnético da Terra, realizando experimentos com magnetitas e ímãs de ferro (Sinnecker, 2000; Coey, 2009).

Alguns termos magnéticos e suas respectivas unidades no Sistema Internacional (SI) são relevantes para serem apresentadas, antes disso, faremos uma breve descrição desses termos.

A indução magnética ou densidade de fluxo magnético **B** é a resposta magnética de um material quando exposto a um campo externo **H**, os momentos atômicos individuais contribuem para a resposta magnética do material a esse campo. A densidade de fluxo magnético **B** é dado pela eq. 1 (Araujo, 2009; Griffiths, 1999).

$$\boldsymbol{B} = \mu_0(\boldsymbol{H} + \boldsymbol{M}) \tag{1}$$

Onde μ_0 é a permeabilidade magnética no vácuo e **M** a magnetização. A magnetização **M** é a somatória de todos os momentos magnéticos elementares do material por unidade de volume (eq. 2), logo um material está magnetizado quando o campo **H** é aplicado e há um alinhamento desses momentos (Jiles, 1991; Araújo, 2009).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

$$\boldsymbol{M} = \sum_{i}^{n} \frac{m_i}{V} \tag{2}$$

Onde n é o número total de momentos magnéticos, m o momento magnético e V volume (Nussenzveig, 1997). Além da magnetização por volume, é possível obter a magnetização por massa (eq. 3) de um material como é feito em trabalhos científicos (Soudabeh, et al, 2019; Araújo, et al, 2019).

$$\sigma = \frac{nm}{m_a} \tag{3}$$

Onde m_a é a massa e σ a magnetização por massa.

A susceptibilidade magnética χ (eq. 4) relaciona a resposta magnética de um material à um campo aplicado considerando a magnetização (Araujo, 2009). Essa propriedade é comumente utilizada para definir os materiais diamagnéticos e paramagnéticos, para definir os materiais paramagnéticos a permeabilidade magnética μ (eq. 5) é mais comumente utilizada, essa propriedade relaciona o campo magnético aplicado e a indução magnética (Jiles, 1991; Faria e Lima, 2005).

$$\chi = \frac{M}{H} \tag{4}$$

$$\mu = \frac{B}{H} \tag{5}$$

A tabela 1.1 apresenta esses termos magnéticos e suas respectivas unidades de medida, sendo T= Tesla, A=Ampères, m=metro, Kg= Quilograma e H=Henry.

Termos Magnéticos	**Símbolo**	**Unidades (SI)**
Indução magnética ou densidade de fluxo magnético	**B**	T
Campo Magnético	**H**	$A.m^{-1}$
Magnetização	**M**	$A.m^{-1}$
Susceptibilidade Magnética	χ	$A.m^2.Kg^{-1}$
Momento Magnético	m	$A.m^2$
Permeabilidade Magnética no vácuo	μ_0	$H.m^{-1}$
Permeabilidade Magnética no material	μ	$H.m^{-1}$

Tabela 1.1: Termos magnéticos, símbolos e unidades de medida. Adaptado de (Araujo, 2009).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

1.1.
Microscópio Magnético de Varredura e Susceptômetro

Fato, que após o trabalho de William Gilbert, o estudo científico acerca do magnetismo seguiu, assim como a utilização de materiais magnéticos. A lei de indução magnética descoberta por Michael Faraday em 1831 é um exemplo da sequência desse estudo, como consequência dessa e outras descobertas, instrumentos foram desenvolvidos com objetivos que vão desde a caracterização magnética de materiais até o uso bélico, como o magnetômetro fluxgate, utilizado na pesquisa científica nas áreas de geofísica, petróleo, imunoensaios, medidas do campo geomagnético e biologia. Esse instrumento também foi utilizado durante a Segunda Guerra Mundial (1940-1945) acoplado a aviões para a detecção de submarinos (Takeuchi, 2010; Heimfarth, 2014; Ludwig, et al, 2005).

Equipamentos voltados para medidas magnéticas exercem um importante papel na ciência, como: caracterização de nanopartículas magnéticas utilizadas em ensaios imunológicos (Araujo, 2009; Chemla, et al, 2010), detecção de corrosão em aços utilizados na indústria (Arenas, et al, 2019; Pereira, et al, 2017; Pacheco e Bruno, 2013), paleomagnetismo (Kletetschka, 2012; Reis, et al, 2016; Araujo, 2019), biofísica (Chieh, 2018), entre outros.

O Microscópio Magnético de Varredura tem se destacado frente a outros equipamentos como SQUID (superconducting quantum interference device) devido sua versatilidade e baixo custo. Esses microscópios podem realizar medidas à temperatura ambiente e são excelentes em medidas para recuperar as informações sobre os campos magnéticos de rochas terrestres ou extraterrestes. Além disso, as versões mais recentes desses equipamentos (Araujo, et al, 2019; Araujo, et al, 2020) são capazes de realizar uma varredura em escala milimétrica com uma resolução micrométrica, o que facilita a identificação de diferentes compostos presentes em alguns tipos de rochas como de brecha (do inglês breccia rock), dobra geológica (do inglês folded rocks) e rochas sedimentares. Devido ao sistema de leitura e alta sensibilidade desses equipamentos é possível caracterizar micro e nanopartículas magnéticas, assim como materiais bulk (vidro, quartzo, acrílico). Dessa forma, os microscópios magnéticos de varredura abrangem diversas áreas de pesquisa sendo versátil na pesquisa científica na fronteira da ciência (Araujo, et al, 2019; Araujo, et al, 2020; Pereira, et al, 2017).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Além dos Microscópios magnéticos de varredura, os susceptômetros são instrumentos importantes na caracterização de diversos materiais. Este instrumento, de uma maneira geral, aplica campo magnético e detecta a resposta magnética da amostra. Susceptômetros são utilizados para detectar corrosão e caracterizar amostras de aços (Pereira, et al, 2017), nanopartículas magnéticas (Antunes, 2016), entre outras. Nesse trabalho, seguindo o princípio de operação de um susceptômetro, utilizamos um ímã permanente de geometria anel para aplicar um campo de até 0,3 T e um gradiômetro com dois sensores de efeito Hall para detectar a resposta magnética da amostra.

1.2. Materiais magnéticos (moles e duros)

Materiais magnéticos podem ser classificados segundo o campo coercivo (campo necessário para desmagnetizar um material) em moles e duros.

Os materiais moles têm como características uma alta permeabilidade magnética e consequentemente uma baixa coercividade, em geral são fáceis de magnetizar e de desmagnetizar. Esses materiais podem ser utilizados para blindagem magnética, núcleo de motores, geradores e transformadores (Cullity; Grahan, 2009).

Os materiais duros, ao contrário, são difíceis de magnetizar e desmagnetizar e são utilizados na fabricação de ímãs permanentes. Nesse caso esses materiais devem ter alta coercividade, alta remanência e alto campo de saturação, pois após a magnetização o ímã permanente deve ter uma grande resistência à ação desmagnetizante de campos magnéticos dispersos (Cullity; Grahan, 2009).

Os ímãs permanentes têm diversas aplicações na indústria, pesquisa científica e tecnologia. Por exemplo, o uso em automóveis (limpadores de para brisa e ajustadores de bancos e janelas) e dispositivos de posicionamento em impressoras, entre outros. Para diversas aplicações eles podem ser a melhor escolha, pois podem reduzir custos uma vez que fornecem campo magnético constante sem a necessidade de gasto contínuo com energia elétrica e sem geração de calor (Cullity; Grahan, 2009; Guimarães, 2009). Por essa razão, optamos nesse trabalho em utilizar um ímã permanente, porque além deste fornecer um campo estável no tempo, também contribui para o equipamento ser de baixo custo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

1.3.
Aço e eletro erosão

Ligas metálicas são substâncias composta por dois ou mais elementos, sendo pelo menos um desses metal. Essas ligas podem ser ferrosas ou não ferrosas, sendo que a primeira tem como principal constituinte o ferro, enquanto as não ferrosas não são baseadas no ferro (Callister, 2013).

Ligas ferrosas são importantes na engenharia porque tem grande uso em materiais de construção, essas ligas são produzidas em larga escala devido os compostos contendo ferro existirem em abundância na crosta terrestre, o ferro metálico e ligas de aço podem ser produzidos com técnicas relativamente simples e baratas e são versáteis do ponto de vista que podem ser fabricadas com ampla variedade de características físicas. A desvantagem principal dessas ligas é sua facilidade de corrosão (Callister, 2013).

Aços são ligas de ferro-carbono que podem conter concentrações consideradas de outros elementos de liga. O teor de carbono está ligado as propriedades mecânicas dessas ligas, que em geral é menor que 1,0% (Callister, 2013).

Parte dos aços mais comuns são classificados a partir da concentração de carbono e podem ser: baixo, médio ou alto teor de carbono. Além dessa classificação os aços têm subclasses que levam em conta as concentrações e demais elementos de liga. A primeira é aços-carbono comuns com apenas concentrações residuais de impurezas, além do carbono e uma pequena fração de manganês. A outra subclasse é aços-ligas que outros elementos de liga são adicionados propositalmente em concentrações específicas. Na sequência focaremos somente nos aços com baixo teor de carbono porque as placas de aço utilizadas nesse trabalho são SAE 1020 e a especificação dessas placas está relacionada com sua porcentagem de composição máxima de carbono, como mostrado na tabela 1.2 (Callister, 2013).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

	Composição (%)		
Especificação (SAE)	C	Mn	Outros
1010	0,10	0,45	---
1020	0,20	0,45	---
A36	0,29	1,0	0,20 Cu (mín.)
A516 Classe 70	0,31	1,0	0,25 Si

Tabela 1.2: Composições de aços-carbono com baixo teor de carbono (Retirada de Callister, 2013).

A especificação adotada foi da Sociedade de Engenheiros Automotivos (do inglês Society of Automotive Engineers – SAE).

Aços com baixo teor de carbono são produzidos em maior quantidade devido seu baixo custo de produção, excelente capacidade de deformar plasticamente sem fraturar e permitir um considerável grau de deformação antes de fraturar, além disso são usináveis e soldáveis. Devido a isso, suas principais aplicações são: componentes de carcaças de automóveis, vigas, caneletas, cantoneiras e chapas utilizadas em tubulações, edificações e pontes (Callister, 2013).

As placas utilizadas nesse trabalho contêm defeitos manufaturados por eletro erosão que tem duas operações básicas possíveis, a primeira, eletro erosão por penetração e a segunda eletro erosão a fio, discutiremos brevemente somente a primeira pois os defeitos das placas utilizadas nesse trabalho foram manufaturados por esta. Esse processo de usinagem consiste de um eletrodo (ferramenta) que pode ser constituído de cobre ou grafite com uma forma que se deseja transmitir à peça, o eletrodo dispara cargas elétricas controladas e a peça em uma região determinada adquire a forma do eletrodo na medida que esse avança na cavidade usinada. Durante esse processo a peça e o eletrodo devem estar imersos ou banhados por um fluído dielétrico, com uma distância do eletrodo à peça da ordem de 10 a 500 μm (Amorim, 2002; Lima e Corrêa, 2006; Arantes, et al., 2003).

O estudo de defeitos, fissuras e corrosão em diferentes estruturas utilizadas na indústria e na engenharia tem sido extensivamente desenvolvido nos últimos anos (Pereira, et al. 2017; Arenas, et al. 2019; Li, et al. 2019; Psuj, 2013). O estudo da superfície e de vida útil desses materiais é essencial para entender o comportamento e surgimento desses defeitos, assim como para evitar danos a natureza, prejuízos e vítimas fatais, para isso os sistemas de medida, sensores e equipamentos têm sido desenvolvidos para estudos acadêmicos e para aplicações

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

na indústria em inspeções dessas estruturas (Tang, et al. 2010; Błażej, et al 2018; Rao, et al 2020; Pacheco; Bruno, 2013). Nesse sentido, este trabalho apresenta um equipamento de baixo custo com relevantes e confiáveis resultados para a pesquisa acadêmica e o coloca como potencial protótipo para uso na indústria e engenharia.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

2
Objetivo

Construir um equipamento magnético de varredura para detecção de defeitos em estruturas utilizadas na indústria e na engenharia sendo um potencial equipamento para inspeção dessas estruturas e estudos para evitar prejuízos e danos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3
Equipamento

Microscópio Magnético de Varredura (MMV) são equipamentos criados há relativamente pouco tempo, com trabalhos na literatura datados no final da década de 1980 e início da década 1990 (Wiesendanger, et al, 1997; Wickramasinghe, 1990; Araujo, et al, 2019; Pastore, et al, 2018; Schnoz, et al, 2019) e tem atuado principalmente na detecção de campos magnéticos remanentes de amostras magnéticas sejam na escala macroscópica, microscópica ou nanoestruturas, analisando desta forma suas propriedades magnéticas através de mapeamento magnético de varredura.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.1.
Microscópio Magnético de Varredura

O Microscópio Magnético de Varredura pode ter seu funcionamento descrito de uma forma geral da seguinte maneira: uma blindagem magnética que envolve o sistema de leitura composta de um ou vários sensores de campo magnético que deve ser montado próximo à amostra para detectar campos magnéticos remanentes que podem ser menores que o campo magnético da Terra ~ 50μT, possuem também posicionadores de precisão que realizam o deslocamento da amostra no espaço X e Y. Na maioria dos casos o sensor é fixo e a amostra que é deslocada em quanto é feito o mapeamento, a resolução da varredura está diretamente relacionado ao diâmetro de sensibilidade do sensor utilizado.

Os componentes básicos de um MMV são:

- Blindagem magnética, quando necessário
- Sensor magnético
- Sistema de deslocamento da amostra
- Sistema de leitura

Os MMV exploram conceitos físicos em sua maioria relacionados a fenômenos magnéticos nas áreas de geologia, aços e sistemas imunológicos e vitro

(Demory, et al, 2019; Pereira, et al, 2017; Carvalho; Bruno, 2011). De uma maneira geral os MMV possuem sistemas de leitura que são baseados em alguma categoria de sensor que converte o campo magnético remanente da amostra em um sinal elétrico de voltagem. Para obter o sinal da amostra é preciso calibrar este equipamento com alguma amostra conhecida. Somente após a calibração é que podemos realizar o mapeamento.

Os MMV podem conter diferentes sensores, com distintas sensibilidades e finalidades, por exemplo: sensores de efeito magnetorresistência como GMR (magnetorresistência gigante) ou TMR (magnetorresistência túnel), sensores de efeito Hall e sensores SQUID (Dispositivo de interferência quântica supercondutora) que sua operação pode ser explicada através do efeito Josephson. Para comparar os MMV é preciso considerar algumas características, por exemplo: a resolução espacial do sensor necessária para detectar com maior ou menor detalhe uma determinada amostra ou região da amostra, as dimensões da amostra e custos de montagem e manutenção do equipamento. A seguir apresentamos os principais sensores utilizados nos MMV.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.2. Sensores

Em geral os microscópios magnéticos podem ser construídos utilizando os seguintes sensores: TMR ou STJ, GMR, SQUID e efeito Hall. Esses sensores como supracitado apresentam diferentes sensibilidades e dimensões, na tabela 3.1 apresentamos alguns exemplos desses sensores com suas respectivas sensibilidades e dimensões.

Sensor	Dimensões (μm)	Sensibilidade (mV/mT)
GMR (Marca NVE, modelo AA002-02)	350 x 1400	196 - 770
TMR (Marca MicroMagnetics, modelo STJ-201)	790 x 710	840 - 1200
SQUID RF	1500	1000 - 10000
Efeito Hall (Marca Melexis, modelo MLX 90215)	200 x 200	4.1 - 140

Tabela 3.1: Sensores utilizados em MMV com as respectivas sensibilidades e dimensões. (Michelena; DataSheet MicroMagnetics sensor STJ 201; Noguchi, et al, 2017; DataSheet Melexis sensor 90215; Carvalho; Bruno, 2011)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.2.1. Sensor GMR

A magnetorresistência é o efeito de variação na resistência elétrica de materiais magnéticos, devido a um campo magnético externo aplicado. (Reig, et al, 2009).

A magnetorresistência gigante é um efeito observado em materiais multicamadas que tem sua resistência elétrica diminuída a partir da aplicação de um campo magnético externo, foi descrita por Albert Fert em 1988 e Peter Grümberg em 1989. A interação entre camadas, com acoplamento de camada antiferromagnético das camadas adjacentes de Fe levam o conjunto a uma magnetização zero. Na presença de um campo magnético externo, geralmente de alta intensidade, é obtido um alinhamento paralelo. Desta forma é possível verificar uma alta variação na resistência elétrica na amostra. Dessa forma, os sensores GMR funcionam a partir desses conceitos físicos, em geral como a maioria dos sensores de campo magnético, os sensores GMR transformam o fluxo magnético detectado em sinal elétrico. (Cubells-Beltrán, et al, 2016; Reig, et al, 2009).

3.2.2.
Sensor TMR ou STJ

A magnetorresistência de efeito túnel ocorre em materiais multicamadas, geralmente composto de duas camadas ferromagnéticas separadas por uma camada isolante fina na ordem de nanômetros. Um campo magnético externo aplicado nesses materiais aumenta a probabilidade de os elétrons sofrerem o efeito de tunelamento quântico através da camada isolante passando de uma camada ferromagnética a outra, provocando uma alteração na resistência elétrica do material.

Nesse sentido os sensores TMR usam esse conceito para identificar o fluxo magnético e transformar esse valor de fluxo magnético em um sinal elétrico. Esses sensores podem ser constituídos de três camadas, onde há uma camada isolante elétrica, que pode ser de óxido de magnésio (MgO), entre as duas camadas ferromagnéticas (Ikeda, et al, 2008). Nesses dispositivos em geral há uma camada com a magnetização fixada em uma direção chamada de "pin layer" e uma camada chamada "free layer" onde a magnetização se orienta na mesma direção do campo magnético aplicado nesses dispositivos (Löhndorf, et al, 2007).

3.2.3.
Sensor SQUID

O efeito Josephson, leva esse nome devido ao físico britânico Brian David Josephson que previu esse fenômeno em 1962, consiste de uma corrente elétrica fluindo sem dissipação entre dois supercondutores sem aplicação de tensão e separados por um isolante de dimensão nanométrica. A junção desses dois supercondutores, separados pela camada isolante, é chamada de junção Josephson. (Clarke e Braginski, 2004)

O sensor SQUID tem seu funcionamento baseado no efeito Josephson brevemente explicado anteriormente e na quantização do fluxo magnético. O SQUID tem em geral uma ou mais junções Josephson em um anel supercondutor. No caso de apenas uma junção Josephson o SQUID é chamado de SQUID RF. E no caso de duas junções Josephson o SQUID é chamado SQUID DC. O dispositivo, também é considerado um transdutor já que converte o fluxo magnético medido em tensão elétrica. (Clarke e Braginski, 2004).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.2.4.
Sensor Hall

O efeito Hall descoberto em 1879 por Edwin Herbert Hall, foi observado em um material condutor elétrico, onde foi aplicado um campo magnético externo perpendicularmente à corrente elétrica que atravessa esse condutor, devido à força de Lorentz as cargas são desviadas da trajetória inicial e dessa maneira surge uma diferença de potencial elétrico nas bordas desse condutor. (Halliday, et al, 2016). A (Figura 3.1) mostra um esquema do efeito Hall. Esse efeito também é observado em semicondutores, o que permite o desenvolvimento de sensores de campo magnético versáteis.

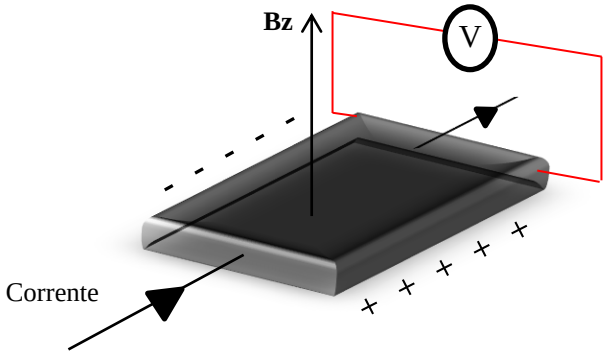

Figura 3.1: Desenho esquemático do efeito Hall

Um dos sensores utilizados neste trabalho foi o sensor da marca Melexis modelo MLX 90215 que possui na sua eletrônica interna amplificadores, sendo assim a voltagem gerada a partir do campo aplicado pode ser da ordem de µV, se o sensor for de saída analógica a voltagem de saída é proporcional ao fluxo magnético que atravessa a superfície do sensor. Parte desses sensores operam em uma faixa de alimentação de até 20V (Manual Melexis sensor 90215), os sensores de efeito Hall utilizados neste trabalho operam em uma faixa de 4.5V a 5.5V.

3.3.
Sistema de leitura de campo magnético

A grande vantagem dos nossos equipamentos é que podem ser montados e desmontados e seus componentes podem ser utilizados para outra finalidade. Podemos utilizar dois sistemas diferentes de leitura do campo magnético da amostra. Foram montados dois diferentes sistemas: o primeiro, um sistema de

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

leitura magnética composto por um equipamento comercial, um Gaussímetro da marca F.W. BELL modelo 9950, aquisição de dados é feita por um dispositivo da marca National Instruments modelo BNC-2090 e um programa feito na linguagem LabVIEW; Um outro sistema de leitura foi construímos no nosso próprio laboratório, este sistema é composto por dois sensores de efeito Hall, um circuito eletrônico confeccionado em uma placa de cobre e a leitura feita por um dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) da marca National Instruments modelo BNC-2090.

3.3.1. Gaussímetro marca F. W. Bell modelo 9950

Este sistema de leitura é composto por um equipamento comercial da marca F. W. Bell modelo 9950. O Gaussímetro F.W. BELL 9950 (Figura 3.2) é capaz de medir campos contínuos (D.C) e alternados (A.C), com uma sensibilidade na faixa de 0,003 mT a 300 mT, podendo atingir uma frequência de até 50 kHz. O Gaussímetro possui uma probe tri axial como mostrado na (Figura 3.3) com três sensores de efeito Hall e três canais referentes à leitura dos campos nas direções B_x, B_y e B_z. O equipamento apresenta com uma precisão de 0.05%. (Manual Gaussímetro F.W. BELL 9950)

O equipamento disponibiliza de sete escalas que variam entre 300 μT a 30 T o que nos garante uma faixa razoável para realizar as medidas, a tabela 3.2 apresenta as principais especificações do Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950. Apesar de o equipamento contar com duas opções de modo de leitura, em Gauss e em Tesla, optamos pelo modo Tesla, disponível no menu de operação do Gaussímetro acessível pela interface do equipamento. O modelo 9950, conta, também, com a função zero relativo, essa função permite que uma medida seja realizada com relação a um campo magnético de referência. Utilizamos essa função para realizar medições com um imã acoplado no próprio sensor

Podemos aplicar esta função em duas situações de medidas na intenção de identificar as configurações de defeitos feitos no centro de placas de aço: No primeiro caso usamos a função zero relativo para, a partir de uma varredura, verificar a uniformidade da magnetização induzida de uma amostra de placa de aço modelo SAE 1020, para isso utilizamos essa função zerando a probe a partir da função zero relativo em uma posição afastada da placa; No segundo caso utilizamos

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

a função para identificar o defeito da placa de aço 1020 durante a varredura, uma vez que zerando a probe em uma região onde o campo magnético induzido da placa é uniforme.

Figura 3.2: Gaussímetro F.W. BELL 9950

Faixa de Sensibilidade	Resolução	Precisão	Diâmetro de sensibilidade dos sensores
0,003 mT – 300 mT	0,001 mT – 0,1 mT	0.05 %	1520 µm

Tabela 3.2: Especificações do Gaussímetro F.W. BELL 9950 (Manual Gaussímetro F.W. BELL 9950).

A orientação dos sensores no modo de operação D.C. pode ser vista na figura 3.3. As setas indicam a orientação positiva de aquisição do campo magnético para cada sensor. Para realizar uma medida é necessário acoplar ao suporte da probe um ímã de geometria anel da fabricante K&J magnetics para induzir um campo magnético na placa de aço SAE 1020, a probe é posicionada na região uniforme da placa de aço SAE 1020, relativamente longe do defeito. O canal do Gaussímetro F.W. BELL 9950 referente ao sensor do fluxo magnético B_z é zerado nestas condições, por meio da função zero relativo, na interface do equipamento.

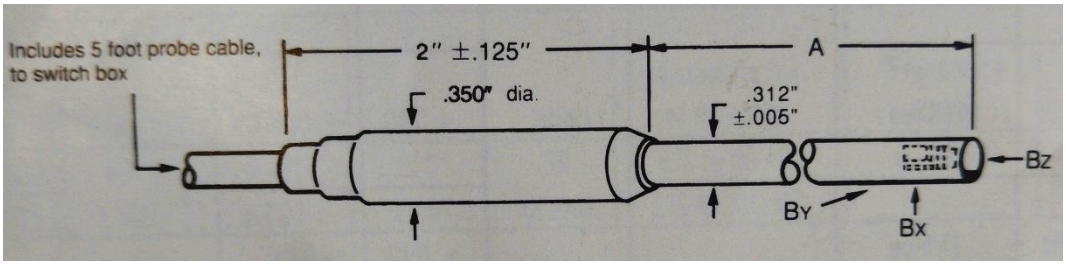

Figura 3.3: Esquema de probe tri-axial com indicação de localização dos sensores (Retirado de Manual F.W. BELL)

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.3.2.
Sensor Melexis e Sistema Gradiométrico

O sistema gradiométrico é composto por dois sensores de efeito Hall da marca Melexis modelo MLX 90215, é um sensor com sensibilidade programável feito de um semicondutor de óxido metálico complementar conhecido na literatura e na indústria como CMOS (Figueroa, et al, 2012; Moisello, et al, 2019; Camuñas-Mesa, Linares-Barranco, Serrano-Gotarredona, 2019; Data Sheet melexis sensor 90215). O sensor MLX 90215 tem uma tensão de saída proporcional ao fluxo magnético detectado, dessa forma esse sensor é dito ratiométrico, sensores ratiométricos são sensores que apresentam variação proporcional na tensão de saída a uma mudança na tensão de entrada ou, nesse caso, proporcional a um campo externo aplicado. O sensor MLX 90215 tem uma sensibilidade na faixa de 5 mV/mT a 140mV/mT, essa e outras características gerais desse sensor são apresentadas na tabela 3.3. (Data Sheet Melexis sensor 90215).

Faixa de tensão de alimentação (V)	Faixa de tensão de saída (V)	Faixa de Calibração (mV/mT)	Diâmetro de sensibilidade (µm)
4,5 - 5,5	1,8 - 4,9	5 - 140	280

Tabela 3.3: Principais especificações do sensor Melexis MLX 90215. (Manual Melexis 90215).

A sensibilidade do sensor pode ser programada de maneira conveniente para leitura de campos magnéticos mais intensos ou menos intensos. O sensor é programado através de um software e uma placa programadora modelo PTC-01 (Figura 3.4) onde o sensor é conectado em uma porta de conexão do tipo pino, essa placa conta com um ímã (Veja a figura 3.4) de 9,9mT para calibrar o sensor. A comunicação entre a placa programadora e o computador é feita através de uma porta serial R232, a placa transmite ao sensor todas as configurações definidas na interface do software, as configurações definidas podem ser: offset, sensibilidade e ganho com variação de temperatura. O valor de offset é um número de tensão de saída do sensor em volts, o offset pode variar de 0 até 5 V. No nosso sistema gradiométrico construído o offset dos dois sensores é de 2,41V e a sensibilidade 3,64 mV/mT para ambos os sensores, como os sensores operam a temperatura

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

ambiente os efeitos de variação da temperatura sobre a sensibilidade são irrelevantes. A (Tabela 3.4) organiza as principais especificações do sensor Melexis MLX 90215 programado e utilizado neste trabalho.

Figura 3.4: Placa programadora Melexis PTC-01

Faixa de tensão de alimentação (V)	Faixa de tensão de saída (V)	Calibração programada (mV/mT)	Diâmetro de sensibilidade (µm)	Detecção
5,0	2,41	3,64	280	0,01 mT – 1,2 T

Tabela 3.4: Principais especificações do sensor Melexis MLX 90215 utilizado neste trabalho. (Manual Melexis 90215).

O encapsulamento do sensor Melexis MLX 90215 tem uma área de ~13,76 mm², a distância entre a superfície marcada do encapsulamento e a placa de efeito Hall dentro do sensor é de ~0,45 mm. A figura 3.5 apresenta com detalhes essas características físicas e dimensões do sensor MLX 90215.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

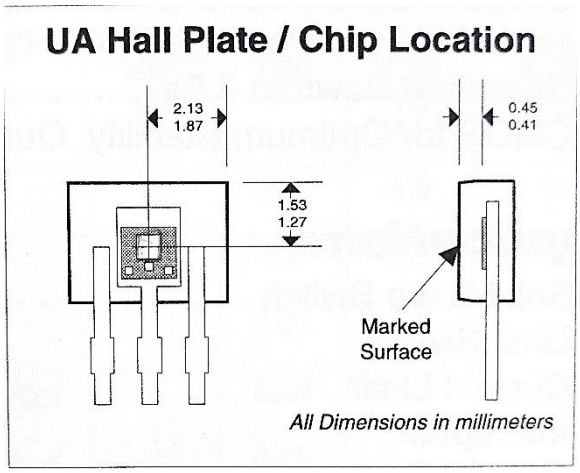

Figura 3.5: Características do sensor MLX 90215 (Retirado de Manual Melexis).

O sistema gradiométrico construído no laboratório consiste de dois sensores de efeito Hall marca Melexis modelo MLX 90215, com eixo de sensibilidades em direções opostas como mostra a figura 3.6. O eixo de sensibilidade tem como referência a face marcada do encapsulamento do sensor, na nossa configuração quando linhas de fluxo magnético de um polo norte de um ímã atravessam a superfície de encapsulamento corresponde a um aumento nos valores de tensão de saída, o contrário corresponde a uma diminuição da tensão de saída, com isto o sensor possui duas faixas referentes à aquisição de linhas de campo magnéticos positivas ou negativas dependendo da flutuação do offset. Como o sensor é alimentado com uma tensão de 5V, a voltagem máxima de saída é de 5V e a mínima de 0V. (Manual Melexis 90215).

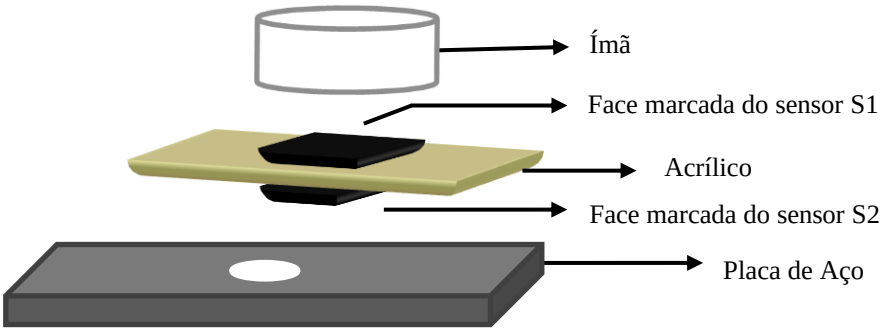

Figura 3.6: Esquema de montagem do sistema gradiométrico.

Enquanto o sensor S1 está com seu eixo de sensibilidade orientado na direção do ímã o sensor S2 está com seu eixo de sensibilidade orientado na direção da placa ou amostra (direção contrária). Os sensores S1 e S2 foram posicionados nessas orientações para atenuar os efeitos dos valores de campo magnéticos tanto do ímã

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

quando demais ruídos presentes no laboratório. Os sensores também são sensíveis aos campos magnéticos de baixa intensidade provocados por outros equipamentos próximos ao sistema de varredura magnética de varredura, de modo que é necessário eliminar esses campos para obter uma leitura com uma melhor confiabilidade e com máxima resolução espacial possível.

Dessa forma o sistema de leitura gradiométrico funciona essencialmente atenuando ruídos e consequentemente aumentando a resolução espacial da medida. Para isso, no programa em LABVIEW subtraímos os valores de saída dos sensores. A figura 3.7 (a) mostra esquematicamente o princípio de funcionamento do nosso sistema gradiométrico construído na ausência de placa e a figura 3.7 (b) na presença da placa.

Assim sendo, temos duas situações (somente para amostras com resposta magnética da ordem de mT), na primeira (Veja a Figura 3.7 (a)) o sistema gradiométrico está realizando a leitura somente do campo do ímã e de ruídos, nesse caso os sensores são zerados através de um comando disponível na interface do programa em LABVIEW, a ação de zerar os sensores é subtrair os valores de saída de tensão de ambos. Nessa situação os dois sensores estão detectando os mesmos valores de campos magnéticos e respondendo com um mesmo valor de saída de tensão, logo a subtração deve ser igual a zero. Contudo, na segunda situação (Veja a Figura 3.7 (b)) há a uma placa de aço SAE 1020 posicionada perpendicularmente aos sensores e ao campo magnético do ímã, essa placa na presença do campo magnético oriundo do ímã apresenta um campo magnético induzido que é detectado pelo sensor S2, logo a subtração dos valores de saída dos dois sensores nesse caso dará diferente de zero, já que nessa situação enquanto o sensor S1 detecta o campo magnético do ímã e ruídos, o sensor S2 detecta o campo magnético do ímã, ruídos e também o campo magnético induzido pela placa.

Na primeira situação a voltagem de saída do sensor S1 (V_{S1}) é

$$V_{S1} = CI - R \tag{6}$$

e para o sensor S2 a voltagem de saída (V_{S2}) é

$$V_{S2} = CI - R, \tag{7}$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Onde CI é o campo magnético do ímã e R o ruído ambiente. Na segunda situação temos para a voltagem de saída do sensor S1 e do sensor S2, respectivamente

$$V_{S1} = CI - R \quad (8)$$

$$V_{S1} = CI - R - CP, \quad (9)$$

onde CI é o campo magnético do ímã, R o ruído e CP é o campo magnético induzido da placa.

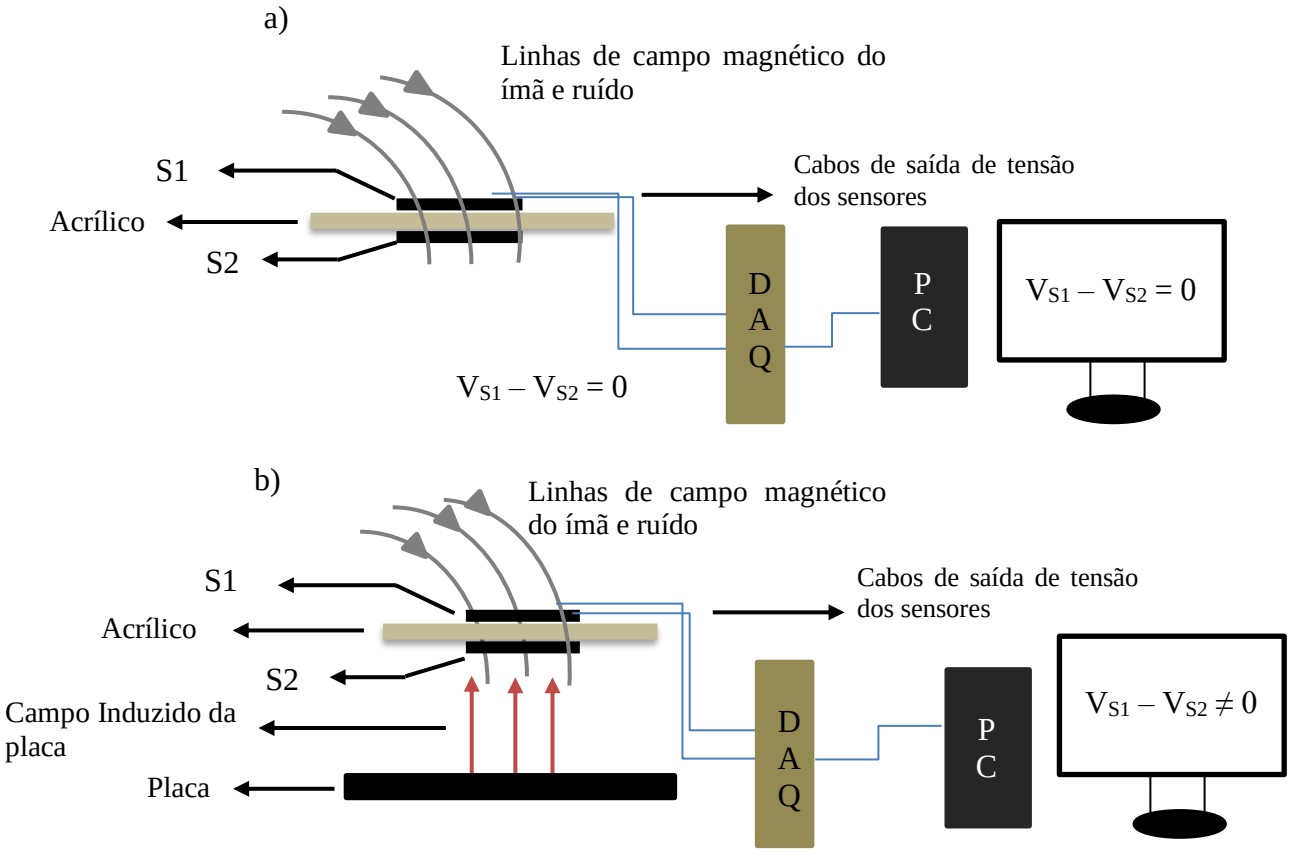

Figura 3.7: (a) Esquema de funcionamento do sistema gradiométrico na (a) primeira situação, (b) segunda situação.

3.4. Ímã de Geometria Anel

O ímã possui uma geometria de um anel (Veja a Figura 3.8 (a)) feito de neodímio da fabricante K & J magnetics, os raios têm as seguintes dimensões R1= 18,45 mm, R2= 5,95 mm e L= 9,58 mm. R1 é o raio externo, R2 é o raio interno e L é o comprimento, e pode aplicar um campo de até 0,3 T na direção Z, a uniformidade do campo magnético do ímã foi verificada através de uma medida em toda sua superfície por um Gaussímetro da marca F.W. BELL modelo 5080. O ímã

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

fica preso a um suporte construído, este suporte foi feito com uma base circular de acrílico com uma abertura no centro para o posicionamento da probe (Figura 3.8 (b)), a ponta marcada da probe acoplada ao ímã fica a uma distância de 21,0 mm do ímã e a 0,11 mm da placa de aço SAE 1020.

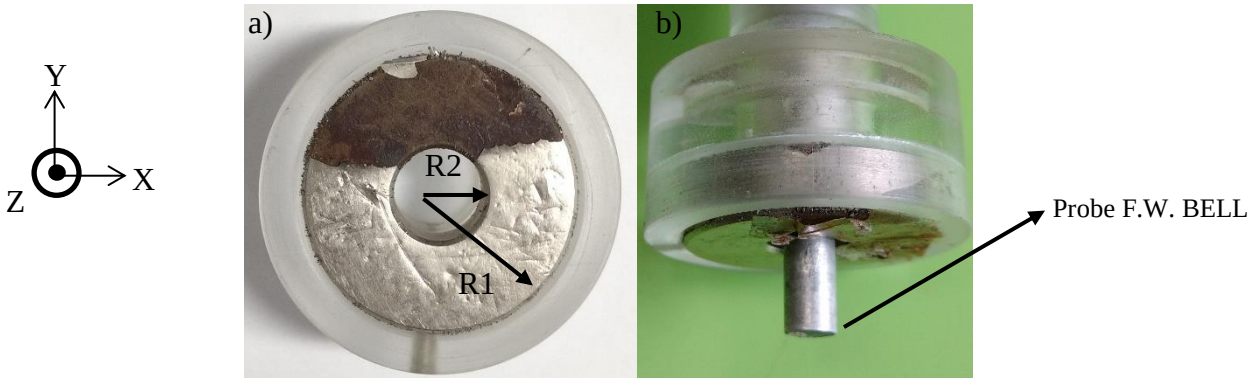

Figura 3.8:(a) Ímã acoplado na base circular de acrílico. (b) Probe do Gaussímetro F.W. BELL 9950 atravessando a abertura da base circular.

O ímã foi utilizado para induzir um campo magnético na placa de aço SAE 1020, de modo que esse campo induzido pudesse ser detectado pelos sensores em ambas as montagens, uma vez que o os sensores da probe de efeito Hall do Gaussímetro F.W. BELL 9950 e do gradiômetro não detectaram o campo remanente das placas após serem magnetizadas com 0.3 T. A detecção do campo magnético induzido da placa na presença do ímã, para o equipamento com F.W. BELL 9950 e com o Gradiômetro, permitiu a verificação da uniformidade de magnetização da placa (Figura 3.9) e também a visualização do defeito por imagem magnética, esse último será discutido posteriormente.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

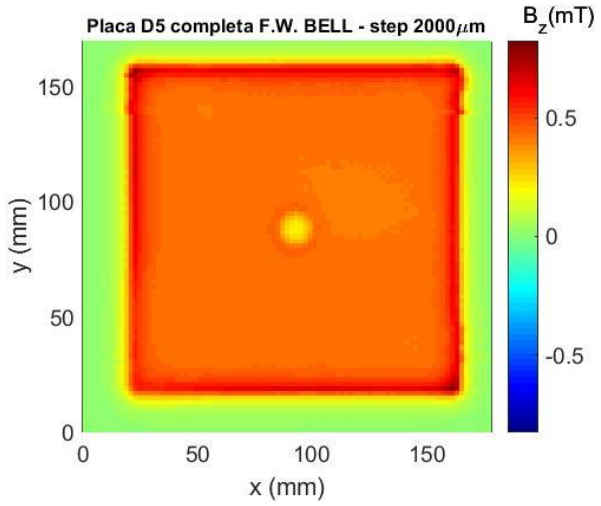

Figura 3.9: Mapa magnético da placa D5 de aço SAE 1020.

A escolha desse ímã na montagem se deu por sua geometria facilitar a montagem do equipamento, dado o formato cilíndrico da probe do Gaussímetro. O ímã com geometria de um anel permitiu que a probe fosse fixada no centro de um suporte e perfeitamente perpendicular a placa de aço SAE 1020, sendo o campo magnético induzido da placa detectado pelo canal referente ao campo B_z da probe.

No gradiômetro para aproveitar a base do ímã, construímos um suporte cilíndrico de acrílico (Figura 3.10) que também atravessa a base do ímã, onde os dois sensores S1 e S2 ficam afixados na ponta desse suporte de maneira que o sensor S2 possa ficar muito próximo à placa. Na montagem do equipamento com o sistema gradiométrico, o ímã fica a 10,45 mm do S1 e a 14,44 mm do S2. Esta configuração foi usada para que os campos induzidos das placas de aço SAE 1020 não fossem detectados pelo sensor S1.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

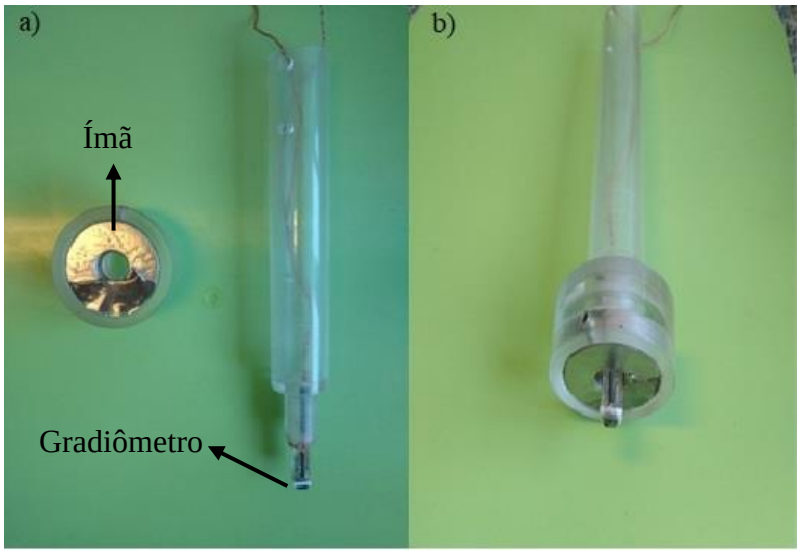

Figura 3.10: (a) Suporte cilíndrico para o gradiômetro e o ímã na sua base. (b) Base do ímã e gradiômetro posicionados no suporte cilíndrico.

3.5. Sistema de posicionamento

Os posicionadores da marca Zaber modelos T-LLS260C e T-LA60A (Figura 3.11) são dispositivos de deslocamento preciso.

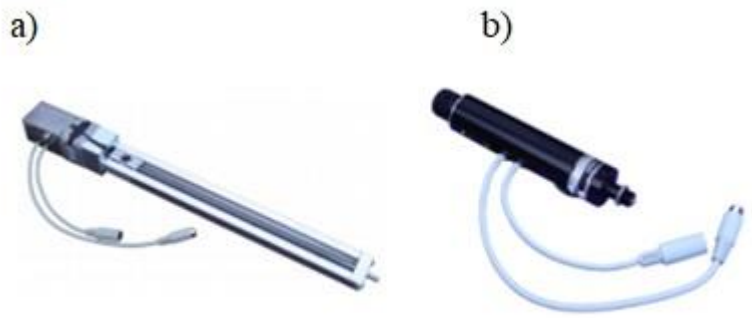

Figura 3.11: (a) Posicionador da marca Zaber modelo T-LLS260C. (b) Posicionador da marca Zaber modelo T-LA60A (Retirado de Manual Zaber modelo TLL).

Micropasso é o menor intervalo possível que o Zaber pode se mover e esse intervalo é a resolução do posicionador, esse intervalo também pode ser chamado de “passo”. A resolução do modelo T-LLS260C é de 0,16 µm, enquanto a resolução do modelo T-LA60A é de 0,09 µm. A repetitividade é o desvio máximo que o posicionador pode apresentar ao retornar a uma posição inicial, após se deslocar a outra posição, nesses modelos T-LLS260C e T-LA60A a repetitividade é de,

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

aproximadamente, 0,5 µm e 0,4 µm, respectivamente. O posicionador T-LLS260 é um atuador linear descontinuado e pode mover até 1,3 Kg, já o posicionador T-LA60A também é um atuador, contudo não é um posicionador de estágio linear, dessa forma não foi construído para operar deslocando peso nas direções radial e horizontal, porém esse modelo pode aplicar uma força de até 25N. (Manual Zaber modelo TLL) A (tabela 3.5) apresenta as especificações dos posicionadores. Munidos dessas informações pudemos definir o melhor uso para os posicionadores, já que Zaber modelo T-LLS260C pode mover até 1,3 Kg, esse modelo foi escolhido para o suporte construído no espaço XY. Para movimentar o suporte cilíndrico construído até a menor distância possível entre o sensor e a placa, escolhemos o modelo T-LA60A, uma vez que esse pode aplicar uma força na base de acrílico onde é fixado a probe (para a montagem do equipamento utilizando o Gaussímetro F.W. BELL 9950) e o gradiômetro (na montagem com o sistema gradiométrico).

Modelo	Faixa	Resolução	Repetitividade	Precisão
T-LLS260C	260 mm	0,16 µm	~ 0,5 µm	+/- 15 µm
T-LA60A	60 mm	0,09 µm	~ 0,4 µm	+/- 16 µm

Tabela 3.5: Especificações dos posicionadores da marca Zaber modelos T-LSS260C e T-LA60A. (Manual Zaber modelo TLL).

3.6. Montagem

3.6.1 Montagem do equipamento de varredura utilizando um Gaussímetro comercial F.W. BELL 9950

Construímos um sistema de varredura (Figura 3.12(a)) composto por uma estrutura de alumínio, uma base de acrílico, bases feitas de teflon, três atuadores da marca Zaber, sendo dois do modelo T-LLS260C e um do modelo T-LA60A, duas barras de alumínio, um suporte cilíndrico de acrílico, fita dupla face, um ímã de geometria de um anel, um Dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) da marca

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

National Instruments modelo BNC-2090 e um Gaussímetro marca F.W. BELL modelo 9950.

Adaptamos as barras de alumínio para suportar a base de teflon, o posicionado Zaber modelo T-LA60A e o suporte cilíndrico de acrílico, onde nesse suporte é fixada a probe do Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950 e um ímã de geometria de um anel é acoplado nesse mesmo suporte cilíndrico. A figura 3.12 (b) detalha o ímã de geometria anel e a probe acoplada. Como mostrado na figura 3.12 (a) os posicionadores Zaber modelo T-LLS260C são responsáveis pelo deslocamento no espaço X e Y da estrutura de alumínio citada acima, sobre essa estrutura de alumínio há uma base de acrílico onde são fixadas as placas de aço SAE 1020 para as medidas magnéticas. A figura 3.13 apresenta o diagrama de blocos da medida com o F.W. BELL 9950.

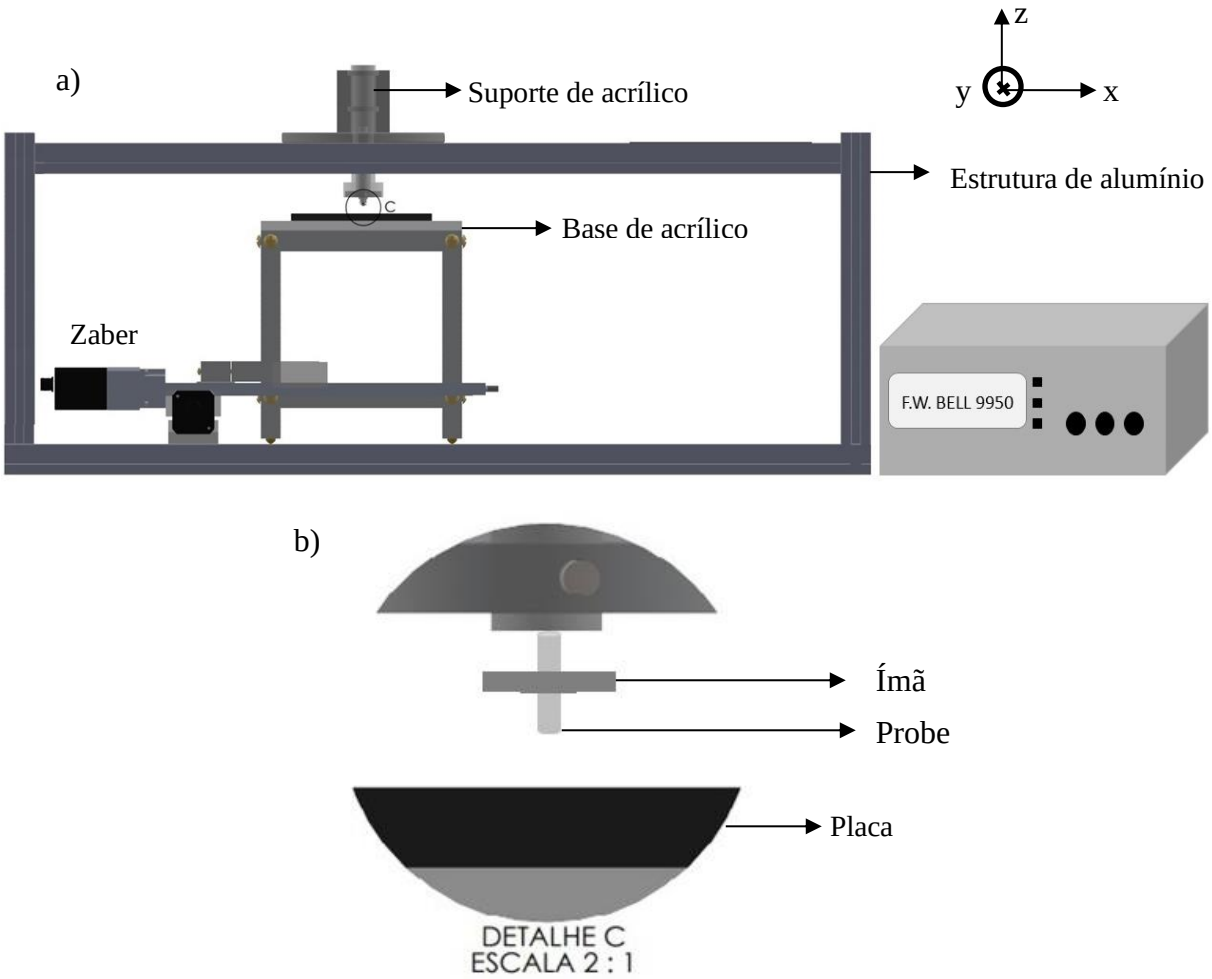

Figura 3.12: (a) Vista frontal da estrutura do equipamento construído e do Gaussímetro F.W. BELL 9950. (b) Detalhe da probe e do ímã.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

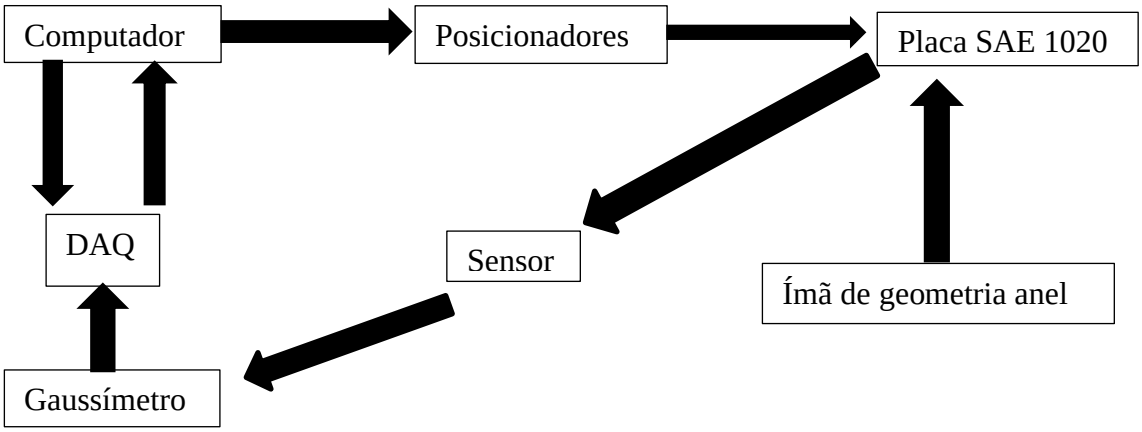

Figura 3.13: Diagrama de Bloco do equipamento construído.

O equipamento de varredura construído no laboratório é controlado por uma rotina em um programa dedicado a automatizar a varredura e armazenar os dados advindos dos sensores na linguagem LABVIEW (figura 3.14), o programa controla os posicionadores Zaber modelos T-LLS260C e T-LA60A, através do programa é possível mover o suporte de acrílico onde a placa é fixada para uma posição arbitrária dentro da faixa permitida pelo Zaber T-LLS260C, a distância da superfície da probe a placa é controlada pelo Zaber modelo T-LA60A, o programa também faz o armazenamento dos dados detectados pelo sensor através da placa de Aquisição de Dados (DAQ) da National Instruments modelo BNC-2090. O ímã de geometria anel pode aplicar um campo magnético de 0,3 T perpendicular à superfície da placa de aço SAE 1020, a placa é magnetizada e o seu campo induzido é detectado pela probe do Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950, que está perpendicular a placa, esse sensor corresponde ao terceiro canal do Gaussímetro F.W. BELL 9950 que detecta o campo na direção B_z. Por meio dos posicionadores a amostra percorre uma pequena área, deslocando-se no plano XY, perpendicular ao campo aplicado que é determinada após uma varredura para verificar a uniformidade da placa, após isso a área escolhida é entre as bordas da placa e o defeito onde a magnetização for mais uniforme. Os valores de saída do sensor da probe são enviados para um DAQ da marca National Instruments modelo BNC – 2090 por meio de uma porta BNC e a comunicação entre o DAQ e o computador é feito a partir de uma porta PCI. Esses valores são armazenados em arquivo .txt e através de uma rotina na linguagem MATLAB mapas magnéticos das placas após a varredura são plotados.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

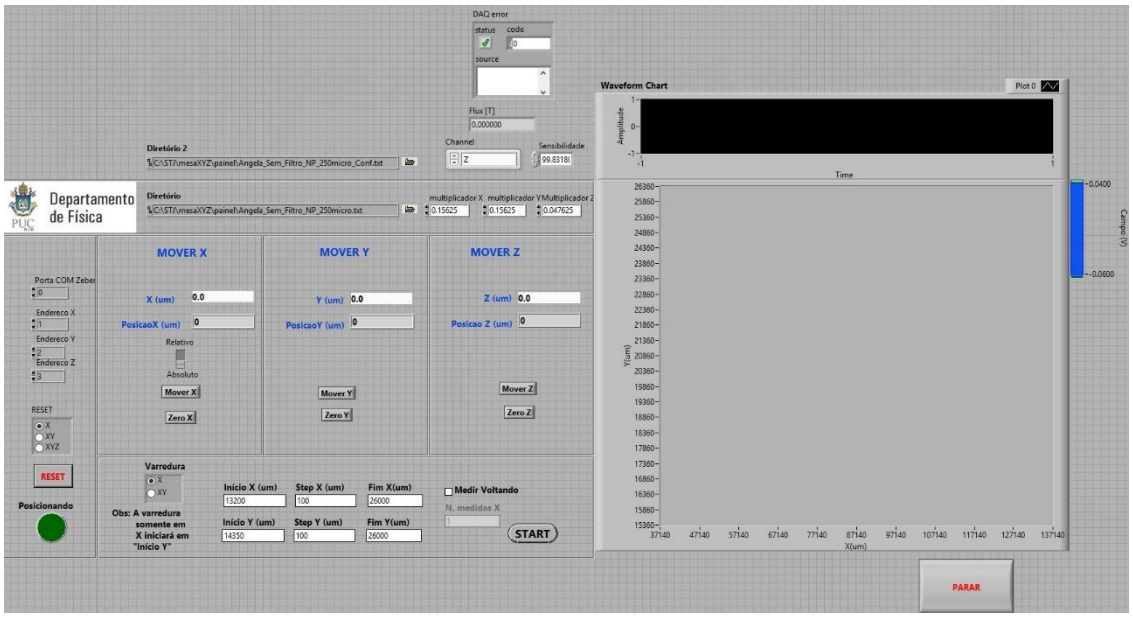

Figura 3.14: Painel principal do programa em LABVIEW para o sistema com o Gaussímetro F.W. BELL 9950.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3.6.2
Montagem do equipamento de varredura utilizando o sistema gradiométrico

Para montagem do equipamento de varredura (Figura 3.15) utilizando o sistema gradiométrico, fazemos uso de: três posicionadores da marca Zaber, sendo dois do modelo T-LLS260C e um do modelo T-LA60A, um ímã de geometria de um anel, fitas dupla face, um dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) da marca National Instruments modelo BNC-2090, uma placa de circuito e usamos a mesma base de alumínio construída para a movimentação dos dois sistemas de leitura e suporte dos motores de posicionamento de varredura Zaber. Foi construída uma base cilíndrica onde são fixados os dois sensores de efeito Hall da marca Melexis modelo MLX 90215, uma base de teflon, duas barras de alumínio, um suporte de acrílico onde a placa de aço SAE 1020 é fixada e um suporte para movimentação do sistema gradiométrico que é feita utilizando o Zaber modelo T-LA60A. A figura 3.16 apresenta o diagrama de blocos para medida com o gradiômetro.

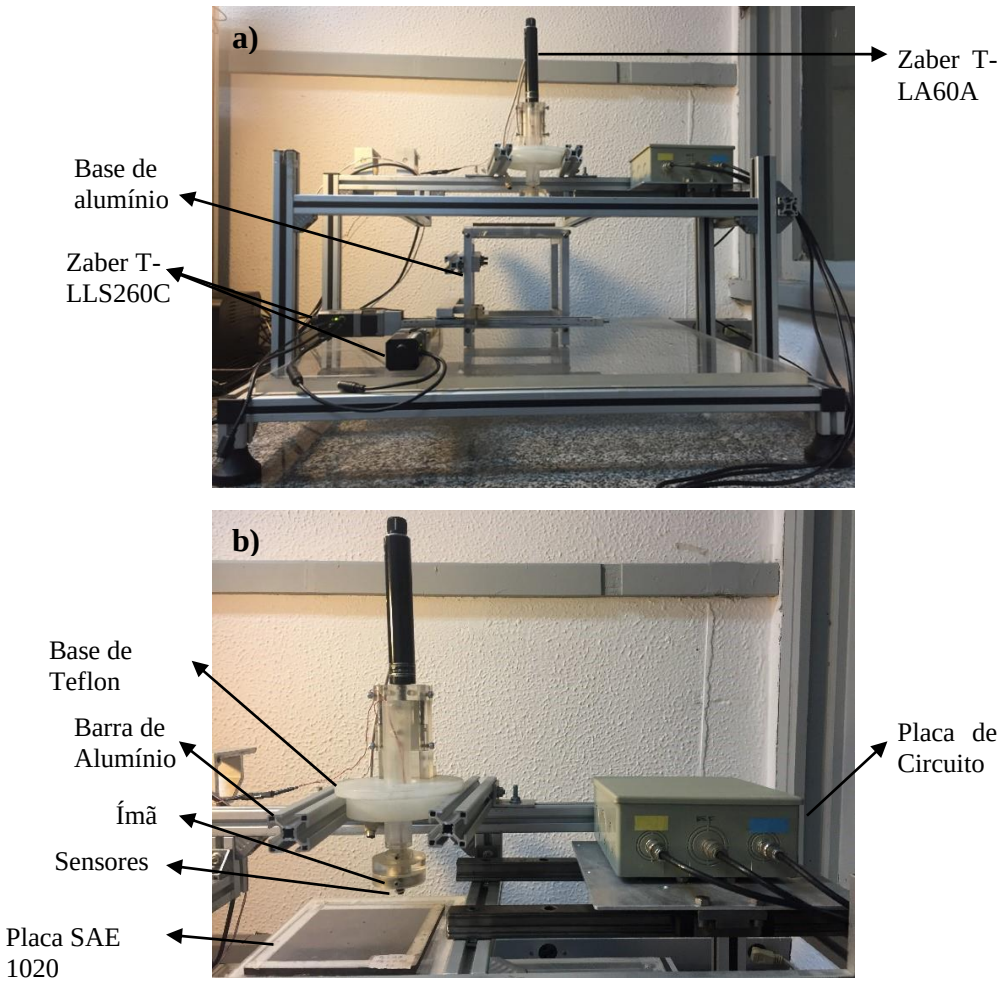

Figura 3.15: (a) Equipamento de varredura montado no laboratório. (b) Detalhe da estrutura onde são realizadas as medidas de varredura.

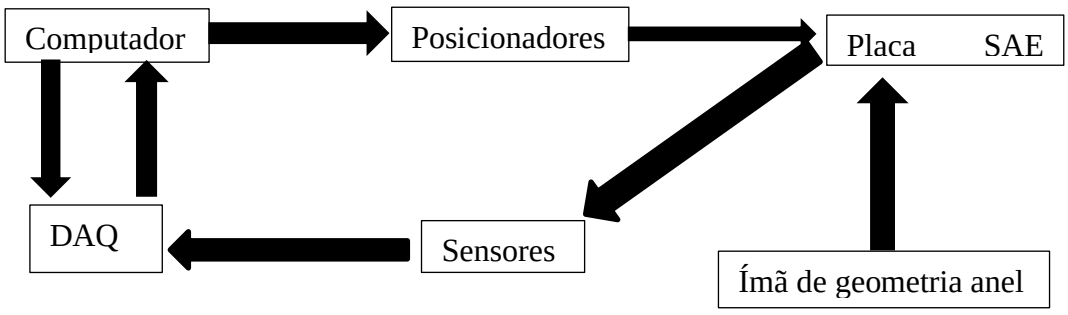

Figura 3.16: Diagrama de blocos do equipamento de varredura utilizando o sistema gradiométrico.

O equipamento de varredura montado no laboratório é controlado por uma rotina em um programa personalizado na linguagem LABVIEW (figura 3.17) dedicado a automatizar o processo de varredura e armazenamento dos dados da medida, o programa controla os três posicionadores da marca Zaber modelos T-LLS260C e T-LA60A, pela interface do programa é possível deslocar a uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

posição previamente determinada os Zaber T-LLS260C dentro da faixa de deslocamento desses equipamentos, esses posicionadores deslocam o suporte de acrílico onde a placa é fixada, o posicionador T-LA60A pode aplicar uma força de até 25N, essa sua funcionalidade é utilizada para ajustar a distância do sensor S2 à superfície da placa de aço 1020, através da interface do programa é possível executar esse comando. O ímã de geometria anel aplica um campo magnético na placa de aço 1020, essa placa na presença do campo magnético do ímã fica magnetizada e apresenta um campo induzido, esse campo induzido é detectado pelo sensor S2 que apresenta uma saída em voltagem proporcional ao campo detectado, esses valores de saída do sensor S2 são enviados para o DAQ através de uma porta BNC e a comunicação do DAQ com o computador é feito a partir de uma porta PCI. Os valores de saída de tensão do sensor S1 (que está com seu eixo de sensibilidade apontado para o ímã) também passam pelo DAQ por meio da porta BNC. Para a operação do equipamento de varredura utilizando um sistema gradiométrico, dois canais de entrada do DAQ são ocupados 06 e 07 para os sensores S1 e S2, respectivamente. O programa na linguagem LABVIEW também subtraí os valores de tensão de saída dos sensores e salva dois arquivos, ambos no formato .txt, o primeiro arquivo salvo contém os dados da subtração dos sensores, esse arquivo é utilizado para plotar os mapas magnéticos, o outro arquivo salva os dados de saída de tensão dos sensores sem a subtração.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

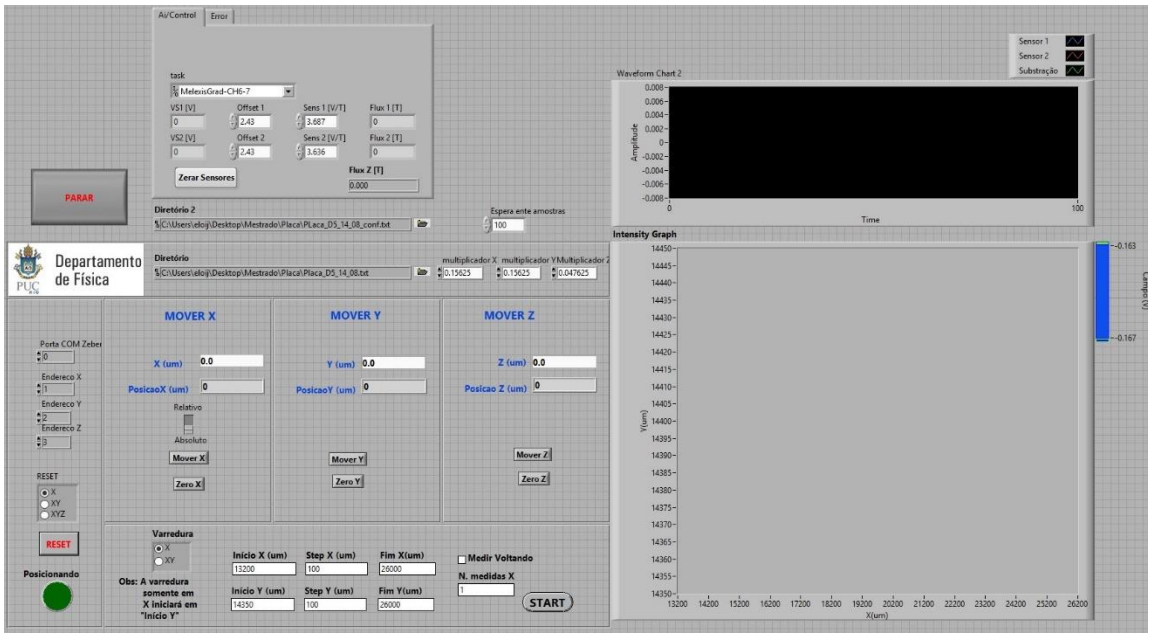

Figura 3.17: Painel principal do programa em LABVIEW para o sistema gradiométrico.

3.7. Procedimento de medida

3.7.1 Medida com o Gaussímetro 9950

Para realizar uma medida utilizando o Gaussímetro F.W. BELL 9950, realizamos um procedimento de fixação da placa de aço SAE 1020, prendendo-a em um suporte de acrílico que construímos (Figura 3.18). Este suporte não apresenta campo magnético induzido na presença de um campo magnético aplicado pelo ímã. Fixamos a placa nessa estrutura com fitas dupla face. O suporte é deslocado no espaço XY pelos dois posicionadores da marca Zaber modelo T-LLS260C. Selecionamos a região de varredura centralizando o defeito em relação à posição da probe, a região é uma área afastada das bordas e próxima ao defeito. Para aproximarmos a probe o máximo possível da superfície da placa utilizamos o posicionador da marca Zaber modelo T-LA60A.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

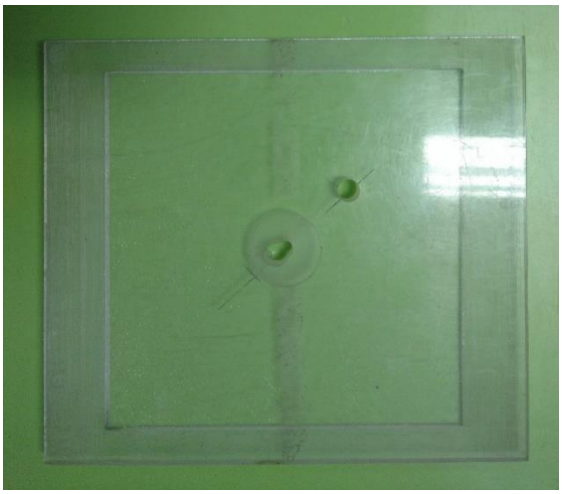

Figura 3.18: Suporte de acrílico onde as placas são fixadas.

Antes de realizar a medida, verificamos a uniformidade de magnetização da placa, a figura 3.19 apresenta a placa D5 como exemplo e a figura 3.20 o mapa magnético da medida de uniformidade de magnetização dessa placa. Após essa verificação utilizamos a função do Gaussímetro modelo 9950 supracitada, zero relativo, que nos permite realizar uma medição considerando toda a região plana da placa com valor zero de campo induzido, dessa forma é possível o sensor de campo B_z da probe, ao se aproximar e passar pelo defeito, detectar a ausência de matéria que ocasiona em um campo negativo, visto no mapa magnético (figura 3.21).

Figura 3.19: Placa D5 de aço SAE 1020.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

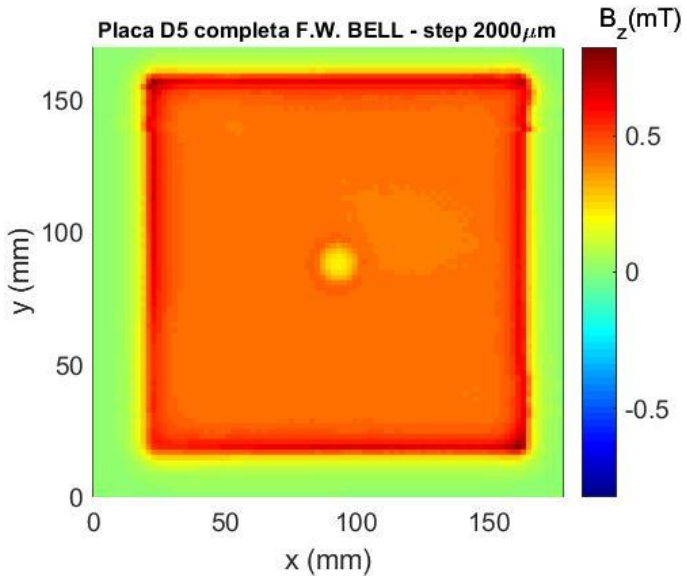

Figura 3.20: Mapa magnético da placa D5 completa e defeito.

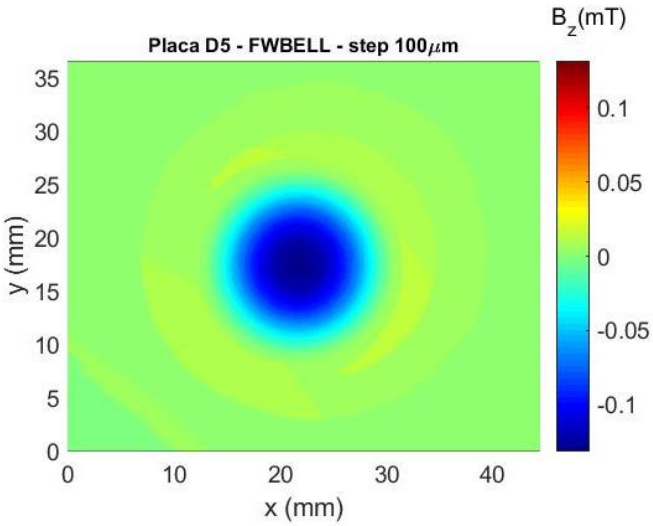

Figura 3.21: Mapa magnético do defeito da Placa D5.

A movimentação do suporte para determinar a região de varredura é feita por meio dos posicionadores que são controlados pelo programa de automação para o equipamento na linguagem LABVIEW. O programa também controla a varredura e salva os dados de leitura da probe em um arquivo no formato .txt.

Durante a varredura a aquisição dos valores de campo magnético é feito por um Dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) (Figura 3.22) da marca National Instruments modelo BNC 2090. A comunicação entre o equipamento F.W. BELL 9950 e a DAQ é feito através de uma porta BNC e entre a DAQ e o computador através de uma porta PCI. Esse dispositivo conta com 16 canais no modo entrada

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

única referenciada, do inglês Referenced single-ended input (RSE) ou 8 canais no modo diferencial. O dispositivo pode fornecer em (D.C) uma voltagem de 5V e corrente entre 10mA a 1A. Utilizamos no equipamento com o sistema gradiométrico o DAQ, no modo RSE, 5 V e 1mA. Para o equipamento utilizando o Gaussímetro F.W. BELL 9950 utilizamos o modo de aquisição RSE, contudo por se tratar de um equipamento comercial que é alimentado pela rede elétrica do laboratório não foi necessário utilizar a saída de voltagem e corrente do DAQ.

Figura 3.22: Dispositivo de Aquisição de Dados (DAQ) e cabo BNC no procedimento de medida com o Gaussímetro F.W. BELL 9950.

O deslocamento dos posicionadores Zaber modelos T-LLS260C e T-LA60A é feito a partir do programa na linguagem LABVIEW, uma rotina nesse programa executa esse comando, a centralização do defeito e aproximação do sensor da probe a superfície da placa também é controlada por essa rotina, a (Figura 3.23) mostra o diagrama da rotina responsável pelo deslocamento dos posicionadores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

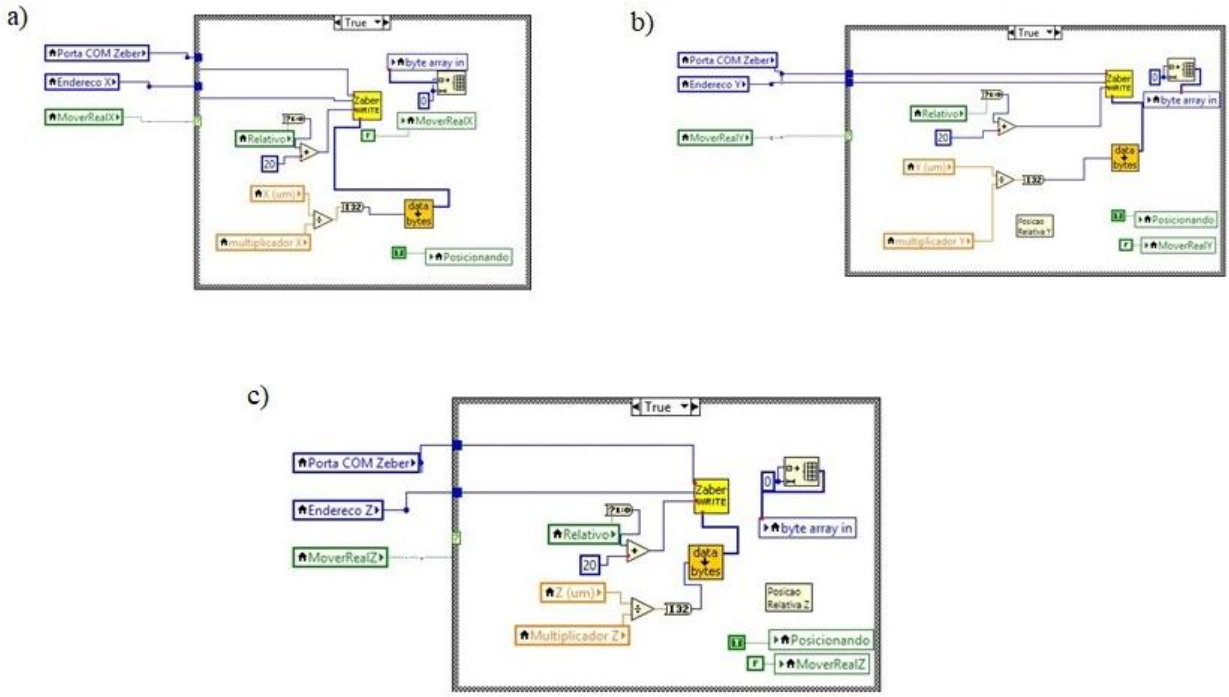

Figura 3.23: (a), (b) Diagrama do programa em LABVIEW responsável pelo comando deslocamento dos posicionadores Zaber modelo T-LLS260C no espaço X e Y. (c) Diagrama do programa em LABVIEW responsável pelo comando de deslocamento do posicionador Zaber modelo T-LA60A.

Como dito anteriormente, os dados de saída do sensor da probe precisam ser armazenados, para isso uma rotina no programa LABVIEW salva os dados em um arquivo no formato .txt. A (Figura 3.24) exibe o diagrama da rotina que executa essa função.

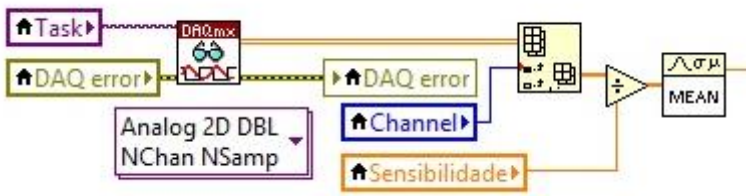

Figura 3.24: Diagrama do programa em LABVIEW responsável pelo arquivamento dos dados do sensor.

3.7.2
Medida com o Gradiômetro

No procedimento de medida utilizando o gradiômetro, repetimos o procedimento de fixação da placa descrito anteriormente e utilizamos os mesmos posicionadores Zaber modelo T-LLS260C e T-LA60A, assim como o mesmo suporte para as placas de acrílico e DAQ. A diferença nesse procedimento fica por

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

conta dos sensores utilizados, dois sensores de efeito Hall Melexis 90215 com os eixos de sensibilidade posicionados em sentidos contrários e de uma placa de circuito (Veja figura 3.28) construída no laboratório para atenuar o ruído e aumentar a sensibilidade do gradiômetro. Por se tratar de dois sensores, é necessário utilizar duas portas de entrada do DAQ para aquisição dos dados oriundos dos sensores, para a entrada desses dados utilizamos os canais 06 e 07 como pode ser visto na (Figura 3.25).

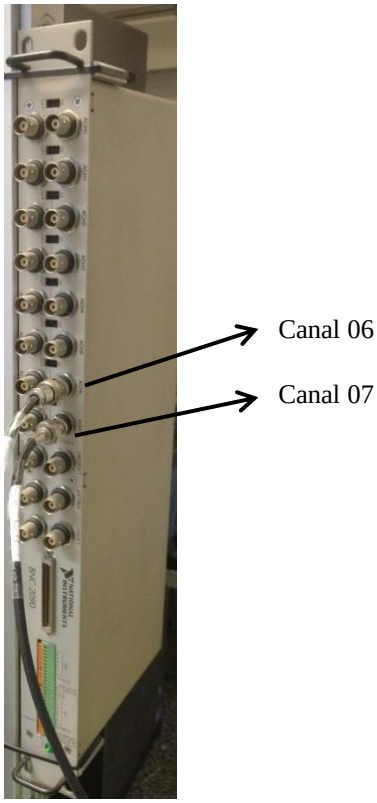

Figura 3.25: Sistema de aquisição de dados (DAQ) e cabos BNC conectados aos canais 06 e 07, referentes aos sensores S1 e S2 respectivamente.

Como supracitado na sessão 3.3.2 é necessário realizar uma subtração dos valores de campo magnético detectados pelos sensores S1 e S2 quando há uma placa ou outra amostra posicionada perpendicularmente aos sensores e ao campo magnético do ímã, a (Figura 3.26) mostra o diagrama, da rotina responsável pela aquisição dos dados de saída dos sensores e subtração das tensões de saídas dos sensores S1 e S2, do programa customizado na linguagem LABVIEW que controla a automação do equipamento.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

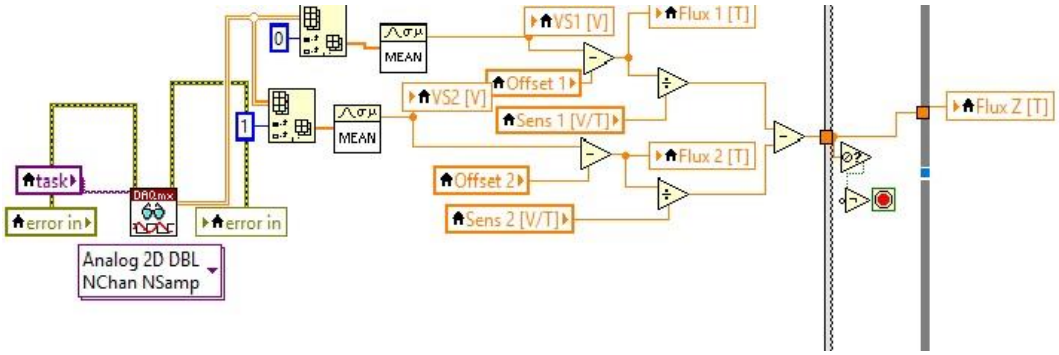

Figura 3.26: Diagrama do LABVIEW referente a aquisição de dados subtração dos sensores S1 e S2.

Os dois sensores de efeito Hall Melexis MLX 90215 necessitam de uma alimentação elétrica externa de 5V, essa alimentação é realizada através do DAQ por meio de seu terminal de alimentação, os sensores estão ligados em paralelo para que obtenham a mesma alimentação de 5V. Um condensador, dispositivo eletrônico para reduzir o ruído proveniente da alimentação elétrica, foi agregado ao terminal de alimentação do DAQ, a (Figura 3.27) mostra o terminal de alimentação do DAQ com o condensador agregado.

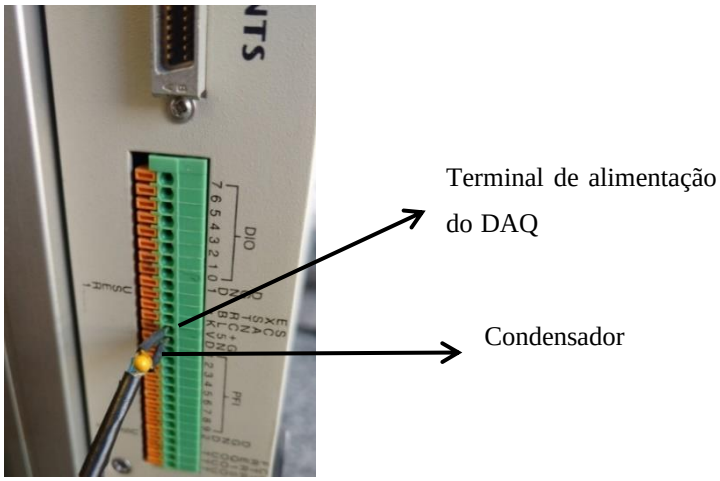

Figura 3.27: Terminal de alimentação do DAQ com condensador agregado.

Como citado anteriormente, uma placa de circuito (figura 3.28) foi construída para atenuar o ruído e melhorar a sensibilidade do gradiômetro. Esse circuito foi construído numa placa de cobre utilizando um robô CNC (do inglês Computer Numeric Control). Para o seu funcionamento o circuito contém dois canais de entrada e dois canais de saída, todos do tipo BNC. Em cada canal há os

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

seguintes componentes eletrônicos: um amplificador OP27G, uma resistência de 100 KΩ, duas resistências de 100 Ω, um potenciômetro de 4.1 kΩ, um capacitor de 47 µF e um capacitor de 33 µF.

Para cada canal ocorrem duas etapas, a primeira consiste de um buffer para manter a voltagem e a impedância do sinal utilizando um amplificador operacional (OP27G). Na segunda etapa é realizado uma filtragem de segunda ordem (passa baixo) para atenuar frequências maiores que 20 Hz (frequência de corte). Um filtro passa baixo de segunda ordem apresenta uma atenuação maior para frequências altas e tem uma variação na queda da amplitude mais acentuada, quando comparado com um filtro de primeira ordem. A frequência de corte é controlada por dois potenciômetros que fazem um ajuste fino em cada canal.

O circuito é alimentado pelo terminal de alimentação do DAQ que fornece para esse circuito uma alimentação elétrica de 5V, três condensadores são acoplados na entrada da alimentação do circuito para reduzir ruídos provenientes da alimentação, como pode ser vista na figura 3.28. A placa de circuito também controla a alimentação dos sensores MLX 90215 do gradiômetro, na conexão dos cabos de alimentação do gradiômetro com o circuito também é acoplado um condensador para atenuar possíveis ruídos remanentes da alimentação elétrica, como pode ser visto na figura 3.29 (a). A figura 3.29 (b) exibe o circuito desta placa.

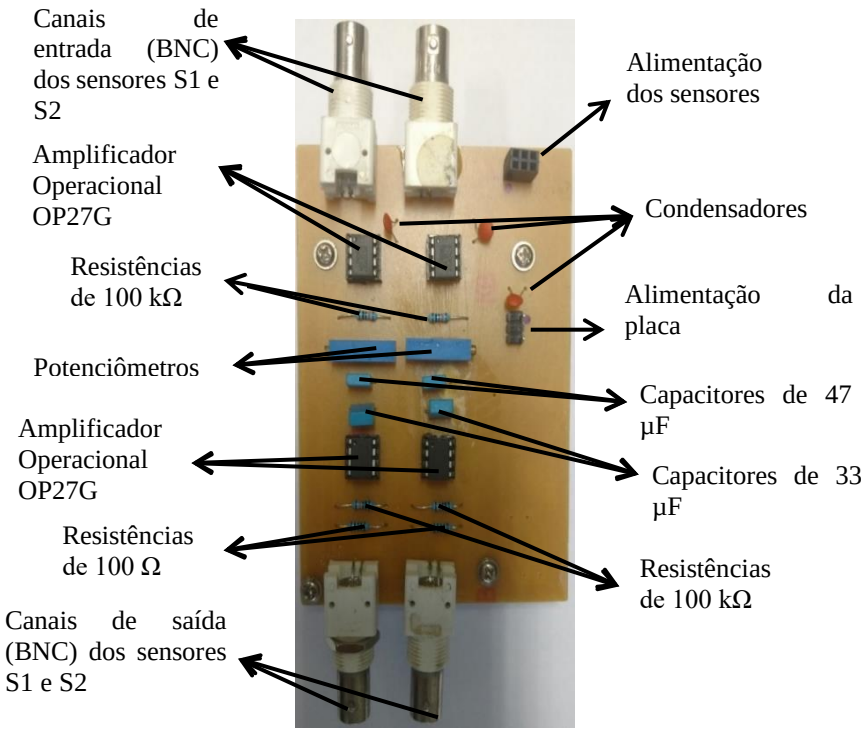

Figura 3.28: Placa de circuito construída no laboratório

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

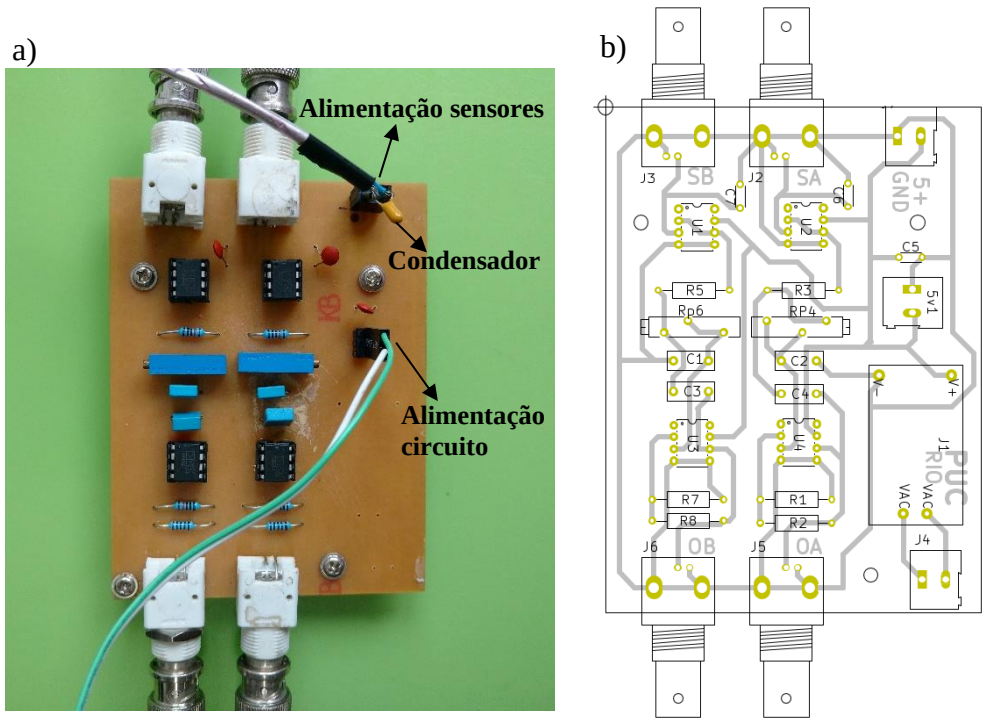

Figura 3.29: (a) Placa de circuito com identificação da alimentação da placa e dos sensores gradiométricos, (b) Circuito da placa.

O processo de centralização do defeito é realizado da mesma maneira como descrito anteriormente. O deslocamento dos três posicionadores para a determinação da área de varredura e centralização do defeito, assim como no procedimento de medida com o Gaussímetro F.W. BELL 9950 é feito através do programa em LABVIEW, a figura 3.30 mostra o diagrama da rotina que controla o deslocamento dos posicionadores.

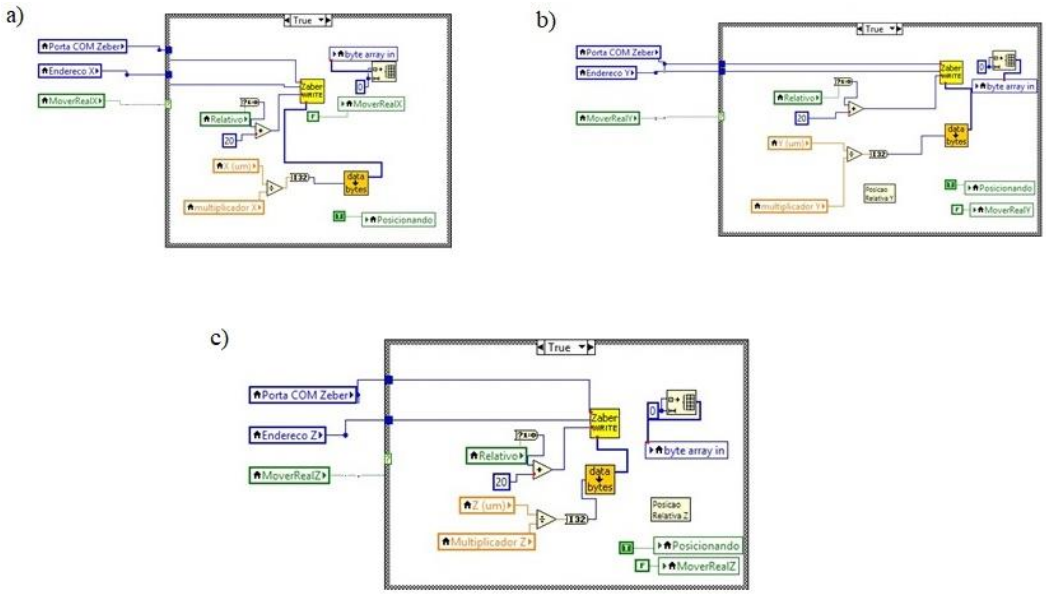

Figura 3.30: (a), (b) Diagrama das rotinas que controlam a movimentação dos posicionadores Zaber T-LLS260C. (c) Diagrama das rotinas que controlam a movimentação dos posicionadores Zaber T-LA60A.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Os dados da medida necessitam ser arquivados para serem analisados posteriormente, para isso utilizamos o programa em LABVIEW para armazenar arquivos no formato .txt das medidas com os valores de saída dos sensores, o programa salva dois arquivos no formato citado a pouco, um arquivo com os dados da subtração dos dois sensores S1 e S2 (Figura 3.31 (a)) e outro arquivo sem a subtração com os dados dos dois sensores S1 e S2 (Figura 3.31 (b)).

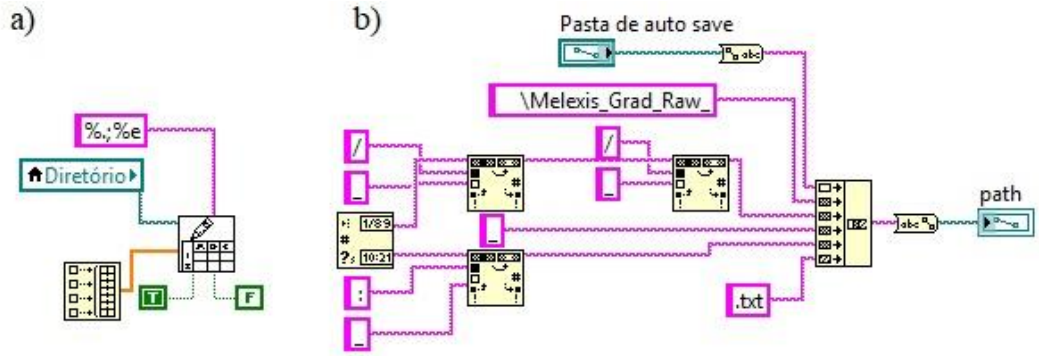

Figura 3.31: (a) Diagrama da rotina em LABVIEW que salva os dados da subtração dos valores obtidos pelos sensores. (b) Diagrama da rotina LABVIEW que salva os dados puros, sem a subtração, dos valores de saída dos sensores.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4
Resultados e Discussões

Neste capítulo apresentaremos os resultados adquiridos a partir do equipamento de varredura construído no laboratório utilizando as duas montagens: o sistema gradiométrico e do equipamento comercial Gaussímetro da marca F.W. BELL modelo 9950. Realizamos medidas em placas de aço SAE 1020, com defeitos naturais e manufaturados a partir de eletro-erosão.

4.1.
Placas de aço SAE 1020

Antes de apresentarmos os resultados obtidos pelo equipamento descrito anteriormente, faremos uma breve descrição das placas de aço SAE 1020 que foram medidas. As placas de aço SAE 1020 apresentam regiões que são chamadas de pit (Neslusan et al, 2019) ou como citamos anteriormente, defeitos.

Dividimos as placas em três grupos, o primeiro com as placas de somente um defeito, figura 4.1, o segundo grupo com as placas de dois defeitos, figura 4.2, o terceiro grupo com a placa de defeito aleatório e a placa com nove defeitos, figura 4.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

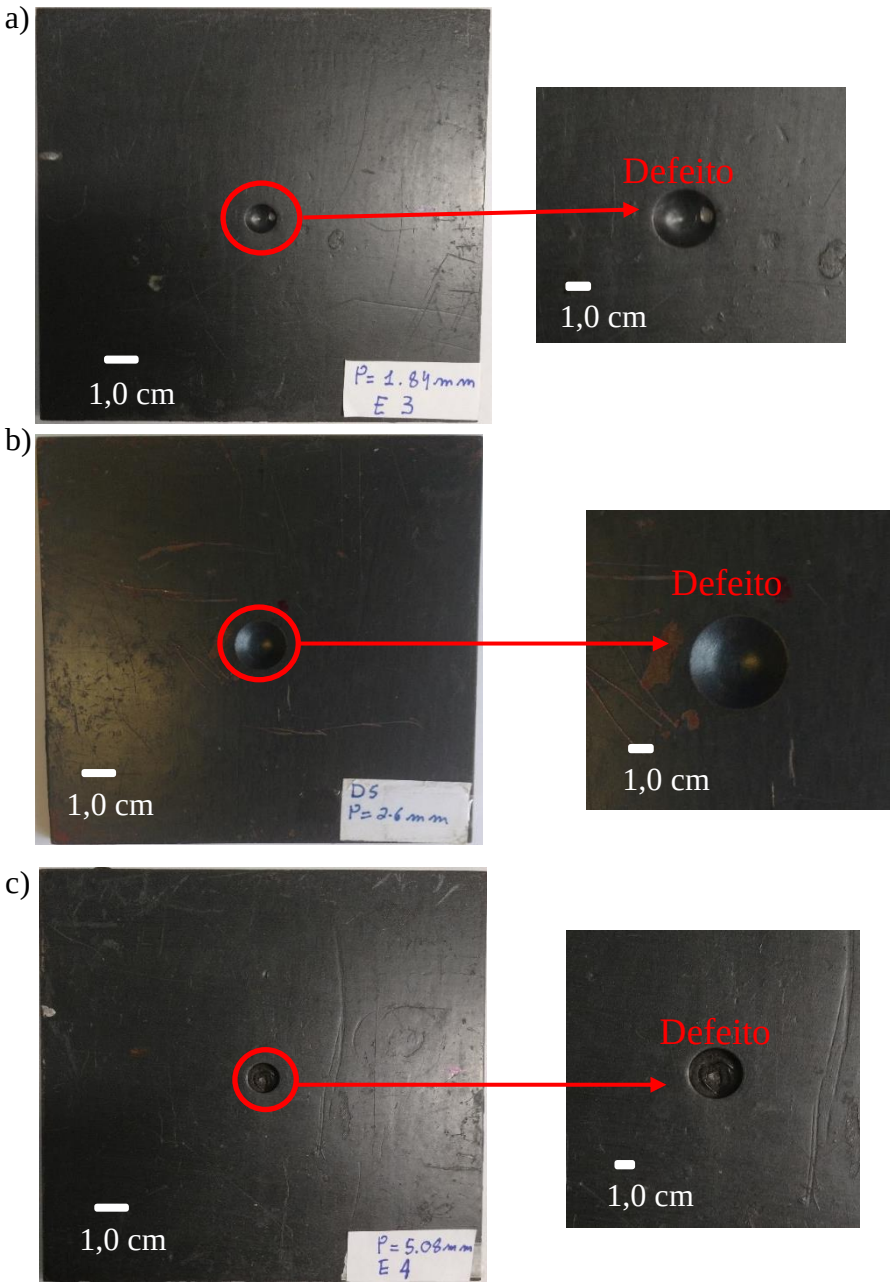

Figura 4.1: Primeiro grupo de placas, onde P é a profundidade dos defeitos, (a) Placa E3, (b) Placa E4, (c) Placa D5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

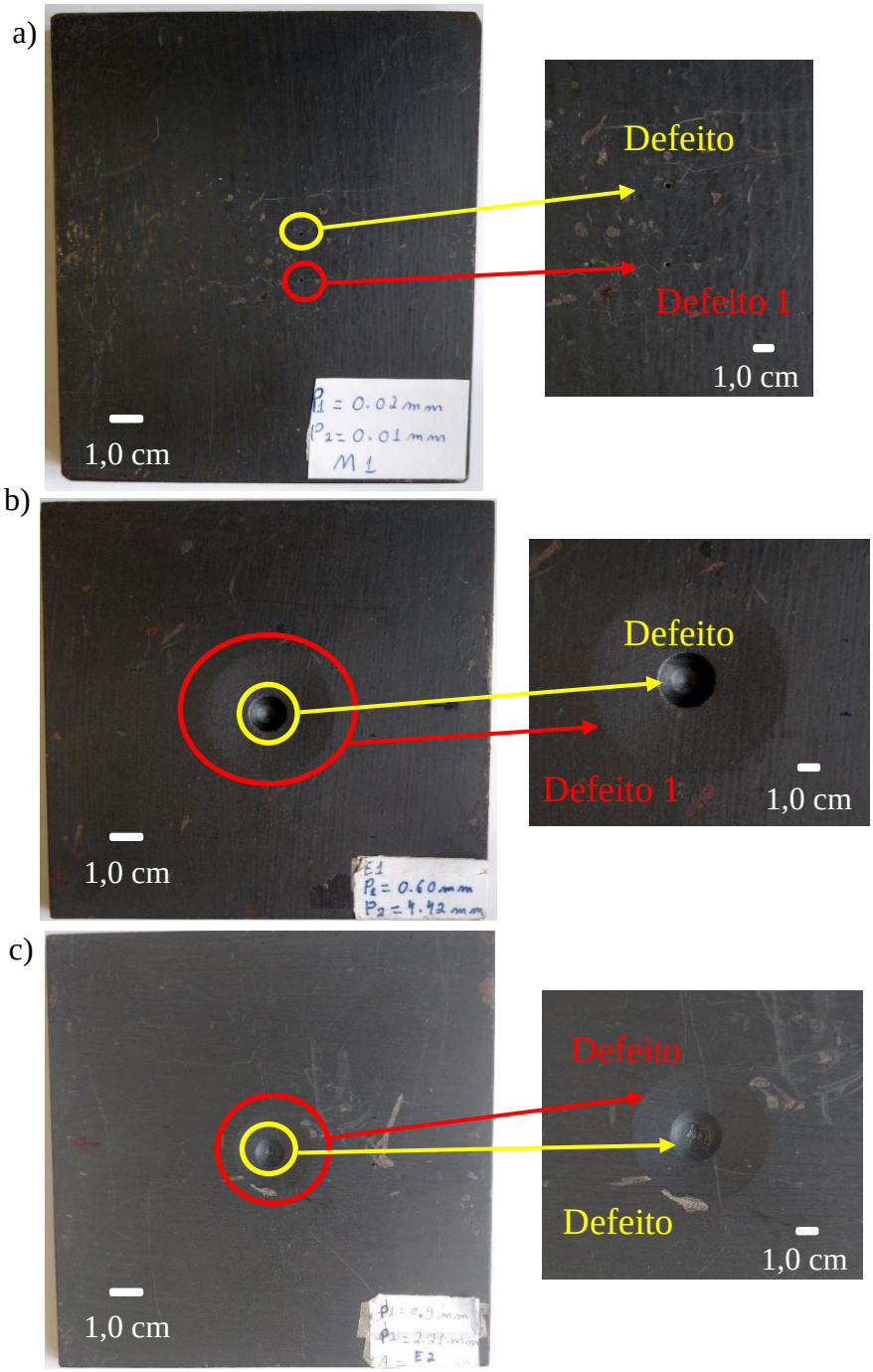

Figura 4.2: Segundo grupo de placas, onde P é a profundidade dos defeitos, (a) Placa M1, (b) Placa E1, (c) Placa E2.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

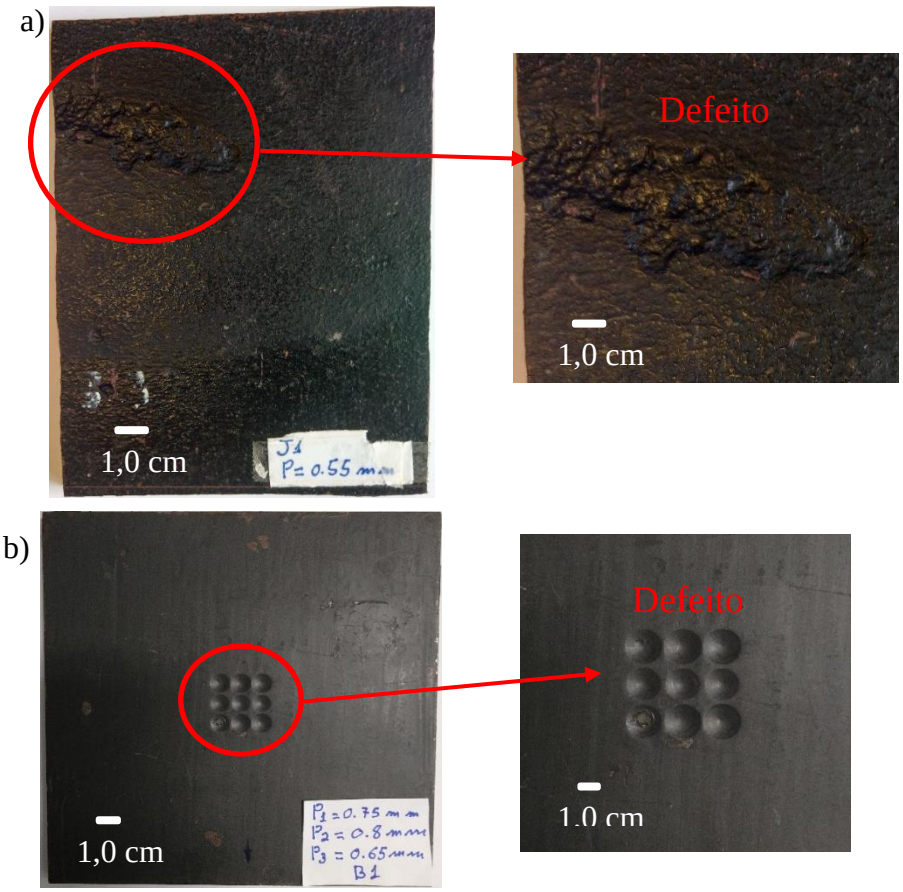

Figura 4.3: Terceiro grupo de placas, onde P é a profundidade do defeito, (a) Placa J1, (b) Placa B1.

Medimos as profundidades desses pits (defeitos) utilizando um relógio apalpador da marca Mitutoyo modelo horizontal 513-404-10T com resolução de 0,01 mm. As tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 apresentam respectivamente, as profundidades dos defeitos das placas do primeiro, segundo e terceiro grupo. A seguir apresentamos a tabela 4.1, referente as placas do primeiro grupo e suas respectivas profundidades.

Placa	Profundidade
E3	1,84 mm
D5	2,6 mm
E4	5,08 mm

Tabela 4.1: Placas e profundidade do primeiro grupo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Na sequência, a tabela 4.2, exibe as placas do segundo grupo e a profundidade de seus defeitos, onde Profundidade 1 é a profundidade do primeiro defeito e Profundidade 2 é a profundidade do segundo defeito.

Placas	Profundidade 1	Profundidade 2
M1	0,01 mm	0,02 mm
E1	0,60 mm	4,42 mm
E2	0,9 mm	2,21 mm

Tabela 4.2: Placas e profundidade do segundo grupo.

Como a placa J1 não tem uma profundidade uniforme na região do defeito, medimos em três pontos como mostra a figura 4.4. Nesta figura, P1 é o ponto de menor profundidade, P2 é a profundidade intermediária presente na região de pit e P3 é a maior profundidade. A figura 4.5, apresenta a placa B1 com as identificações de cada defeito, onde D representa defeito e o número sua identificação.

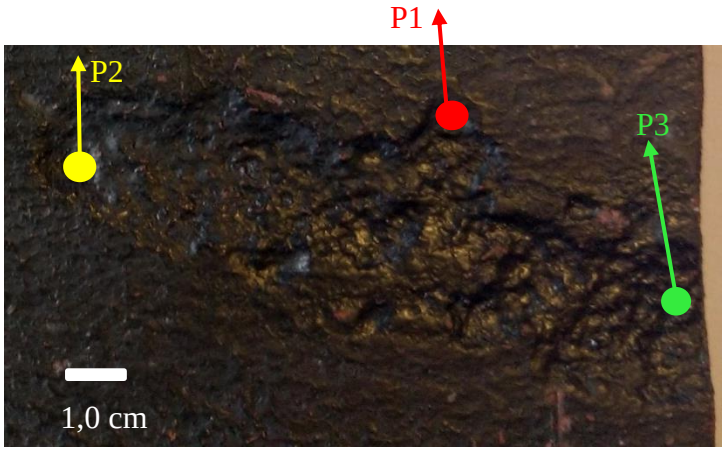

Figura 4.4: Placa J1 com identificação de pontos de medida de profundidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

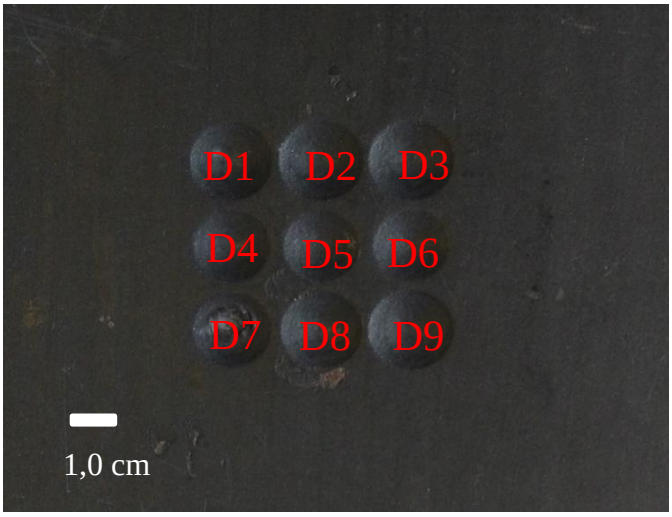

Figura 4.5: Placa B1 com identificação dos defeitos.

Finalmente, apresentamos na tabela 4.3 as placas J1 e B1, do terceiro grupo, com as respectivas profundidades de seus defeitos. Na tabela, P representa profundidade e o número representa a identificação do defeito, ou para o caso da placa J1, representa o ponto onde foi medida a profundidade do defeito (Veja figura 4.4).

Placa	P1 (mm)	P2 (mm)	P3 (mm)	P4 (mm)	P5 (mm)	P6 (mm)	P7 (mm)	P8 (mm)	P9 (mm)
J1	0.40	0.75	0.87	----	----	----	----	----	----
B1	0.72	0.75	0.73	0.63	0.64	0.63	0.86	0.75	0.77

Tabela 4.3: Placas e profundidade do terceiro grupo.

4.2. Uniformidade de magnetização das placas

Como nosso objetivo nas medidas magnéticas das placas de aço SAE 1020 é identificar os defeitos dessas placas e estimar suas profundidades, realizamos primeiramente a medida de uniformidade de magnetização dessas placas (placa inteira). Essa medida consiste em zerar os sensores em uma região afastada da placa e em seguida realizar a medida (mapeamento) de toda a área da placa, através do mapa magnético obtido após essa medida, é possível identificar as regiões da placa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

que apresentam magnetização uniforme. Esse procedimento foi realizado para os dois sistemas de leitura construídos no laboratório.

Para o primeiro sistema de medida (sistema que utiliza um Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950) a figura 4.6 apresenta o mapa referente a medida de uniformidade de magnetização da placa D5 (placa inteira).

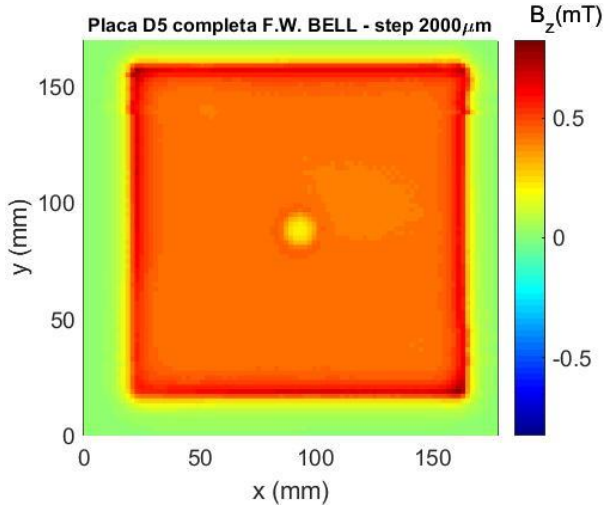

Figura 4.6: Mapa completo da placa D5 obtido através do primeiro sistema de medida.

Como pode ser visto na figura 4.6, a placa apresenta uma uniformidade de magnetização entre as bordas e o defeito, como era esperado na região do defeito há um valor de campo magnético induzido menor do que na maior parte da placa, esse fato ocorre devido à ausência de material na região do defeito e segundo o conceito de magnetização de David Jiles (2015), a magnetização é o momento magnético por unidade de volume. Logo, é coerente que haja um menor valor de campo magnético induzido na região do defeito.

Após verificar a uniformidade de magnetização das placas escolhemos um ponto entre o defeito e as bordas para zerar o sensor, na sequência realizamos a medida do defeito efetuando o mapeamento em uma região menor centralizando o defeito, como pode ser visto na figura 4.7. Demais mapas magnéticos dos defeitos e suas respectivas discussões serão apresentados nas seções 4.3.1 a 4.3.3.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

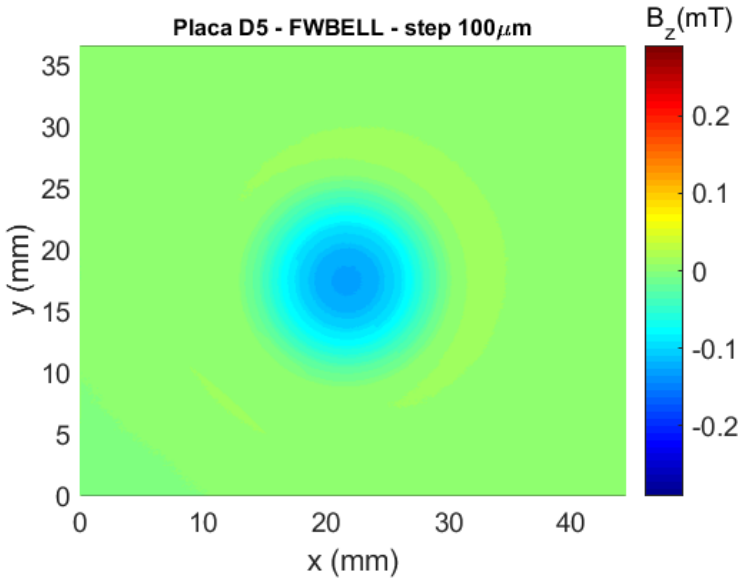

Figura 4.7: Mapa magnético do defeito da placa D5 obtido com F.W. BELL 9950.

Os resultados apresentados nas figuras 4.6 e 4.7 confirmam que nosso procedimento de zerar os sensores em uma região entre as bordas e os defeitos permite um melhor resultado na identificação desses defeitos das placas de aço SAE 1020.

Apresentamos, também, os resultados da medida realizada com o segundo sistema de medida (sistema gradiométrico), onde a figura 4.8 exibe o mapa magnético da medida de magnetização uniforme da placa D5.

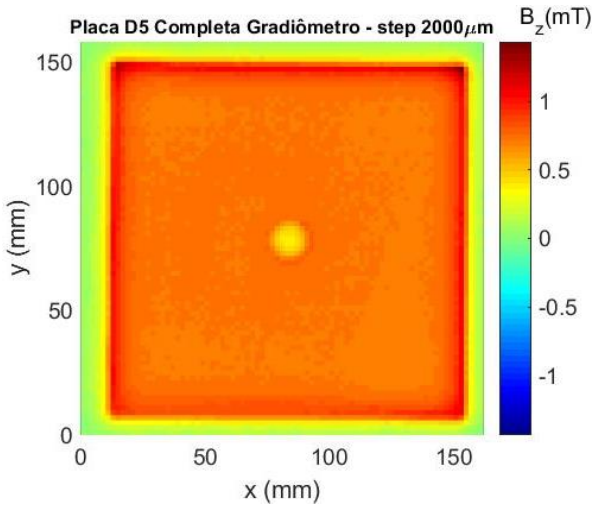

Figura 4.8: Mapa magnético da placa D5 obtido através do segundo sistema de medida.

Com o segundo sistema de leitura, também, identificamos uma uniformidade de magnetização da placa entre as bordas e o defeito, onde nessa

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

região do defeito percebe-se também um menor valor de campo magnético induzido, devido à ausência de material nessa região e o conceito de magnetização discutido anteriormente. Contudo, observa-se também que a medida realizada pelo sistema gradiométrico apresenta maior ruído no seu mapa magnético quando comparado com o mapa magnético obtido pelo primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950), sobretudo na região entre as bordas e o defeito.

Para o segundo sistema de medida (gradiômetro) repetimos o procedimento de zerar os sensores entre o defeito e as bordas para realizarmos o mapeamento magnético do defeito, como pode ser visto na figura 4.9.

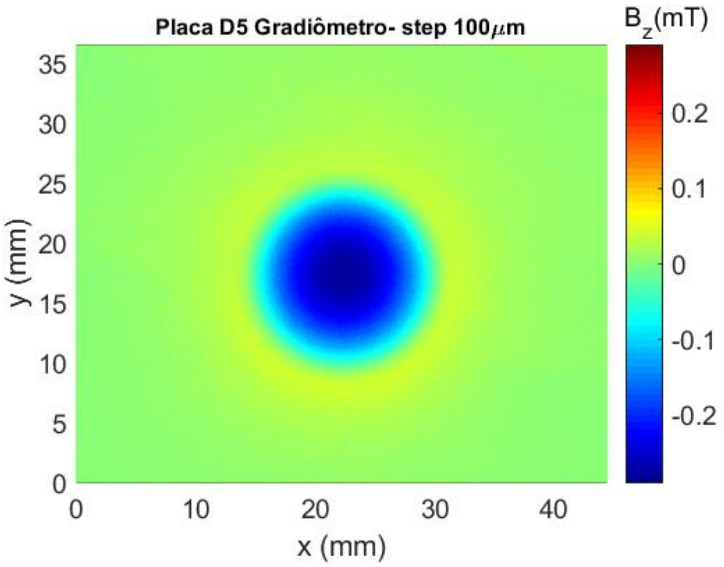

Figura 4.9: Mapa magnético do defeito da placa D5 obtido através do segundo sistema de medida.

Destaca-se, ainda, que os dois sistemas identificaram a magnetização uniforme das placas, o sistema utilizando o Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950 exibe mapas magnéticos menos ruidosos, enquanto o segundo sistema de medida utilizando o gradiômetro exibe mapas mais ruidosos. Mesmo assim, observa-se uma coerência entre os resultados apresentados, visto que ambos expõem a magnetização uniforme das placas, dessa forma esses resultados confirmam que nosso procedimento de zerar os sensores em uma região entre as bordas e os defeitos permite um melhor resultado na identificação desses defeitos das placas de aço SAE 1020 utilizadas nesse trabalho.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4.3.
Mapas magnéticos

Apresentamos nessa seção os mapas magnéticos das placas de aço SAE 1020 obtidos com os dois sistemas de leitura, o primeiro sistema construído utilizando um equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950 e o segundo sistema construído utilizando um sistema gradiométrico, como descrito nas seções 3.6.1 e 3.6.2, respectivamente. A partir dos mapas magnéticos podemos analisar a eficácia dos dois sistemas de medida no que se refere à identificação dos defeitos nas placas, a relação do diâmetro de sensibilidade dos sensores com a qualidade do mapa magnético e a identificação desses defeitos, comparar a sensibilidade dos dois sistemas de medidas e estimar a profundidade dos defeitos presentes nas placas. Os mapas exibidos a seguir, estão divididos pelo número de defeitos presentes nas placas seguindo a classificação exposta na seção 4.0.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4.3.1.
Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com um defeito

Nessa seção discutiremos os resultados exibidos nos mapas magnéticos para o primeiro grupo de placas de aço SAE 1020 (Veja tabela 4.1), obtidos a partir dos dois sistemas de leitura construídos no laboratório. As figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam os mapas magnéticos das placas de aço SAE 1020 com um único defeito (E3, D5, E4).

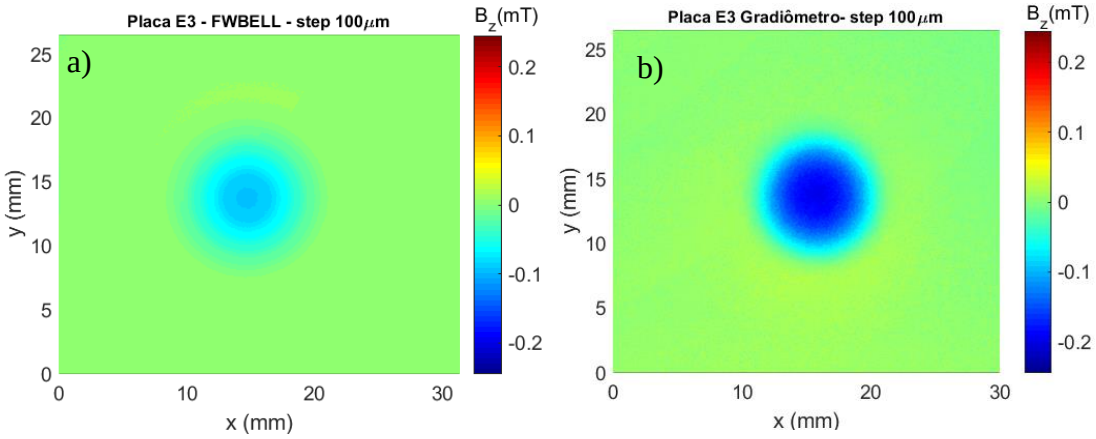

Figura 4.10: Mapa magnético do defeito da placa E3 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro)

Nota-se a partir da figura 4.10 que os dois sistemas de medida identificaram os defeitos na placa E3, contudo observa-se que o primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) (figura 4.10 (a)) apresenta um mapa magnético onde é mais perceptível o defeito, já que esse mapa magnético é menos ruidoso quando comparado com o mapa magnético do segundo sistema de medida (gradiômetro) (figura 4.10 (b)).

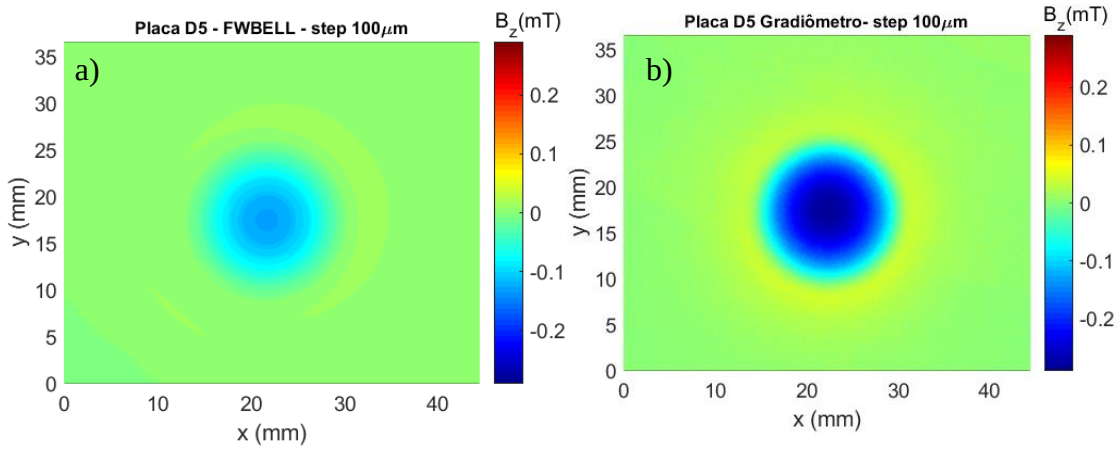

Figura 4.11: Mapa magnético do defeito da placa D5 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro)

A partir da figura 4.11, além da identificação do defeito da placa D5, nota-se que o mapa magnético obtido através do primeiro sistema de leitura (figura 4.11 (a)) ainda é ligeiramente melhor que o mapa magnético obtido a partir do segundo sistema de leitura (figura 4.11 (b)). Contudo, destaca-se que para o caso do defeito da placa D5 que é mais profundo que o defeito da placa E3, anteriormente analisada, o mapa magnético obtido com o gradiômetro (figura 4.11 (b)) permite uma boa identificação do defeito, perdendo para o mapa obtido com o primeiro sistema de medida somente devido à presença de ruído na coroa azulada em volta da região do defeito. Verifica-se, ainda, que o ruído presente no mapa magnético para esse defeito mais profundo é menor quando comparado com o mapa magnético do defeito da placa E3 (figura 4.11 (b)).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

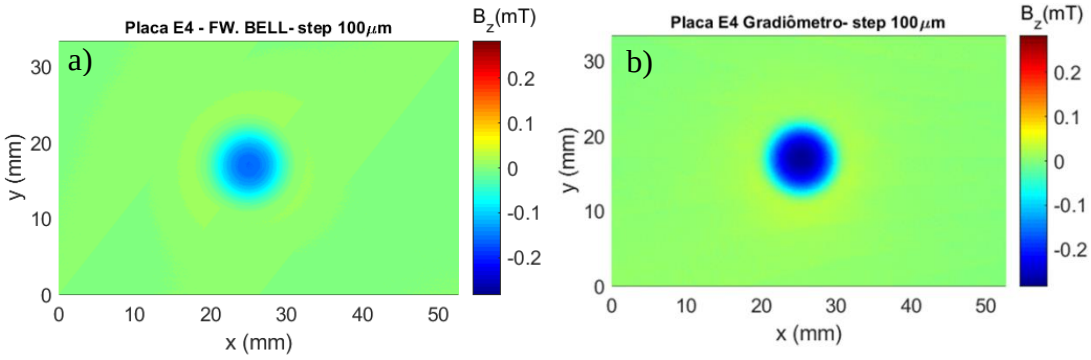

Figura 4.12: Mapa magnético do defeito da placa E4 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro)

A partir da figura 4.12, percebe-se que os dois sistemas de medida identificaram o defeito da placa E4. Para essa placa que tem a maior profundidade entre as placas do primeiro grupo, nota-se que os mapas magnéticos do primeiro sistema de medida (figura 4.12 (a)) e do segundo sistema de medida (figura 4.12 (b)) são equivalentes, de modo que é possível identificar o defeito a partir dos dois mapas de maneira clara. Dessa forma, para essa placa o defeito é bem perceptível nos dois mapas magnéticos, mesmo sendo perceptível um pequeno ruído aparente na coroa azulada próximo a região do defeito no mapa magnético do segundo sistema de medida (figura 4.12 (b)).

Para o primeiro grupo de placas (Veja a tabela 4.1), nota-se que os dois sistemas de medida foram eficientes em identificar os defeitos dessas placas e percebe-se que ao aumentar a profundidade dos defeitos das placas o segundo sistema de medida (gradiômetro) se equipara, no que se refere à qualidade dos mapas magnéticos, com o primeiro sistema de medida (F.W BELL 9950). Ou seja, o gradiômetro construído no laboratório é equivalente ao equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950 na identificação de defeitos únicos mais profundos.

Em todos os mapas magnéticos há uma diferença no valor de campo magnético que pode ser explicada pelo fato dos sensores estarem encapsulados a diferentes distâncias, no caso do gaussímetro F.W. BELL modelo 9950 a distância do sensor até a superfície do encapsulamento é de 15.24 mm (Manual Probe F.W. BELL 9950) e no caso do gradiômetro a distância do sensor a superfície marcada é de 0.39 mm (Manual Melexis sensor 90215).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4.3.2.
Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com dois defeitos

Nessa seção discutiremos os resultados exibidos nos mapas magnéticos para o segundo grupo de placas de aço SAE 1020 (Veja tabela 4.2), obtidos a partir dos dois sistemas de leitura construídos no laboratório. As figuras 4.13 a 4.18 apresentam os mapas magnéticos das placas de aço SAE 1020 com dois defeitos (M1, E1, E2).

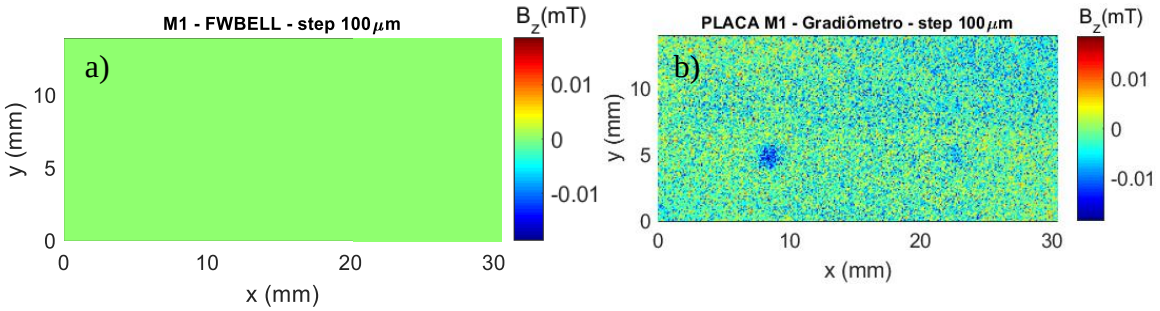

Figura 4.13:Mapa magnético dos defeitos da placa M1 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro)

Da (figura 4.13 (a)) observa-se que o primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) não conseguiu identificar os dois defeitos presentes na placa M1, enquanto o segundo sistema de medida (gradiômetro) mesmo com a presença de ruídos foi possível identificar os dois defeitos. Esse resultado positivo na identificação dos dois defeitos pode ser explicado pelo diâmetro de sensibilidade dos sensores, uma vez que o sensor da probe tem um diâmetro de sensibilidade de 1520 µm, enquanto o sensor MLX 90215 utilizado no gradiômetro tem um diâmetro de sensibilidade de 280 µm. Mostrando que o sistema de leitura construído no laboratório utilizando o gradiômetro, neste caso, é mais eficaz do que o sistema de leitura utilizando o equipamento comercial F.W. BELL 9950.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

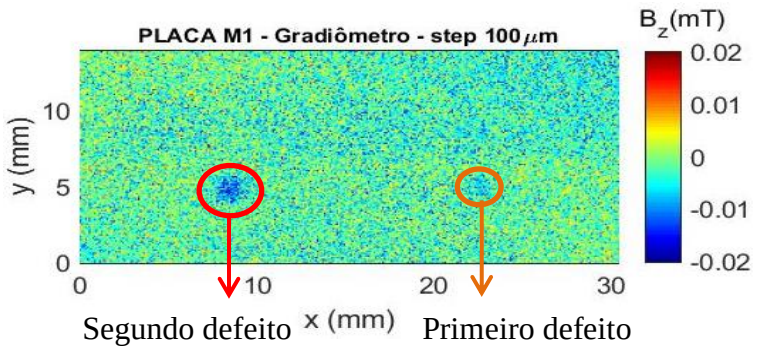

Figura 4.14: Destaque dos defeitos da placa M1 identificados pelo gradiômetro.

Como conhecemos a superfície da placa e a localização dos defeitos podemos afirmar que a região marcada na figura 4.14 é o primeiro defeito, o que corrobora para essa afirmação é a forma (que se aproxima da geometria circular do defeito) e a localização dessa região marcada, os outros pontos de cor azul no mapa magnético não apresentam a mesma forma e se comportam como ruído.

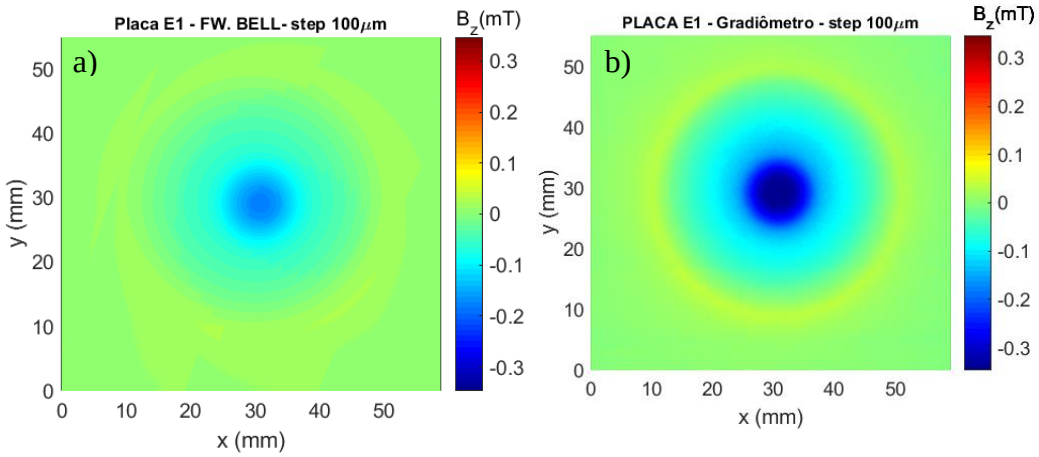

Figura 4.15:Mapa magnético dos defeitos da placa E1 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro)

A partir da figura 4.15, nota-se que os dois sistemas de medida identificaram os defeitos da placa E1, contudo o mapa magnético obtido a partir do primeiro sistema de medida (figura 4.15 (a)) permite a visualização dos defeitos com maior clareza, atribuímos duas regiões do mapa magnético aos dois defeitos como pode ser visto na figura 4.16, sendo a primeira coroa referente ao primeiro defeito e o ponto de maior intensidade de campo magnético o segundo defeito.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

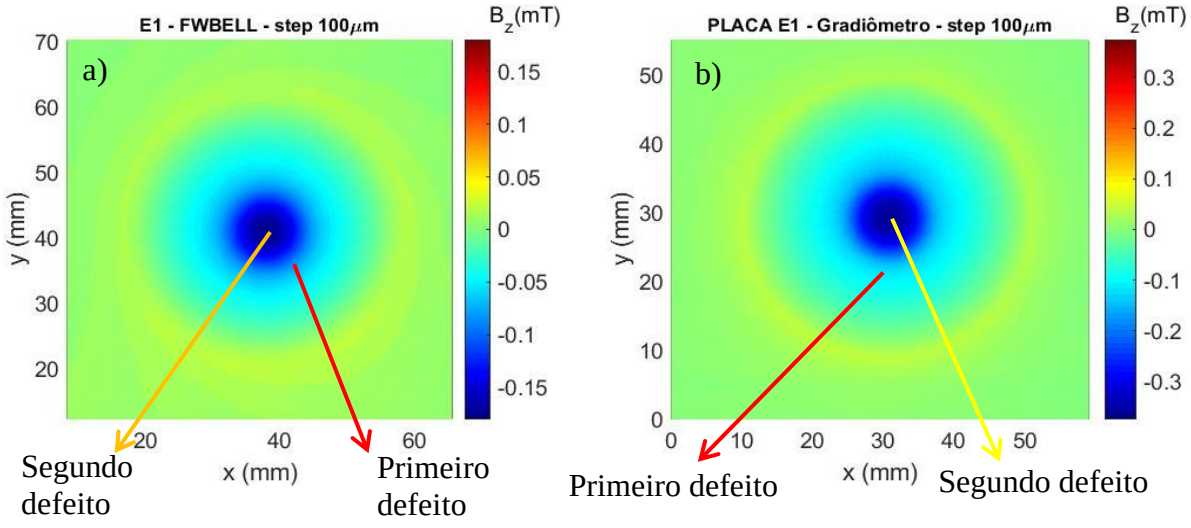

Figura 4.16: Mapa magnético dos defeitos da Placa E1 com identificação dos defeitos, obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro).

Isto está coerente com o fato de que o primeiro defeito é de menor profundidade e o segundo defeito de maior profundidade (Veja tabela 4.2). Dito isso, é perceptível que o mapa obtido com o segundo sistema de medida (figura 4.16 (b)) apresenta um ruído visível e que por esse motivo torna-se relativamente dificultoso identificar com clareza o primeiro defeito da placa E1.

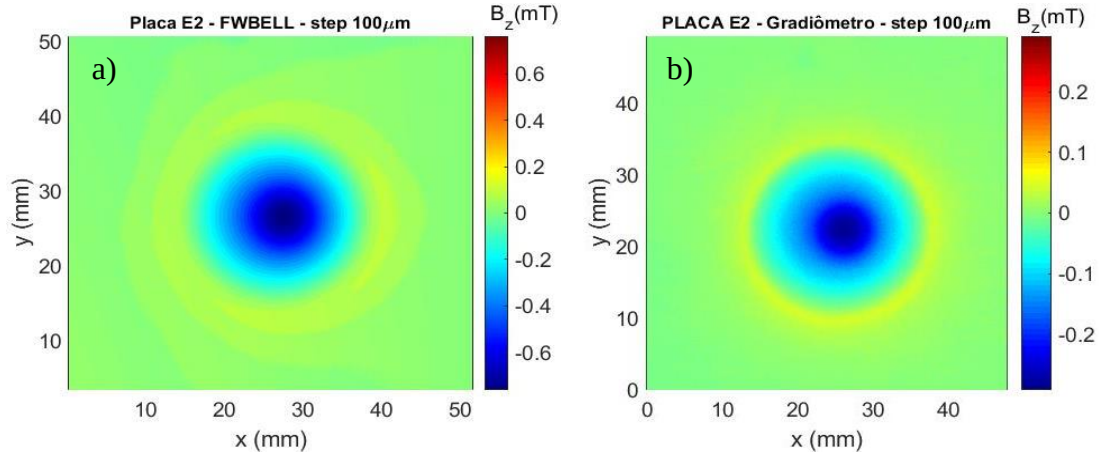

Figura 4.17: Mapa magnético dos defeitos da placa E2 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro).

Observa-se na figura 4.17 que os dois sistemas de medida identificaram os dois defeitos da placa E2. Nota-se que o mapa magnético obtido a partir do primeiro sistema de medida (figura 4.17 (a)) permite com maior clareza a identificação dos dois defeitos do que o mapa magnético obtido com segundo sistema de medida

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

(figura 4.17 (b)). Contudo, quando utilizamos o mapa magnético obtido com o gradiômetro (figura 4.17 (b)) para compararmos a identificação do primeiro defeito das placas E1 e E2 observa-se que para a placa E2 que tem o primeiro defeito mais profundo que a placa E1 (Veja tabela 4.2), o primeiro defeito é razoavelmente bem identificado pelo gradiômetro para essa placa (E2), inclusive se comparado com o mapa magnético obtido com o F.W BELL modelo 9950, onde o mapa magnético obtido com o gradiômetro fica aquém somente pelo ruído aparente no mapa.

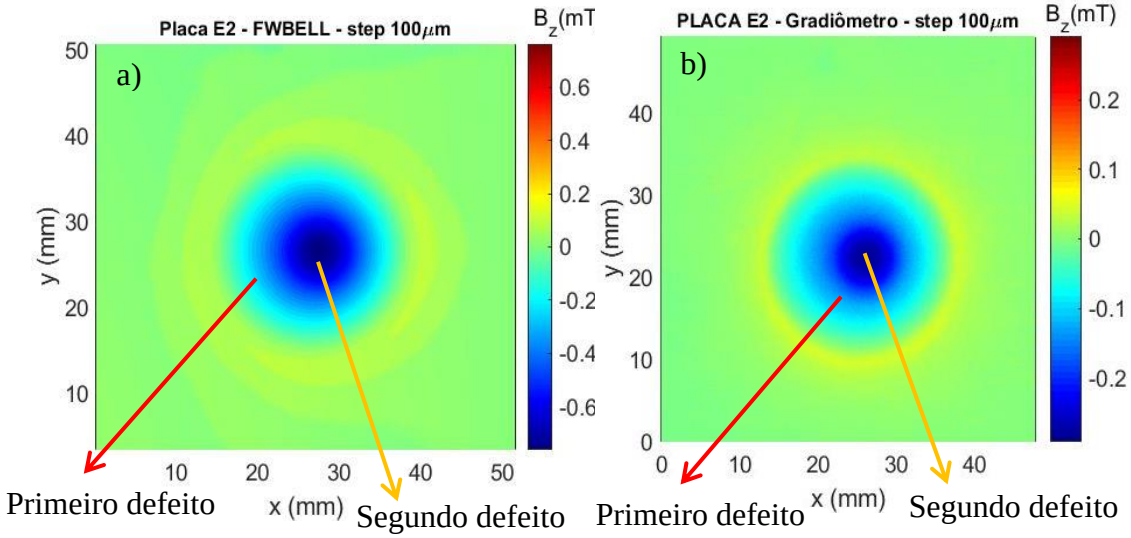

Figura 4.18: Mapa magnético do defeito da Placa E2 com identificação dos defeitos, obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro).

Dessa forma, observa-se que para todas as placas medidas de dois defeitos (Veja tabela 4.2), o primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) não foi perfeitamente eficaz na identificação de todos os defeitos. O primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) apresenta uma vantagem no que se refere à nitidez do primeiro defeito nos mapas magnéticos das placas E1 e E2, porém quando a profundidade do defeito aumenta o segundo sistema de medida (gradiômetro) tende a tornar-se comparável com o primeiro (F.W. BELL 9950). Destaca-se ainda, que para a placa M1 o primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) não foi capaz de identificar nenhum dos dois defeitos, enquanto o gradiômetro (segundo sistema de medida) construído no laboratório foi capaz de identificar os dois defeitos mesmo com a presença de ruídos, como citado anteriormente isso se deve ao fato que o diâmetro de sensibilidade dos sensores de efeito Hall MLX 90215 do gradiômetro construído no laboratório terem um diâmetro de sensibilidade menor que o diâmetro

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

de sensibilidade do sensor de efeito Hall da probe (F.W. BELL 9950), onde valem respectivamente para o gradiômetro e para a probe 280 µm e 1520 µm.

Desse modo, observou-se uma vantagem do gradiômetro (segundo sistema de medida) em relação ao F.W. BELL 9950 (primeiro sistema de medida) na identificação de defeitos de pequenas dimensões com profundidades de 0.02 mm e 0.01 mm, para o primeiro e segundo defeito, respectivamente, com raios de aproximadamente 0.5 mm e 0.45 mm, para o primeiro e segundo defeito, respectivamente. Essa vantagem do gradiômetro é extremamente importante para medidas magnéticas em materiais utilizados na indústria, uma vez que a sensibilidade desse equipamento permite a identificação de defeitos ainda no início da sua formação. Dessa forma, esse equipamento pode ser utilizado para inspeção de placas de aço utilizadas na indústria. A inspeção tem o objetivo de identificar a condição de desgaste desses materiais, sendo assim, o sistema gradiométrico construído no laboratório é eficaz para pesquisa científica e aplicação na indústria.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

4.3.3. Mapas magnéticos das placas SAE 1020 com um defeito aleatório e nove defeitos

Nessa seção discutiremos os resultados exibidos nos mapas magnéticos para o terceiro grupo de placas de aço SAE 1020 (Veja tabela 4.3), obtidos a partir dos dois sistemas de leitura construídos no laboratório. As figuras 4.19 e 4.20 apresentam os mapas magnéticos das placas de aço SAE 1020 com nove defeitos B1 e com defeitos aleatórios J1.

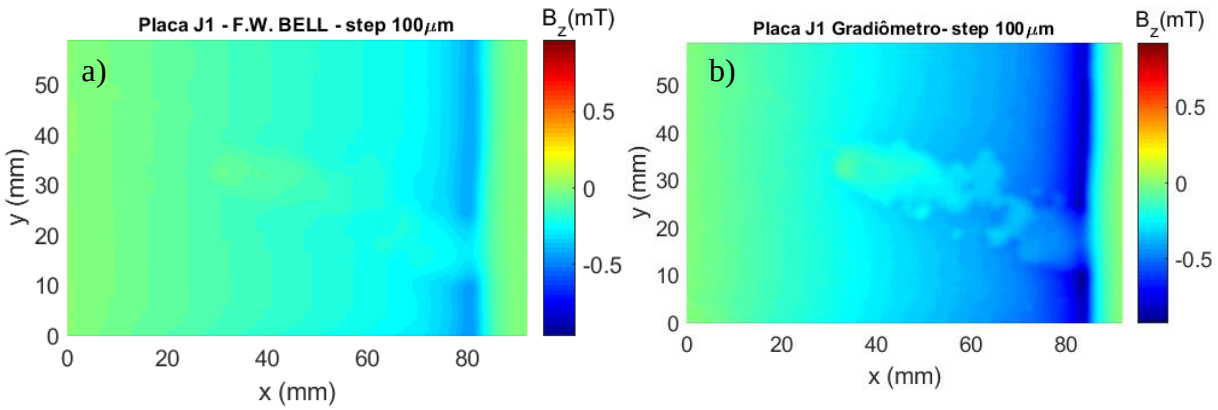

Figura 4.19: Mapa magnético do defeito aleatório da placa J1 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro).

Da figura 4.19 (b) nota-se que o gradiômetro (segundo sistema de medida) identifica com perfeita clareza o defeito aleatório da placa J1 (Veja a figura 4.4) quando comparado com o primeiro sistema de medida (F.W BELL 9950) (figura 4.19 (a)). Com o gradiômetro construído no laboratório é possível identificar toda a geometria do defeito com clareza, inclusive os pontos P1, P2 e P3 (Veja a figura 4.4). A identificação completa do defeito e sua geometria são fundamentais, pois em uma possível inspeção dessas placas, uma identificação imperfeita ou equivocada de defeitos pode levar a decisões erradas no que se refere a operacionalidade dessas, de modo que isso pode pôr em risco trabalhadores e estruturas físicas (Pacheco; Bruno, 2013).

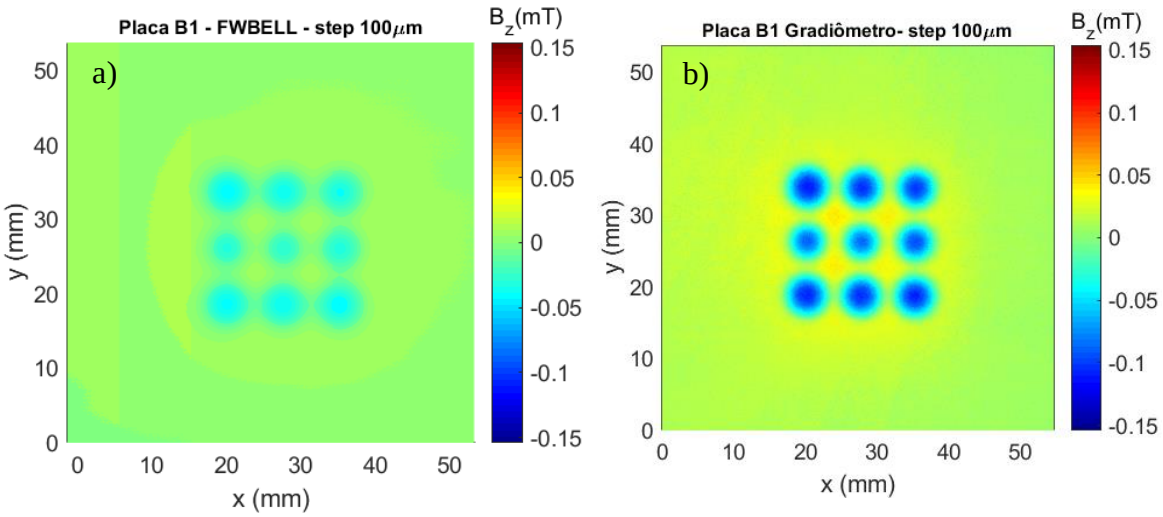

Figura 4.20: Mapa magnético do defeito da placa B1 obtido a partir do (a) primeiro sistema de medida (F.W. BELL 9950) e (b) segundo sistema de medida (gradiômetro).

A partir da figura 4.20 percebe-se que os dois sistemas de medida identificaram os nove defeitos da placa B1. Constata-se também, que o gradiômetro construído no laboratório (segundo sistema de medida) identificou com perfeita clareza a geometria dos nove defeitos (figura 4.20 (b)), enquanto que o mapa magnético obtido com F.W. BELL (primeiro sistema de medida) (figura 4.20 (a)) apresenta falhas na identificação da geometria dos defeitos D1, D2, D6, D7 e D8 (Veja figura 4.5), no mapa magnético obtido a partir desse primeiro sistema de medida (figura 4.20 (a)), há a impressão que os defeitos mencionados estão ligados, o que é incorreto, como pode ser visto na figura 4.5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Os mapas magnéticos obtidos a partir do gradiômetro (segundo sistema de medida) (figuras 4.19 (b) e 4.20 (b)), apesar de apresentarem ruído, são perfeitamente comparáveis aos mapas magnéticos obtidos com o F.W. BELL 9950 (primeiro sistema de medida) (figuras 4.19 (a) e 4.20 (a)), inclusive são melhores no que se refere à identificação da geometria do defeito, essa vantagem do gradiômetro é importante para a utilização desse equipamento na identificação de defeitos em placas utilizadas na indústria. Conhecer a geometria do defeito é importante para saber se a placa defeituosa ainda pode continuar em uso sem colocar em risco a operação da estrutura ou as pessoas que trabalham com esse material. Outro essencial parâmetro para saber se a placa defeituosa pode continuar em uso é a profundidade desse defeito, para isso é crucial conhecer sua geometria, uma vez que a conhecendo bem é possível escolher o melhor modelo teórico para estimar a profundidade real desse defeito.

O equipamento de varredura construído no laboratório é capaz de identificar em uma mesma região defeitos com diferentes profundidades, como foi discutido na seção 4.3.2 e nessa seção (4.3.3), uma vez que nessa seção, o equipamento e em especial o gradiômetro, identificou toda a geometria do defeito e os diferentes pontos de profundidade do defeito da placa J1 (Veja tabela 4.3) e (Veja figura 4.4).

Dessa forma, para o defeito aleatório e diversos defeitos muito próximos o gradiômetro construído no laboratório (segundo sistema de medida) é mais eficaz do que o F.W. BELL 9950 (primeiro sistema de medida) na identificação da geometria do defeito, se demonstrando mais apropriado para uso em ensaios magnéticos não destrutivos. Além desse importante argumento, o fato de o sistema gradiométrico (segundo sistema de medida) ser mais versátil, de fácil transporte, de menor dimensão e de menor custo facilita o uso desse em possíveis ensaios magnéticos não destrutivos in loco. Esses ensaios são vantajosos pois preservam o material uma vez que não necessita o desmonte ou o corte do material para estudo.

4.4. Relação sinal-ruído

Ruído é qualquer sinal indesejado que afeta a medida, dessa forma um espectro de sinal-ruído permite relacionar a potência de um sinal recebido por um receptor, por exemplo, um sensor, com o sinal efetivo do ruído.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

A partir de um espectro que exibe a relação sinal-ruído analisamos a sensibilidade dos sensores utilizados nos dois sistemas de medida, no primeiro sistema um sensor de efeito Hall referente ao fluxo magnético Bz em uma probe do Gaussímetro F.W. BELL modelo 9950. No segundo sistema de medida um gradiômetro constituído de dois sensores de efeito Hall da marca Melexis modelo MLX 90215.

Para obter o espectro sinal-ruído do gradiômetro com e sem a placa de circuito e do equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950, utilizamos uma fonte de corrente da marca Keithley modelo 6221, um par de bobina de Helmholtz e um analisador de espectro da marca Stanford Research Systems modelo SR760. A fonte de corrente forneceu para o par de Helmholtz uma corrente de 105 mA a uma frequência de 4 Hz que gerou um campo magnético de 75,6 μT.

A figura 4.21 apresenta um diagrama de bloco referente ao processo de medida da relação sinal-ruído do gradiômetro sem a placa de circuito e do equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950. A figura 4.22 apresenta o diagrama de bloco da medida da relação sinal-ruído do gradiômetro com a placa de circuito.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

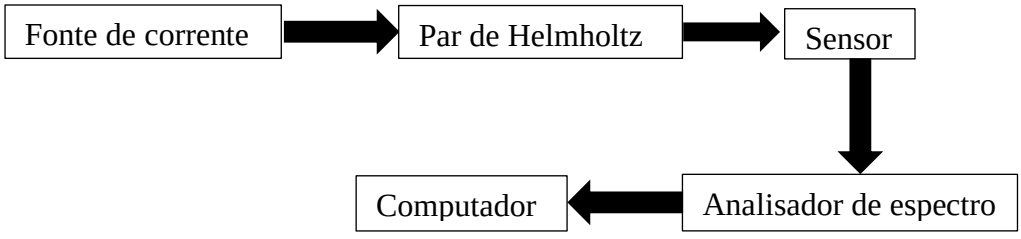

Figura 4.21: Diagrama de blocos do procedimento de medida da relação sinal-ruído para o gradiômetro sem placa de circuito e o F.W. BELL.

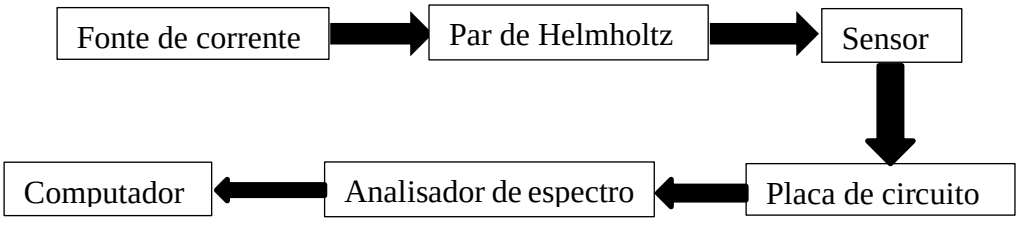

Figura 4.22: Diagrama de blocos do procedimento de medida da relação sinal-ruído para o gradiômetro com a placa de circuito.

A figura 4.23 exibe o espectro sinal-ruído do gradiômetro com a placa de circuito construída para atenuar o ruído (linha preta), sem a placa de circuito (linha vermelha) e a relação sinal-ruído do equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950 (linha azul). Onde, na legenda do gráfico, “Grad” refere-se a gradiômetro.

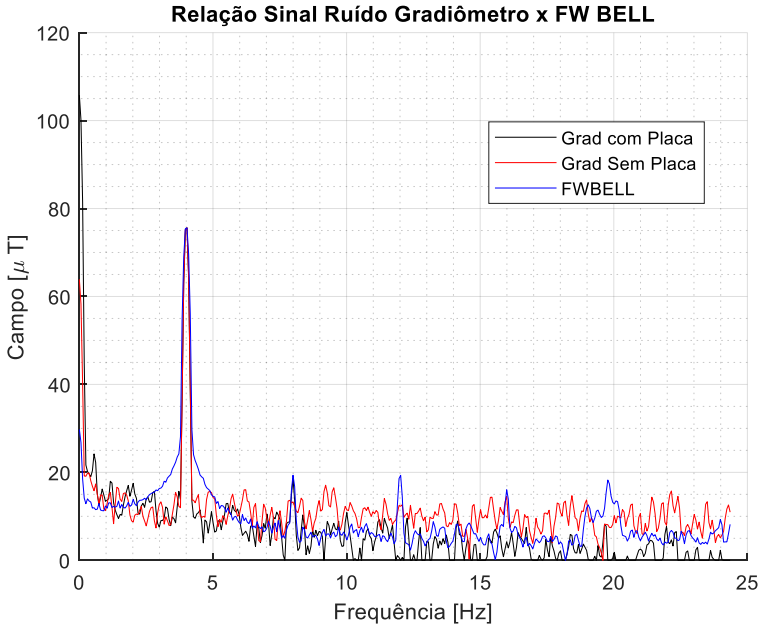

Figura 4.23: Espectros de sinal-ruído do gradiômetro com e sem a placa e do equipamento comercial F.W. BELL modelo 9950.

Nota-se a partir da figura 4.23 que o F.W. BELL modelo 9950 tem uma melhor relação sinal-ruído quando comparado com o gradiômetro construído no laboratório, contudo observa-se, também, que a placa de circuito é eficaz na atenuação do ruído como pode ser visto figura 4.23, ou seja, a placa de circuito construída no laboratório melhora a sensibilidade de detecção do gradiômetro significativamente, de modo que a relação sinal-ruído do gradiômetro com a placa de circuito é melhor que a relação sinal-ruído do F.W. BELL modelo 9950.

4.3.1. Medidas magnéticas com a placa de circuito

Nesta seção apresentaremos e discutiremos os mapas magnéticos das placas de aço SAE 1020 (E1, E3, M1, B1, J1) obtidos com o gradiômetro e a placa de circuito, a escolha dessas placas para uma nova medida se deu a partir de uma

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

análise prévia de quais mapas magnéticos obtidos com o gradiômetro (segundo sistema de medida) apresentavam maior ruído. Dessa maneira, após essa análise escolhemos as placas citadas acima. Para melhorar ainda mais o sistema gradiométrico e atenuar o ruído presente nos mapas magnéticos construímos essa placa de circuito (Veja figura 3.26).

Apresentamos inicialmente o resultado da medida magnética obtida através do gradiômetro e placa de circuito da placa E3 (figura 4.24 (b)). Essa placa pertence ao primeiro grupo e contém somente um defeito (Veja tabela 4.1). Seguindo o critério de escolha citado no início desta seção, a escolha dessa placa para essa nova medida se deu pelo fato dessa apresentar maior ruído no seu mapa magnético entre as placas desse grupo.

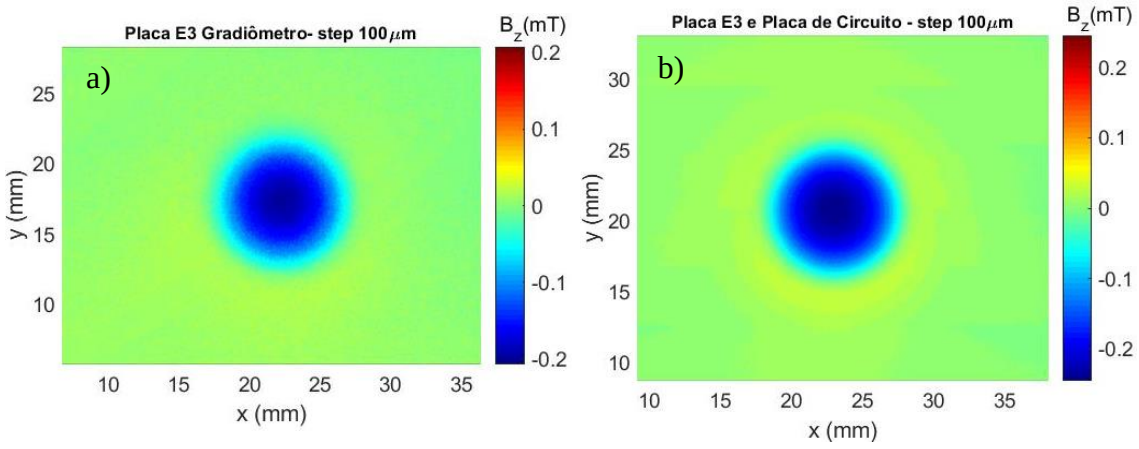

Figura 4.24: Mapas magnéticos da placa E3 obtidos a partir de (a) Gradiômetro e (b) Gradiômetro e placa de circuito.

Nota-se da figura 4.24 que para a placa E3 com somente um defeito, o mapa magnético obtido através do gradiômetro e placa de circuito atenua significativamente o ruído, dessa forma obtém-se um mapa magnético mais nítido facilitando a clara identificação do defeito e sua geometria.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

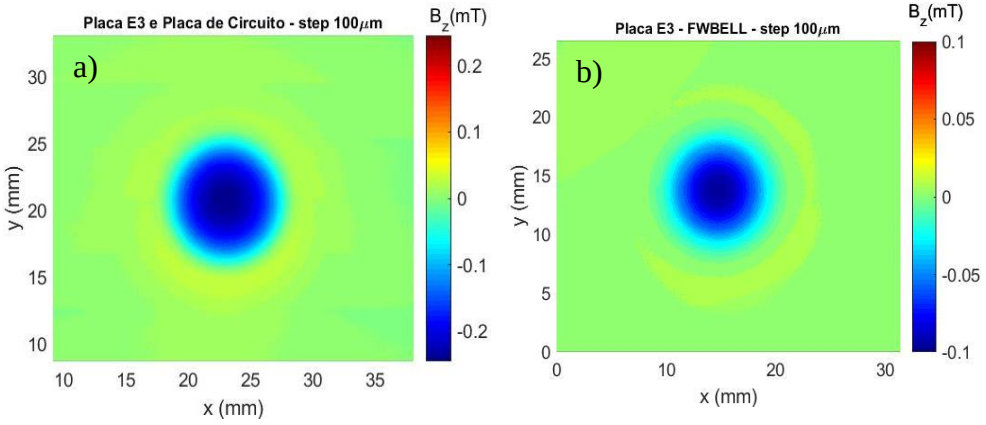

Figura 4.25: Mapas magnéticos da placa E3 obtidos a partir de (a) Gradiômetro e placa de circuito e (b) F.W. BELL 9950.

Nota-se da figura 4.25 que a identificação do defeito da placa E3 realizado com o gradiômetro e a placa de circuito se equipara a identificação desse defeito a partir do F.W. BELL 9950, nos dois mapas magnéticos (figura 4.25) é possível identificar claramente o defeito e sua geometria. Na seção 4.3.1 apresentamos resultados que apontavam para uma melhoria na identificação de defeitos mediante a profundidade desses aumentavam. Contudo, como pode ser observado na figura 4.25, com a placa de circuito associada ao gradiômetro, defeitos menos profundos podem ser claramente identificados. Isso representa uma significativa melhora na sensibilidade do gradiômetro.

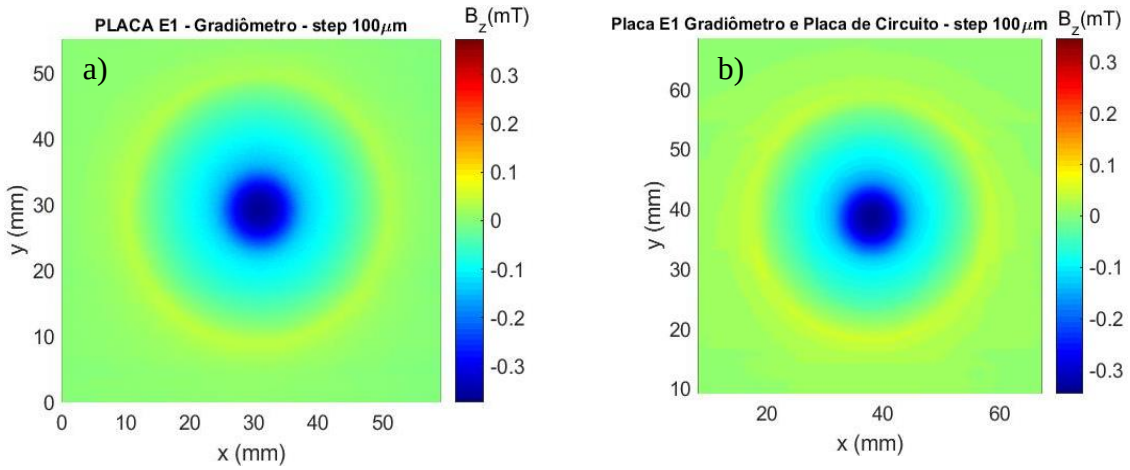

Figura 4.26: Mapas magnéticos do defeito da Placa E1 obtidos com (a) Gradiômetro e (b) Gradiômetro e Placa de Circuito.

Para a placa E1 que contém dois defeitos na mesma região com profundidade diferentes, a partir da figura 4.26 nota-se que a medida realizada com a placa de circuito melhora o mapa magnético de forma que é possível identificar

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

mais claramente o primeiro defeito dessa placa. Com a atenuação do ruído a região referente ao primeiro defeito que está destacado na figura 4.27 fica mais nítida, o que facilita, também, a identificação do segundo defeito.

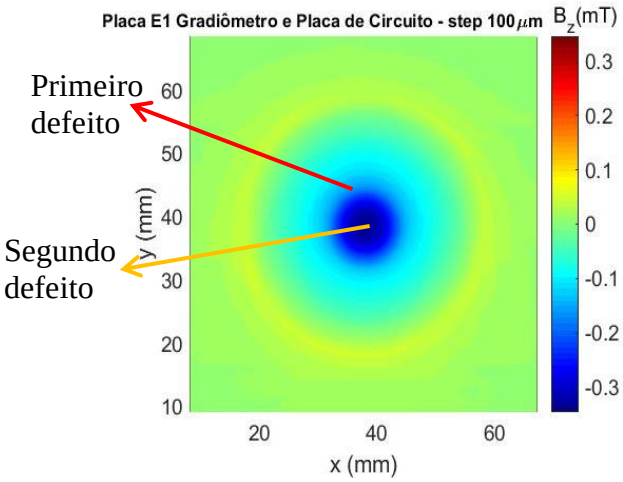

Figura 4.27: Mapa magnético com identificação dos defeitos da Placa E1

A seguir compararemos os mapas magnéticos dos defeitos da placa E1 obtidos com o gradiômetro e placa de circuito (figura 4.28 (a)) com o mapa magnético obtido a partir do F.W. BELL 9950 (figura 4.28 (b)).

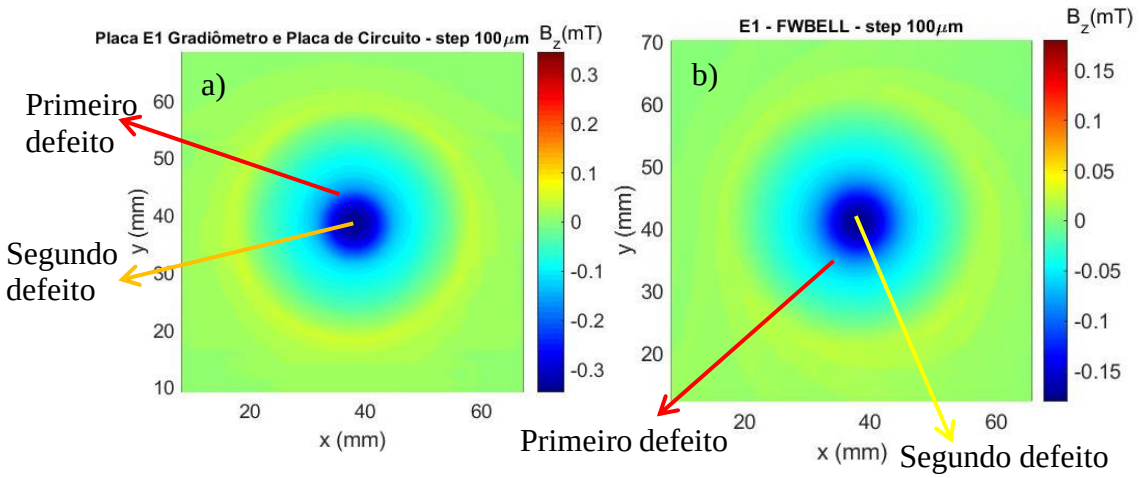

Figura 4.28: Mapas magnéticos dos defeitos da placa E1 obtidos com (a) gradiômetro e placa de circuito e (b) F.W. BELL 9950.

Nota-se da figura 4.28 que o mapa magnético obtido com gradiômetro e a placa de circuito permite uma nítida identificação dos dois defeitos assim como o

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

mapa magnético obtido com F.W. BELL 9950. Observa-se que com o gradiômetro e a placa de circuito, a identificação dos defeitos fica mais clara, equiparando-se perfeitamente a medida realizada com o F.W. BELL modelo 9950.

A placa M1 contém pequenos defeitos que foram identificados somente pelo gradiômetro, como discutido anteriormente, contudo o mapa magnético obtido com o gradiômetro apresentou bastante ruído, motivo pelo qual essa placa foi escolhida para uma nova medida desses defeitos utilizando o gradiômetro e a placa de circuito, como supracitado.

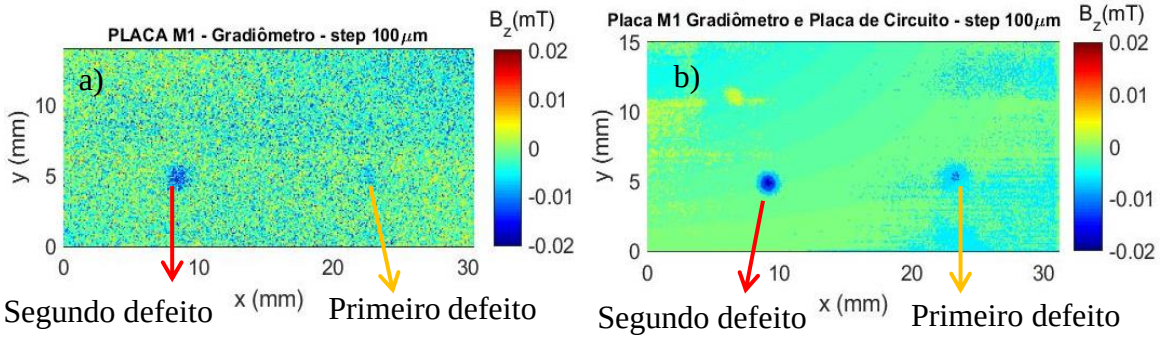

Figura 4.29: Mapas magnéticos dos defeitos da placa M1 obtidos a partir de (a) gradiômetro e (b) gradiômetro e placa de circuito.

Percebe-se da figura 4.29 que a medida magnética realizada com o gradiômetro e a placa de circuito atenua significativamente o ruído presente no mapa magnético obtido com o gradiômetro (figura 4.29 (a)), como consequência é possível identificar com maior clareza o segundo defeito e sua geometria. Nota-se ainda da figura 4.29 (b), que a medida com o gradiômetro e a placa de circuito permite identificar o primeiro defeito presente nessa placa de maneira mais nítida, reforçando o que havíamos afirmado na seção 4.3.3. Logo, o gradiômetro que já se apresentava uma excelente ferramenta para detecção de pequenos defeitos (figura 4.29 (a)), como discutido na seção 4.3.3, torna-se com a placa de circuito, uma ferramenta ainda mais poderosa para identificação desses, sendo versátil para a pesquisa acadêmica e confirmando seu potencial como um possível protótipo para inspeção de placas de aço utilizadas na indústria e para ensaios magnéticos não destrutivos in loco.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

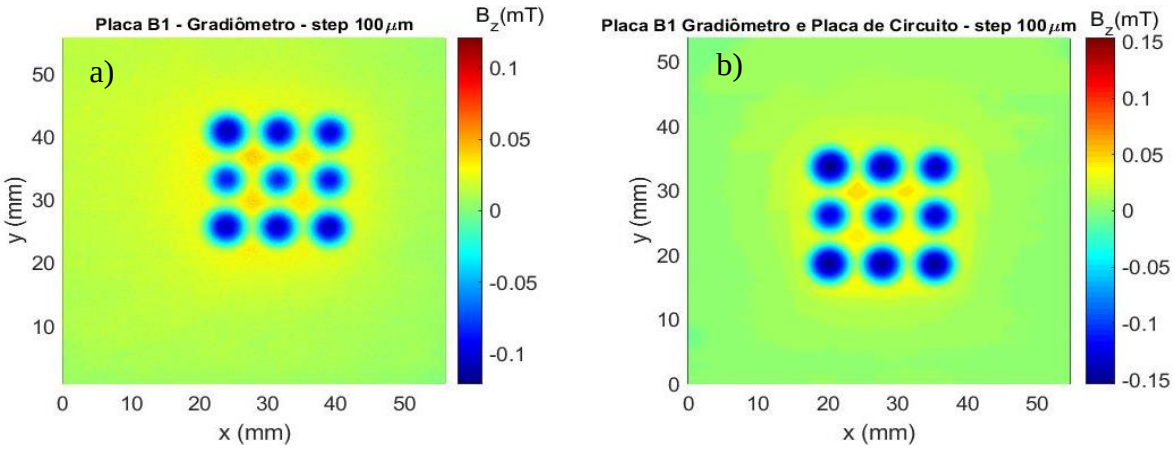

Figura 4.30: Mapa magnético dos defeitos da placa B1 obtidos com (a) gradiômetro e (b) gradiômetro e placa de circuito

Na identificação dos defeitos da placa B1 o gradiômetro já havia apresentado considerável vantagem em relação ao F.W. BELL 9950, como discutido na seção 4.3.3. Da figura 4.30 nota-se que com a placa de circuito a identificação dos defeitos e sua geometria ficam ainda mais claros. É notório que há redução do ruído, o que claramente contribuiu para essa identificação mais nítida. Percebe-se ainda, que com a placa de circuito, nos defeitos mais profundos D1, D2, D3, D7, D8 e D9 (Veja tabela 4.3 e figura 4.5), é possível identificar com maior clareza a região mais profunda desses defeitos, quando comparado com o F.W. BELL 9950 e o gradiômetro, como apresentado na figura 4.31. A perfeita identificação da geometria e região mais profunda do defeito, é fundamental para uma inspeção de qualidade.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

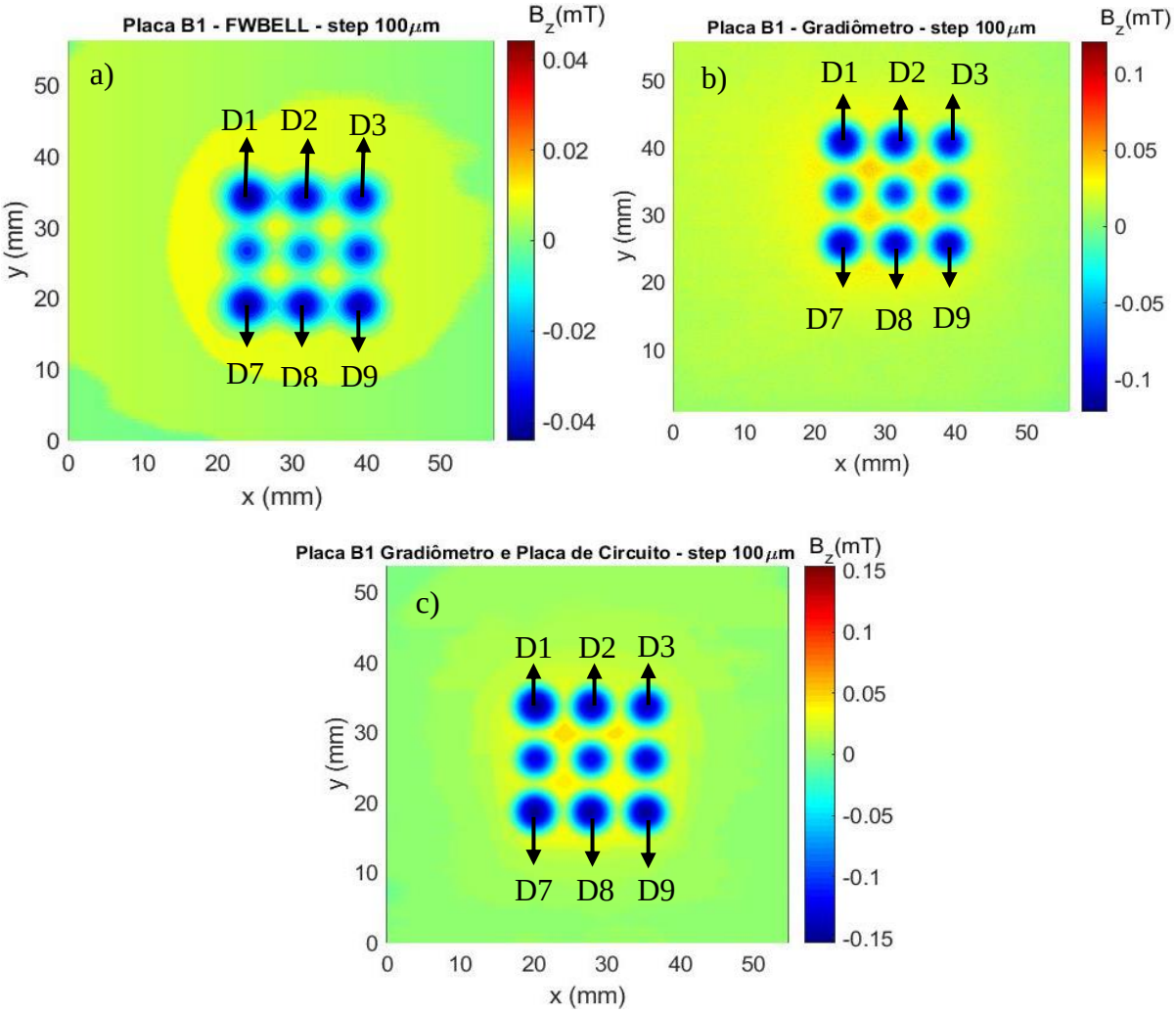

Figura 4.31: Mapas magnéticos da placa B1 obtidos a partir do (a) F.W. BELL 9950, (b) Gradiômetro e (c) Gradiômetro e placa de circuito.

Apresentamos, agora, os resultados referentes a placa J1 do terceiro grupo de placas (Veja tabela 4.3), o resultado da medida magnética dessa placa realizada com o gradiômetro e a placa de circuito é apresentado na figura 4.32 (b).

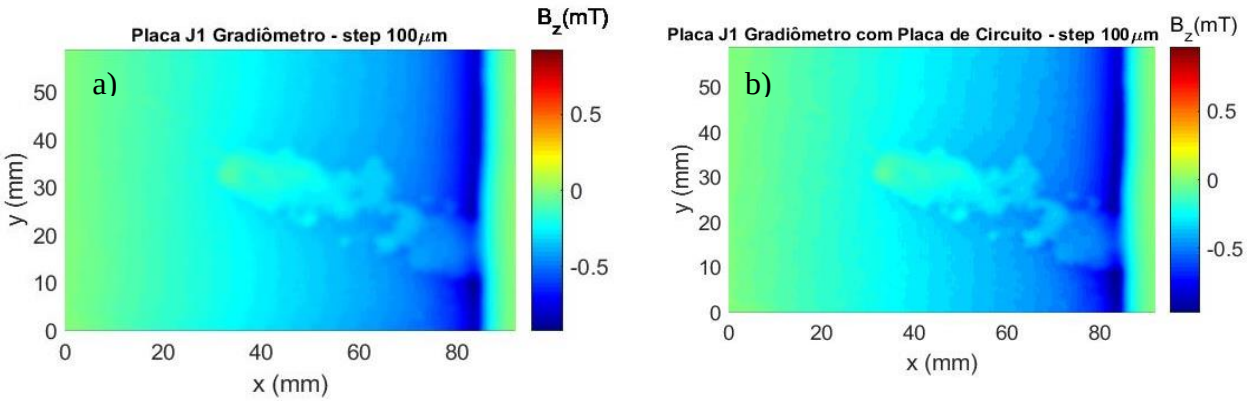

Figura 4.32: Mapas magnéticos do defeito da Placa J1 obtidos com (a) Gradiômetro e (b) Gradiômetro e Placa de Circuito.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Nota-se da figura 4.32 que a medida realizada com o gradiômetro e a placa de circuito deixa ainda mais nítido o defeito da placa J1 e sua geometria, inclusive os pontos de medida de profundidade desse defeito P1, P2 e P3 (Veja figura 4.33). Como visto no espectro de sinal-ruído da placa de circuito (figura 4.22) essa placa atenua o ruído presente no gradiômetro e isso explica a maior nitidez do mapa magnético e consequentemente a melhora na identificação do defeito e seus detalhes a partir do mapa magnético. Com o mapa magnético obtido através do gradiômetro e da placa de circuito (figura 4.32 (b)) nota-se, ainda, que a região ao redor do defeito que aparenta ser um relevo também é melhor identificada.

A significativa melhora na identificação do defeito aleatório, sua geometria e seu entorno, mostra que o equipamento de varredura construído no laboratório utilizando o gradiômetro e placa de circuito, como citado anteriormente, é uma excelente ferramenta para a pesquisa científica e um potencial protótipo de equipamento para inspeção de placas de aço utilizadas na indústria.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

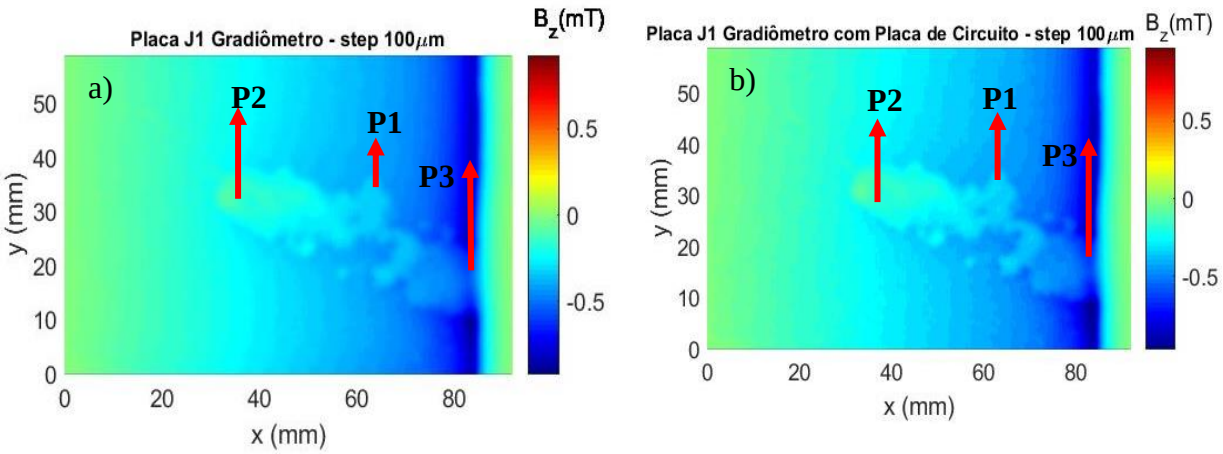

Figura 4.33: Mapa magnético da placa J1 com identificação dos pontos de medida de profundidade.

Percebe-se da figura 4.33, que a partir do mapa magnético obtido com gradiômetro e a placa de circuito é possível identificar o defeito e sua geometria de maneira clara, enquanto que com o F.W. BELL 9950 a identificação do defeito e sua geometria é comprometida. Além disso, da figura 4.33 observa-se que a identificação dos pontos de medida de profundidade (P1, P2 e P3) deste defeito é melhor detectado através do mapa magnético obtido do gradiômetro e a placa de circuito.

Por fim, apresentamos os mapas magnéticos referentes as medidas experimentais de uma esfera de níquel de 99% de pureza e massa de 126 mg adquirida da empresa GoodFellow. Para a medida magnética a esfera de níquel foi posicionada em uma cavidade cilíndrica de um porta amostra, a figura 4.34 exibe o porta amostra com a esfera de níquel posicionada no interior dessa cavidade cilíndrica.

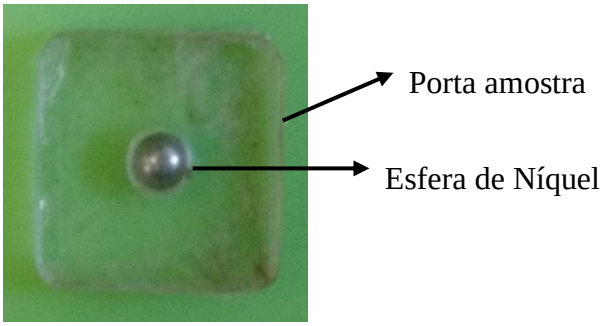

Figura 4.34: Porta amostra e esfera de níquel

O resultado da medida dessa esfera com o gradiômetro e o gradiômetro com a placa de circuito é apresentado na figura 4.35.

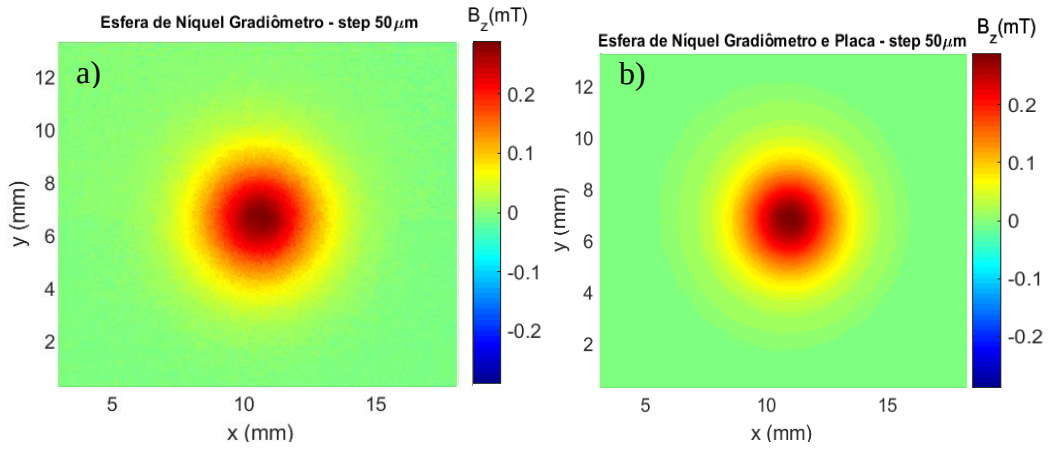

Figura 4.35: Mapas magnéticos da esfera de níquel obtidos a partir de (a) Gradiômetro e (b) Gradiômetro e placa de circuito.

Percebe-se a partir da figura 4.35 (a) que o gradiômetro identifica muito bem a esfera de níquel e sua geometria, porém o mapa magnético apresenta ruído na região da borda da coroa vermelha e amarela. Com a placa de circuito nota-se que o mapa magnético (figura 4.35 (b)) fica mais nítido, melhorando ainda mais a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

identificação da esfera de níquel e sua geometria, como supracitado isso se dá devido a placa de circuito atenuar o ruído durante a medida magnética.

A partir dos mapas magnéticos exibidos na figura 4.36 nota-se que o gradiômetro e a placa de circuito se equiparam ao F.W. BELL 9950. Onde a geometria da esfera é perfeitamente bem identificada, a diferença entre os dois mapas magnéticos está na forma da cora vermelha (linhas de campo) com o F.W. BELL 9950 a coroa vermelha está melhor definida em comparação com o resultado obtido do gradiômetro e placa de circuito.

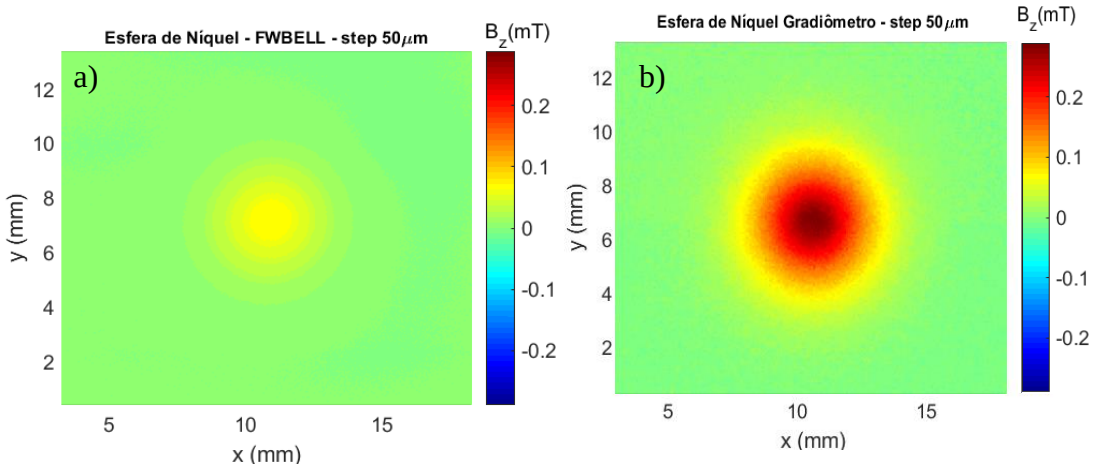

Figura 4.36: Mapas magnéticos da esfera de níquel obtidos a partir do (a) F.W. BELL 9950 e (b) Gradiômetro e placa de circuito.

Dessa forma, nota-se que a placa de circuito ao atenuar o ruído melhora a sensibilidade de detecção do gradiômetro e permite a identificação mais clara de uma variedade de defeitos e de diferentes profundidades, ampliando a versatilidade e aplicabilidade do equipamento, uma vez que mais sensível o equipamento pode ser utilizado posteriormente em outras áreas de fronteira da ciência como na caracterização de amostras in vitro, nanopartículas magnéticas para ensaios imunológicos, micropartículas magnéticas utilizadas no recobrimento de superfícies e amostras de rochas magnéticas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

5
Modelo Teórico

5.1.
Modelo de um prisma retangular

O modelo de um prisma retangular centrado na origem (Figura 5.1), foi utilizado para realizar simulações do campo induzido das placas de aço SAE 1020 medidas, os resultados dessas simulações serão discutidos na seção 5.2. Segundo Camacho e Sosa (2013), o cálculo desse modelo consiste em considerar um ímã com uma geometria de um prisma retangular em uma configuração de simetria azimutal, extrair a partir do esquema (Figura 5.1) o potencial magnético escalar ao longo do eixo Z e posteriormente definir a equação para o campo magnético nessa mesma direção.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

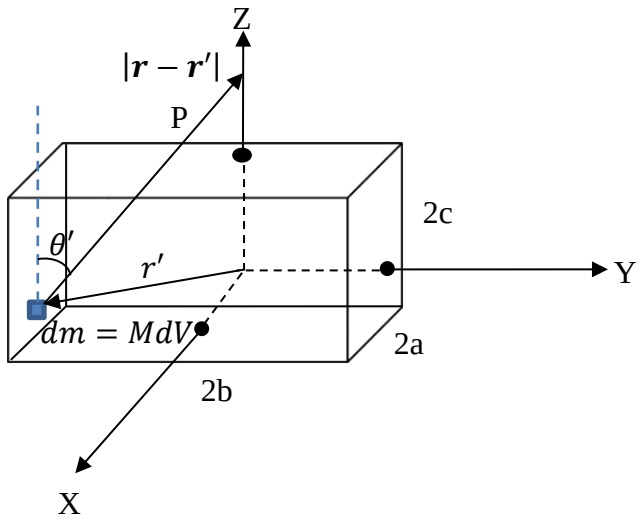

Figura 5.1: Modelo de um prisma retangular

Dito isto, e considerando a direção de magnetização do ímã na direção Z. A partir da (Figura 5.1), temos:

$$d\phi_{eixo}(z) = \frac{1}{4\pi}\frac{dm\cos\theta'}{|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'|^2} \tag{10}$$

Substituindo dm e cos θ' na eq. 10 e sendo $|\boldsymbol{r}-\boldsymbol{r}'| = [x'^2 + y'^2 + (z-z')^2]^{\frac{1}{2}}$, obtemos:

$$d\phi_{eixo}(z) = \frac{1}{4\pi} MdV \frac{z - z'}{|r - r'|^3}$$

$$= \frac{M}{4\pi} \frac{z - z'}{[x'^2 + y'^2 + (z - z')^2]^{\frac{3}{2}}} dx'dy'dz' \quad (11)$$

Logo:

$$\phi_{eixo}(Z) = \frac{M}{4\pi} \int_{-c}^{c} (z - z')dz' \int_{-b}^{b} dy' \int_{-a}^{a} \frac{dx'}{[x'^2 + y'^2 + (z - z')^2]^{3/2}} \quad (12)$$

Onde ϕ é potencial magnético escalar. Calculando as integrais em x' nos limites de – a até a e de y' de –b até b, obtemos respectivamente (Camacho; Sosa, 2013)

$$\frac{2a}{[y'^2 + (z - z')^2]\sqrt{a^2 + y'^2 + (z - z')^2}} \quad (13)$$

e

$$\frac{4}{z - z'} \tan^{-1} \frac{ab}{(z - z')\sqrt{a^2 + b^2 + (z - z')^2}} \quad (14)$$

Obtido os resultados das eq. (13) e (14), temos então:

$$\phi_{eixo}(z) = \frac{M}{\pi} \int_{-c}^{c} \tan^{-1} \frac{ab}{(z - z')\sqrt{a^2 + b^2 + (z - z')}} dz' \quad (15)$$

Resolvendo a integral e realizando algumas manipulações matemáticas obtemos o campo magnético com uma magnetização ao longo do eixo Z.

$$B_z(x, y, z) = -\frac{\mu_0}{4\pi} [F_1(-x, y, z) + F_1(-x, y, -z) + F_1(-x, -y, z) +$$

$$F_1(-x, -y, -z) + F_1(x, y, z) + F_1(x, y, -z) + F_1(x, -y, z) + F_1(x, -y, -z)] \quad (16)$$

Onde F1 é dado por:

$$F_1(x, y, z) = \tan^{-1} \frac{(x + a)(y + b)}{(z + c)\sqrt{(x + a)^2 + (y + b)^2 + (z + c)^2}} \quad (17)$$

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

5.2. Simulação

Como citado anteriormente utilizamos o modelo de um prisma retangular para realizar as simulações das medidas das placas de aço SAE 1020. O programa em MATLAB (Apêndice A) solicita inicialmente como entradas os valores referentes a distância Z (distância do sensor à placa), as dimensões da placa, os raios dos defeitos e a profundidade desses defeitos. A simulação nos fornece importantes dados teóricos que nos permite compreender o comportamento magnético dessas placas, sobretudo dos defeitos. O diagrama de blocos (figura 5.2) abaixo exibe a sequência de etapas efetuada pela rotina em MATLAB (Apêndice A) para executar a simulação.

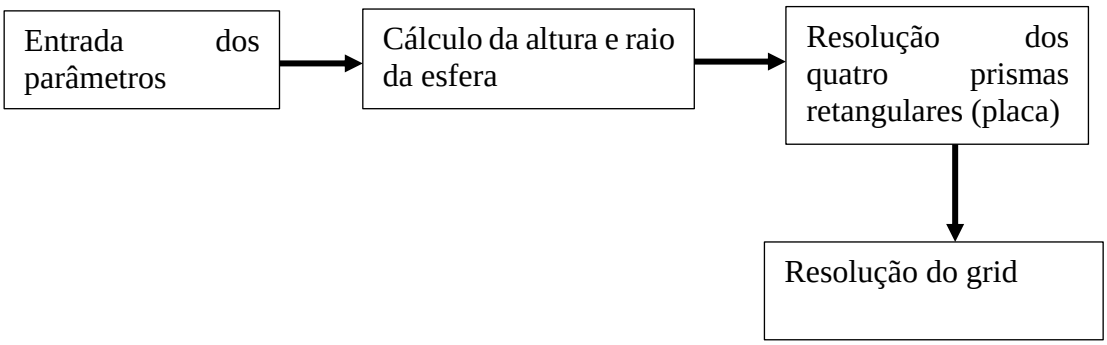

Figura 5.2: Diagrama de blocos das etapas efetuadas durante a simulação.

Como mostrado no diagrama de blocos acima (figura 5.2), a primeira etapa da simulação é a entrada dos parâmetros que são: área da placa, área do mapa magnético, diâmetro dos defeitos, espessura da placa, profundidade dos defeitos e distância Z (distância do sensor à superfície da placa). Para a simulação de cada placa foram utilizados seus respectivos parâmetros, como pode ser visto na tabela 5.1. Os valores referentes à área da placa (140 mm x 140 mm), área do mapa magnético (90 mm x 90 mm) e distância Z (0,23 mm) foram iguais para todas as simulações.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Placa	Espessura	Raio 1	Raio 2	Profundidade 1	Profundidade 2
D5	6,80 mm	8,72 mm	-----	2,6 mm	-----
E1	6,70 mm	20,78 mm	6,25 mm	0,60 mm	4,42 mm
E2	6,72 mm	12,81 mm	4,98 mm	0,90 mm	2,21 mm
E3	6,55 mm	5,26 mm	-----	1,84 mm	-----
E4	6,60 mm	5,34 mm	-----	5,08 mm	-----

Tabela 5.1: Parâmetros de entrada utilizados na simulação.

A geometria da placa pode ser aproximada a geometria de um prisma retangular, por isso, dividimos a placa em cinco partes (figura 5.3) sendo quatro nesses elementos geométricos e um grid composto desses pequenos prismas. As quatro partes devem ser as maiores possíveis para cobrir a maior área da placa e permitir uma boa resolução utilizando, melhor, o recurso computacional disponível. A região do defeito é dividida em um grid para solucionar com a melhor precisão possível a simulação do comportamento magnético dessa. A largura e comprimento dos prismas (P1, P2, P3 e P4) é definido a partir do diâmetro do defeito, para encontra-los consideramos a superfície superior da placa um quadrado perfeito. Como P1 e P2 tem a mesma dimensão, o comprimento desses é igual ao comprimento L da placa e a largura é definida pela eq. 18. Com a mesma equação pode-se calcular o comprimento dos prismas P3 e P4 e a largura é dada pelo diâmetro do defeito.

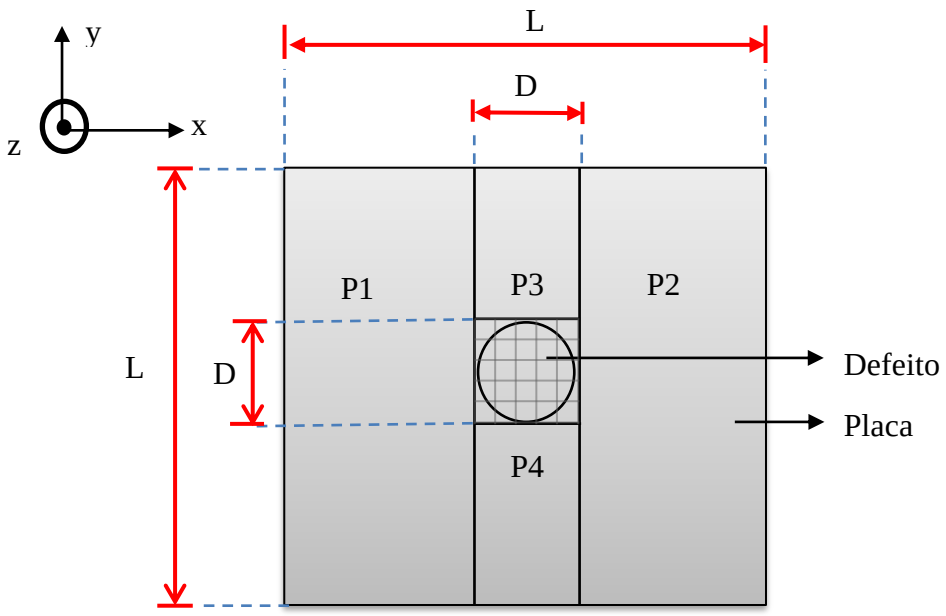

Figura 5.3: Esquema da placa com as divisões.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

$$T_p = \frac{L - D}{2} \tag{18}$$

Onde, L é largura e comprimento da placa, D o diâmetro do defeito e T_P a largura dos prismas P1 e P2 e o comprimento dos prismas P3 e P4.

O grid é um quadrado de comprimento e largura igual ao diâmetro do defeito, onde esse é dividido em 400 frações iguais (20 x 20), esses valores foram definidos arbitrariamente e permitem solucionar a simulação do comportamento magnético do defeito em um tempo razoável (cerca de 3 minutos).

O defeito foi considerado como uma subtração de uma fração de uma esfera sobre a placa, utilizamos essa abordagem devido a geometria do defeito assemelhar-se a uma fração desse objeto geométrico, desse modo para obter a curvatura e profundidade em toda a região do defeito optamos em solucionar pequenos prismas, em um grid, com altura variável utilizando o princípio de adição de campos utilizado por Camacho e Sosa (2013), para simular defeito da placa. A altura desses prismas é obtida a partir do raio e altura da esfera que causa o defeito (esfera sobre a placa).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

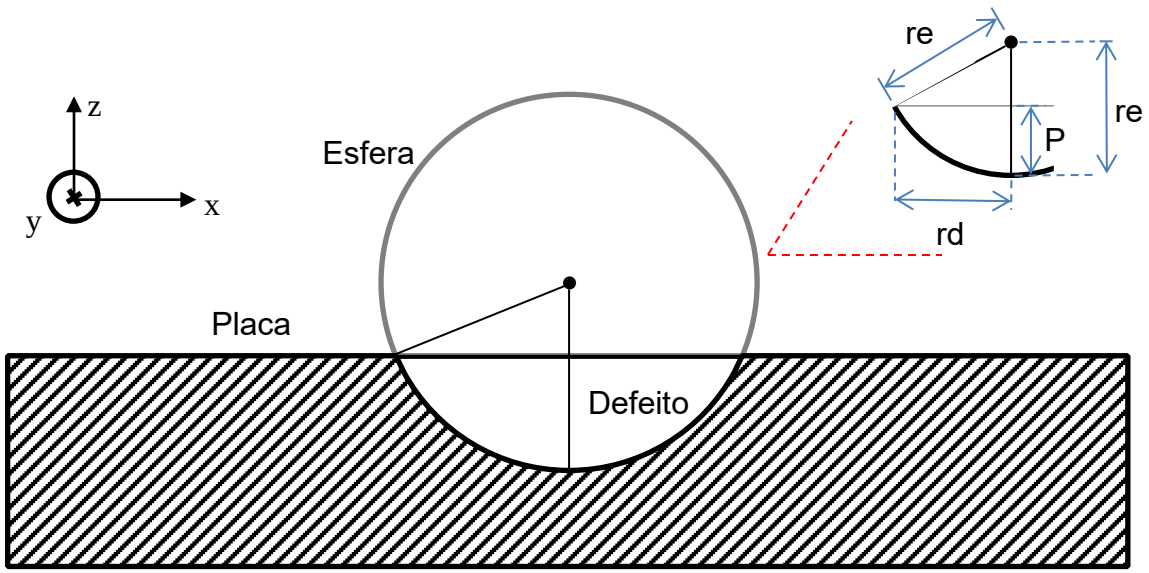

Figura 5.4: Vista frontal da placa e do defeito.

Onde r_e é o raio da esfera, r_d o raio do defeito e P a profundidade do defeito. Da figura 5.4 e utilizando o teorema de Pitágoras temos:

$$r_e{}^2 = r_d{}^2 + (r_e - P)^2 \tag{19}$$

De modo que tomando o produto notável obtemos o raio da esfera:

$$r_e = \frac{r_d{}^2 + P^2}{2P} \tag{20}$$

Da figura 5.4 encontramos a altura da esfera inserida a partir da superfície superior da placa, como exibe a eq. 21.

$$h_e = r_e - P \tag{21}$$

Onde h_e é a altura da esfera. Através desses parâmetros é possível definir a profundidade dos prismas que serão solucionados no grid. Finalmente, obtidos esses valores a partir das eqs. 20 e 21, encontramos a curvatura na região do defeito (grid).

$$h_g = \sqrt{r_e{}^2 - X_d{}^2 - Y_d{}^2} \tag{22}$$

Onde h_g é a curvatura do defeito, r_e é o raio da esfera, X_d e Y_d são as posições espaciais de cada elemento do grid. Ao solucionarmos a expressão dada pela eq. 22 e somando a esta equação o raio da esfera obtemos a seguinte curvatura, como mostra a figura 5.5.

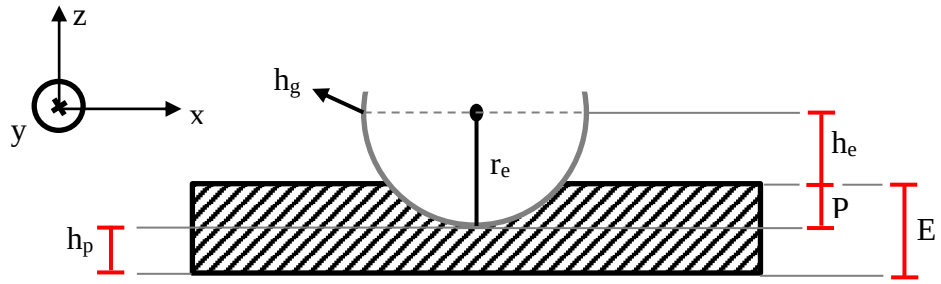

Figura 5.5: Curvatura obtida após a resolução da eq. 22.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Por fim, obtemos a profundidade em toda a região do defeito que é dada pela equação abaixo.

$$h_p = -h_g + r_e - P + E \quad , h_p < 0 \tag{23}$$

Onde, h_p é a profundidade em toda a região do defeito, r_e é o raio da esfera, E a espessura da placa e P a profundidade máxima do defeito. A eq. 23 é limitada em $h_p < 0$ para restringir a resolução dessa equação somente a região do defeito. Obtemos, assim, as posições e alturas de cada prisma nessa região, que como citado anteriormente, é solucionado a partir do modelo discutido na seção 5.1.

Por fim, é realizado a somatória dos campos magnéticos simulados dos prismas retangulares e do grid, seguindo a abordagem de adição de campos magnéticos utilizada por Camacho e Sosa (2013).

A partir dessa rotina é possível simular as medidas de uniformidade de magnetização das placas (Figura 5.6 (a)). Dessa forma é possível comparar os resultados da simulação com os resultados obtidos a partir das medidas experimentais. A (Figura 5.6 (a)) apresenta a simulação de uma medida de uniformidade da placa D5, os parâmetros foram: campo aplicado 0,3 T, distância do sensor a placa Z= 0,23 mm. A placa tem uma área de 140 mm por 140 mm, espessura de 6,79 mm, raio do defeito de 8,72 mm e profundidade do defeito de 2,60 mm. A (Figura 5.6 (b)) exibe um mapa magnético da medida experimental da placa D5 realizada com o sistema gradiométrico, com os mesmos parâmetros citados acima.

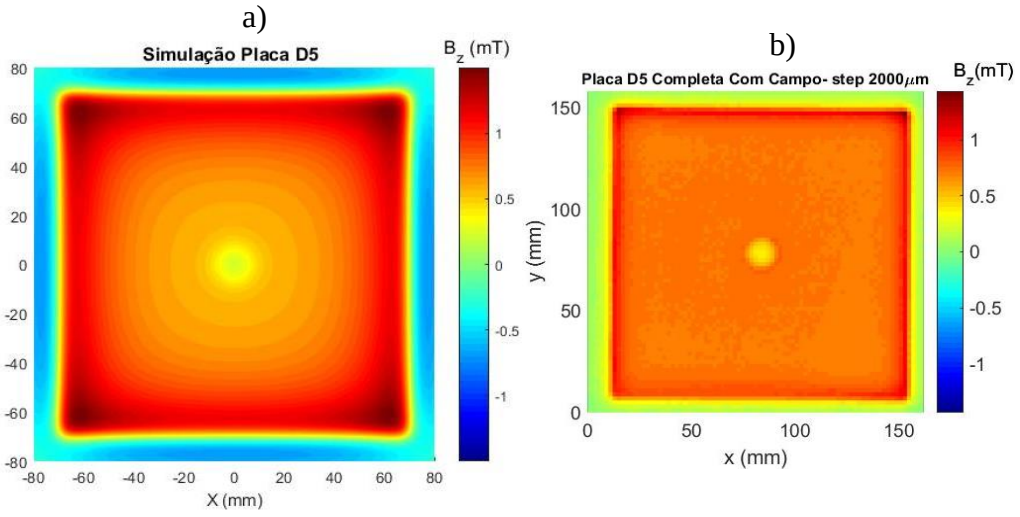

Figura 5.6: (a) Simulação da Placa D5. (b) Medida experimental realizada pelo sistema gradiométrico da Placa D5.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

A partir da simulação (Figura 5.6 (a)) nota-se que há uma uniformidade de magnetização da placa com exceção das bordas e do centro, onde se encontra o defeito. A medida experimental dessa mesma placa, realizada com o sistema gradiométrico, está coerente com a simulação, pois apresenta uma uniformidade de magnetização com as mesmas exceções exibidas na simulação. Na região do defeito há o menor valor de campo magnético induzido, como a magnetização é o momento magnético por volume de um sólido (Jiles, 2015) os resultados da simulação e da medida experimental estão coerentes, visto que na região do defeito há ausência de material. A figura 5.7 (a – e) apresenta as simulações do comportamento dos defeitos com o sensor zerado na placa.

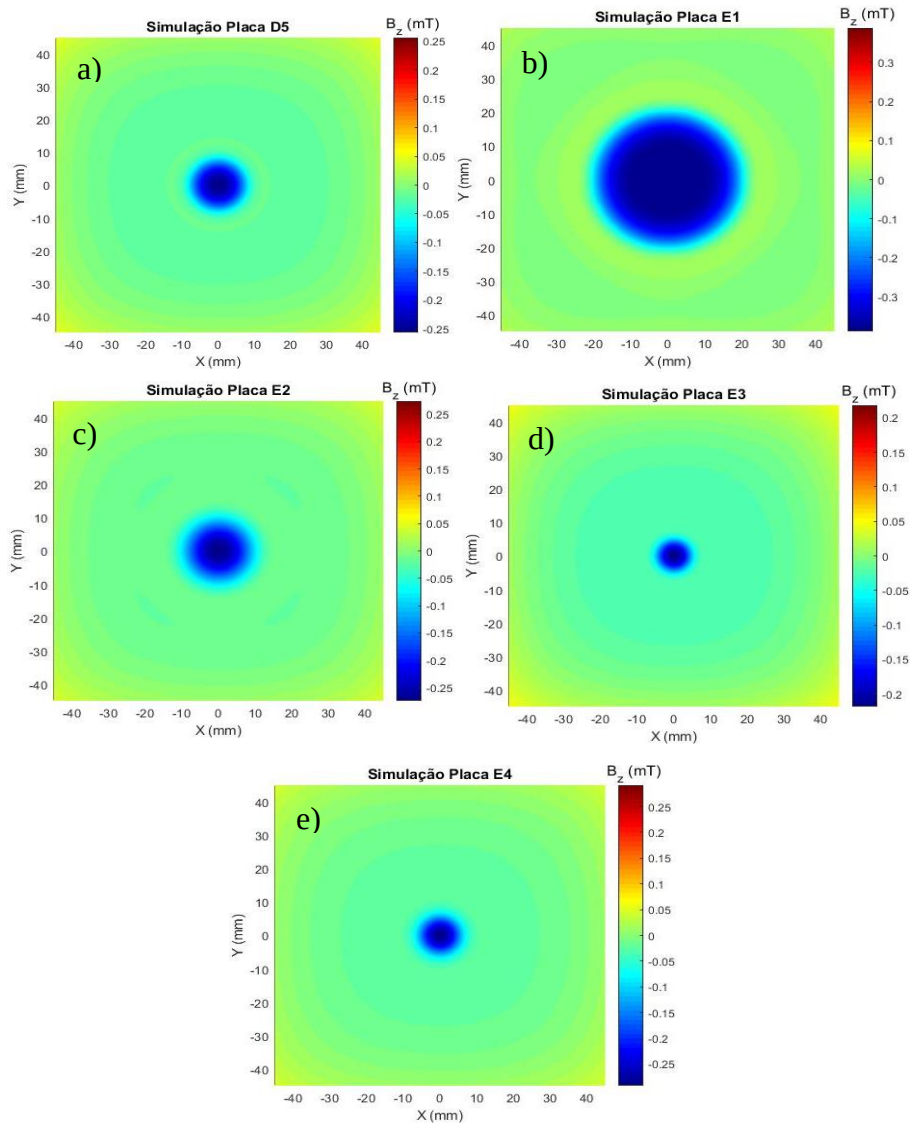

Figura 5.7: Simulação da placa (a) D5, (b) E1, (c) E2, (d) E3, (e) E4.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

5.3.
Processo de estimar a profundidade dos defeitos

Identificar defeitos em placas de aço utilizadas na indústria e estimar a profundidade desses defeitos pode auxiliar na prevenção de possíveis acidentes e prejuízos. Sensores de corrosão têm sido utilizados na indústria de petróleo e de gás para inspeção, em geral de placas de aço, utilizadas nessas indústrias. Sendo assim, equipamentos e dispositivos que detectem os defeitos e a partir disso estimem sua profundidade, além do uso na pesquisa científica, são potenciais protótipos para inspeção e medidas magnéticas não destrutivas desses materiais (Pacheco; Bruno, 2013).

Portanto, nessa seção apresentaremos os resultados referentes ao processo de estimar a profundidade dos defeitos das placas D5, E3 e E4. Para estimar a profundidade desses defeitos utilizamos uma rotina na linguagem MATLAB (Apêndice B). O processo realizado por essa rotina é exibido no diagrama de blocos abaixo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

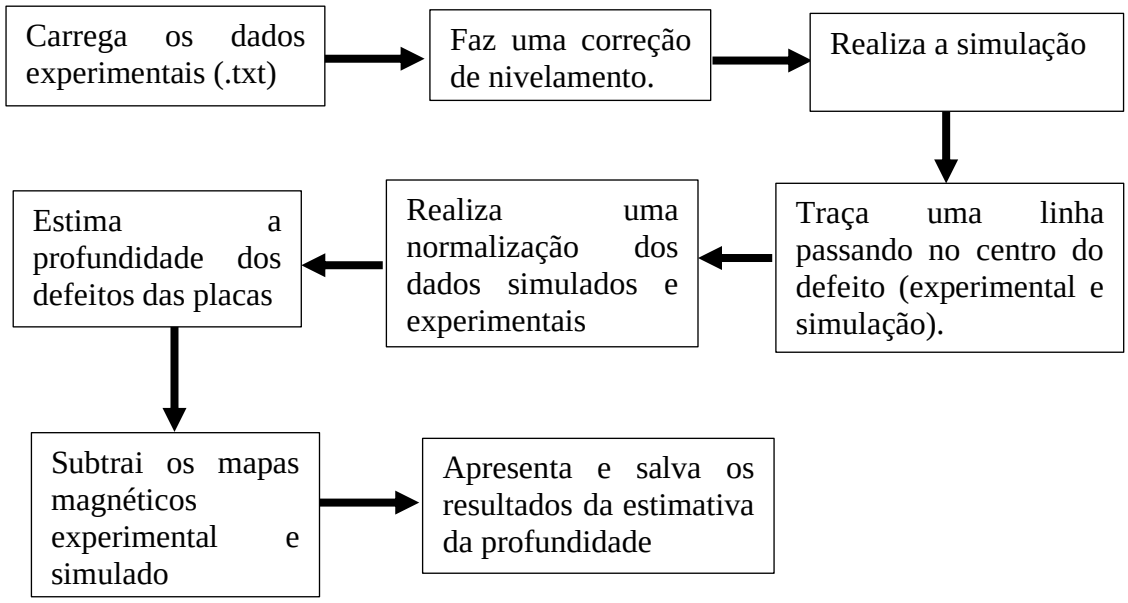

Figura 5.8: Diagrama de blocos do processo realizado pela rotina em MATLAB para estimar a profundidade dos defeitos das placas.

A correção de nivelamento dos dados experimentais é necessária porque notou-se a partir da curva do campo magnético (obtida através da linha traçada nos mapas magnéticos) que as placas são imperfeitas apresentando um desnivelamento

que foi bem detectado devido à precisão e sensibilidade do equipamento construído no laboratório, esse desnivelamento dificultava a estimativa do erro, uma vez que para realizar esta, como será posteriormente explicado, uma das etapas é comparar os valores de campo magnético da simulação (descrita na seção 5.2) com os valores de campo magnético da medida experimental. A figura 5.9 apresenta um exemplo da medida experimental desnivelada e da correção de nivelamento.

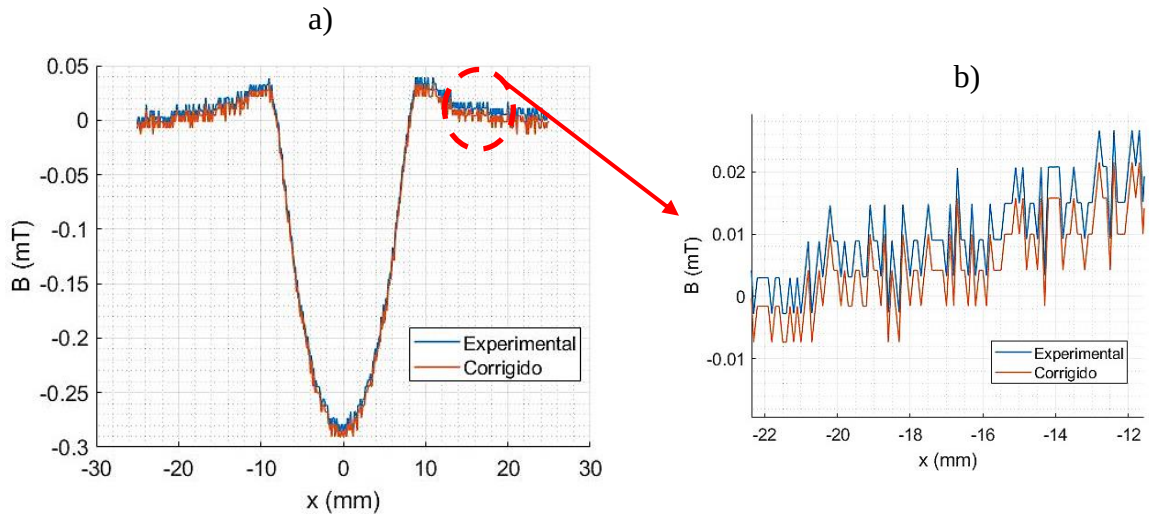

Figura 5.9: (a) Exemplo de um plot dos dados experimentais e corrigidos e (b) Recorte de uma região do gráfico.

A etapa de traçar uma linha passando pelo centro do defeito no mapa magnético consiste em obter uma curva do campo magnético da medida experimental e/ou da simulação, essas curvas são usadas para verificar o desnivelamento e imperfeições das placas de aço SAE 1020, como explicado acima, ou para estimar a profundidade de seus defeitos, como será discutido na sequência. A figura 5.10 exibe um exemplo dessa etapa. A normalização dos dados experimentais e simulados é necessária para que ambos tenham a mesma ordem de grandeza e dessa maneira facilite uma melhor estimativa de profundidade dos defeitos.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

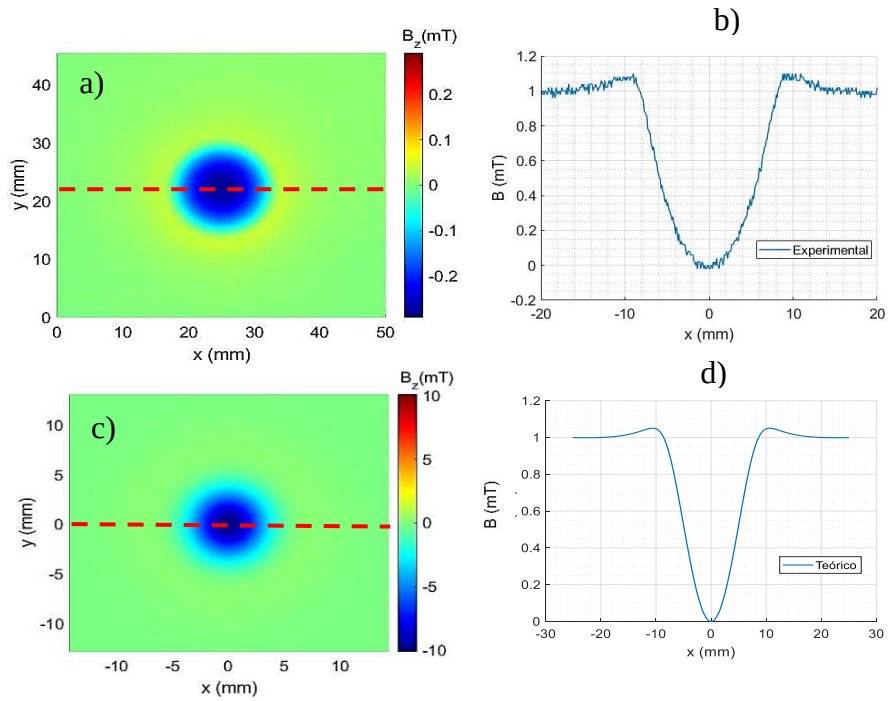

Figura 5.10: (a) Plot do mapa experimental, (b) Plot da curva normalizada do mapa experimental, (c) Plot do mapa simulado, (d) Plot da curva normalizado do mapa

Após esses procedimentos, estimamos a profundidade dos defeitos. Para isso, inicialmente introduzimos na rotina em MATLAB (Apêndice B) um valor de referência para a profundidade e definimos um passo para realizar uma varredura desses possíveis valores, essa varredura é limitada pela referência inserida e pelo passo escolhido. Onde, a partir disso calculamos o erro dessas possíveis profundidades, para isso ser possível, fazemos uso dos valores dos campos magnéticos experimentais e teóricos, por isso traçamos uma linha no centro do defeito nos mapas magnéticos e normalizamos. Como os dados simulados já têm implícito o valor da profundidade, usamos os campos magnéticos normalizados (simulado e experimental) para estimar a profundidade, a rotina calcula para qual profundidade a curva de campo magnético simulada tem menor erro em relação a curva de campo magnético experimental. Para calcular o erro utilizamos uma função do MATLAB denominada “norm”, que é definida como:

$$norm = \frac{\sqrt{\sum_i^n |V_1{}^2|}}{\sqrt{\sum_i^n |V_2{}^2|}} \tag{24}$$

Onde, $V_1 = (B_{simulado} - B_{experimental})$ e $V_2 = (B_{experimental})$, em que B é campo magnético.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

A seguir apresentaremos os resultados da estimativa de profundidade das placas mencionadas anteriormente.

5.3.1.
Placa E3

Nessa seção discutiremos os resultados das estimativas de profundidade da placa E3, a partir das simulações e dos mapas magnéticos obtidos experimentalmente utilizando o F.W. BELL modelo 9950, o gradiômetro e o gradiômetro e placa de circuito.

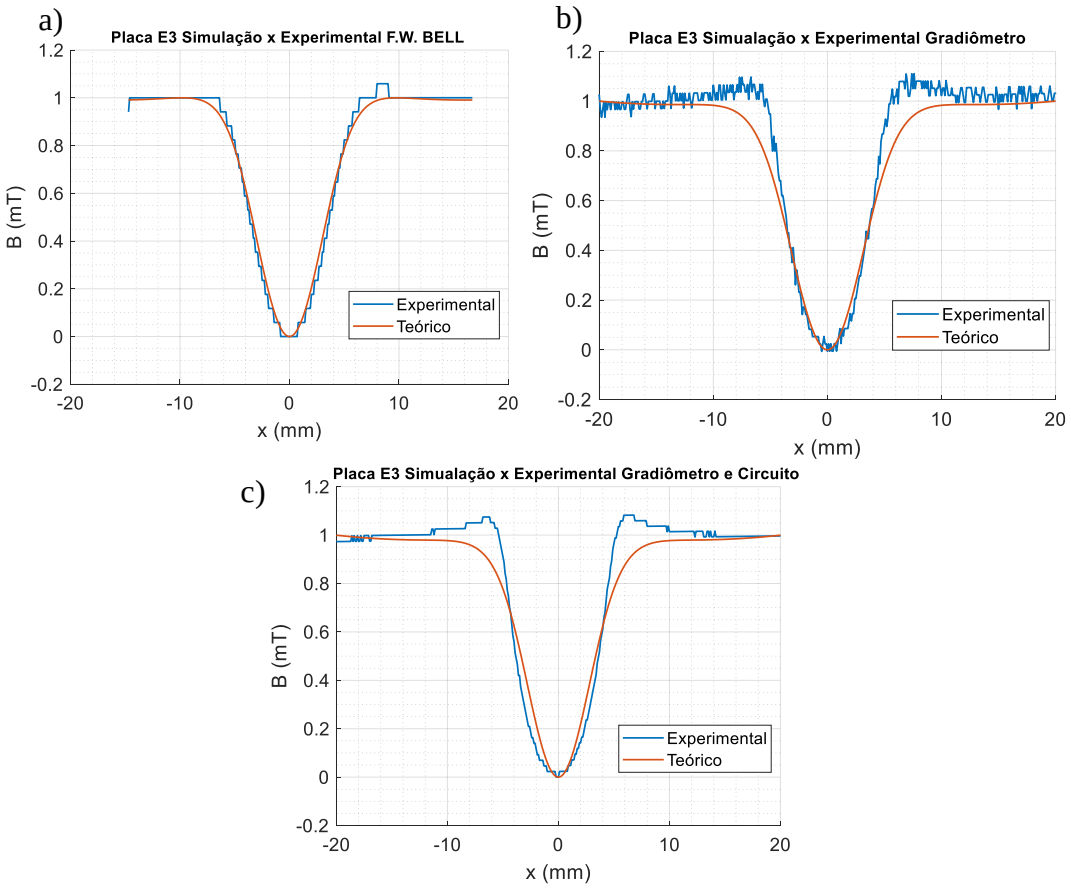

Figura 5.11: Placa E3 Curva teórico e experimental (a) (F. W. BELL 9950), (b) Gradiômetro, (c) Gradiômetro e placa de circuito.

A placa E3 apresenta somente um defeito (Veja tabela 4.1) com profundidade de 1,84 mm. A estimativa de profundidade desse defeito utilizando a rotina em MATLAB (Apêndice B), apresentou um erro de ± 3,54% relacionado a

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

medida experimental obtida com F.W. BELL modelo 9950, em contrapartida o erro dessa estimativa para a medida experimental obtida com gradiômetro foi de ± 7,68%, enquanto que para o gradiômetro e a placa de circuito o erro foi de ± 7,28%. A diferença na estimativa de erro considerando o F.W. BELL 9950 e o Gradiômetro é de ± 4,14%. Para essas medidas, atribuímos o fato do erro de estimativa com o gradiômetro ser maior em relação ao F.W. BELL 9950, ao ruído mecânico presente na medida magnética causado pelo atrito do encapsulamento do sensor MLX 90215 com a irregular superficíce superior da placa. Mesmo com circuito atenuando o ruído eletrônico, como pode ser visto na figura 5.11, o erro atribuído a medida do gradiômetro e a placa de circuito também pode ser explicado pela presença de ruído mecânico, uma vez que o gradiômetro tem uma montagem menos rigída e mais flexível que a probe do Gaussímetro F.W. BELL 9950, esse fica mais vulneravél nos contatos com a placa de aço SAE 1020.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

5.3.2. Placa D5

Nessa seção discutiremos os resultados das estimativas de profundidade da placa D5, a partir das simulações e dos mapas magnéticos obtidos experimentalmente utilizando o F.W. BELL 9950 e o gradiômetro.

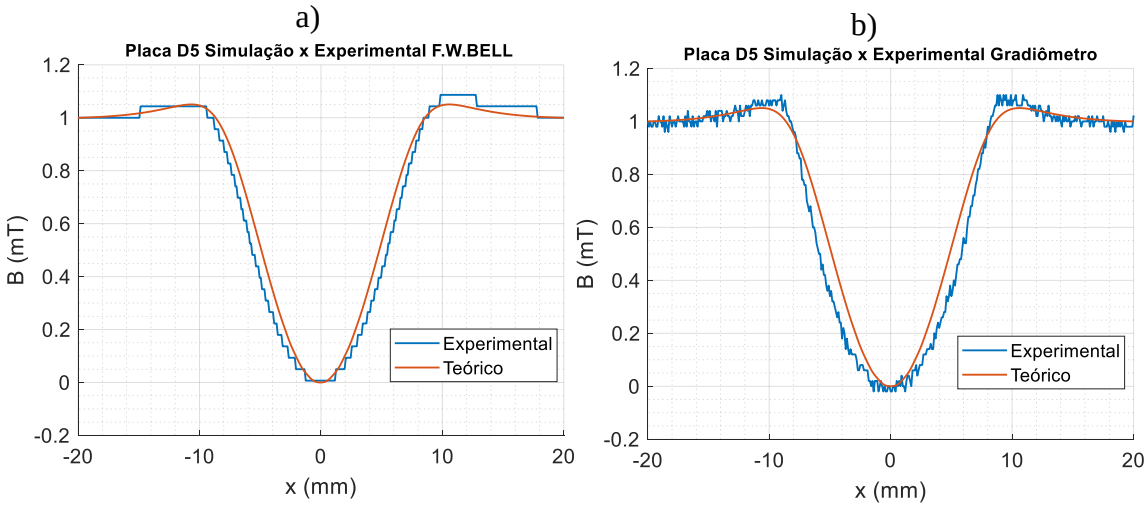

Figura 5.12: Placa D5 (a) Curva teórico e experimental (F. W. BELL 9950), (b)Curva teórico e experimental (Gradiômetro).

Para a placa D5 que tem somente um defeito (Veja tabela 4.1) com uma profundidade de 2,6 mm, a estimativa utilizando a rotina em MATLAB (Apêndice

B) obteve um erro relacionado a medida experimental obtida com F.W. BELL modelo 9950 de ± 4,90%, enquanto que para a medida experimental obtida a partir do gradiômetro apresentou um erro de ± 7,79%. Nota-se dessa medida (figura 5.12), que houve um aumento do erro de ± 1.36% para o F.W. BELL 9950 e de ± 0,11% para o gradiômetro, além disso, a diferença de erro de estimativa entre as duas medidas também diminuiu, sendo para essa placa de ± 2,28%. Isso está coerente com o que foi discutido na seção 4.6.2, onde observou-se que ao aumentar a profundidade dos defeitos o gradiômetro equiparava-se ao F.W. BELL. Além do mais, os resultados apresentados nessa seção (figura 5.12), mostram que além da melhor detecção, ao aumentar a profundidade o gradiômetro assemelha-se ao F.W. BELL 9950 na estimativa de profundidade dos defeitos.

5.3.3. Placa E4

Nessa seção discutiremos os resultados das estimativas de profundidade da placa E4, a partir das simulações e dos mapas magnéticos obtidos experimentalmente utilizando o F.W. BELL modelo 9950 e o gradiômetro.

Como descrito na seção 5.2, para realizar a simulação das placas a partir da rotina em MATLAB (Apêndice A), dividimos a placa em quatro prismas retangulares e na região do defeito inserimos um grid. Dessa forma, como o defeito presente nessa placa tem uma geometria que se aproxima a de um cilindro, ao invés de variarmos as alturas e a curvatura desses pequemos prismas do grid como para a esfera, fixamos na rotina em MATLAB (Apêndice B) suas respectivas alturas, de modo que nessa abordagem o grid simula um defeito cilíndrico.

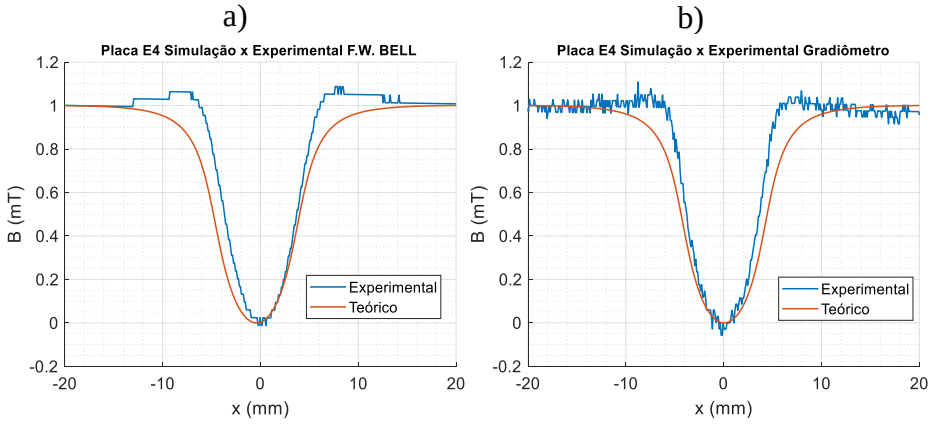

Figura 5.13: Placa E4 (a) Curva teórico e experimental (F. W. BELL 9950), (b)Curva teórico e experimental (Gradiômetro).

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Para essa placa que tem um defeito (Veja tabela 4.1) com profundidade de 5,08 mm, a estimativa por meio da rotina em MATLAB (Apêndice B), obteve um erro de ± 9,29% relacionado a medida experimental obtida com o F.W. BELL modelo 9950, enquanto que para a medida experimental adquirida com o gradiômetro o erro foi de ± 9,42%. O aumento no erro da estimativa a partir dos campos teóricos e experimentais (figura 5.13), em comparação a placa E3 e D5 discutidas nas seções anteriores, é explicado devido a profundidade do defeito desta placa ser maior que os das demais, uma vez que quanto maior a profundidade mais distante o ponto mais profundo do defeito fica afastado do sensor. Além disso, o fato de a diferença de erro de ± 0,13% na estimativa entre os dois sistemas de medida corrobora para o que foi discutido na seção 4.3.1, onde notou-se que ao aumentar a profundidade dos defeitos o sistema gradiométrico equipara-se ao F.W. BELL 9950 e consequentemente como discutido na seção anterior, também na estimativa de profundidade, de modo que o gradiômetro construído no laboratório pode ser considerado um excelente equipamento de baixo custo para detecção de defeitos e a partir dos dados medidos estimar com boa precisão a profundidade desses.

Apresentamos a seguir na tabela 5.2, o desvio padrão das medidas experimentais da profundidade dos defeitos das placas do primeiro grupo realizadas com o apalpador da marca Mitutoyo modelo horizontal 513-404-10T. Na tabela 5.3, mostramos o valor estimado de profundidade dos defeitos dessas placas e o desvio padrão dessas estimativas realizadas a partir da rotina em MATLAB (Apêndice B), nessa tabela “Grad” refere-se a gradiômetro e “N.O” a não observado.

Placas	**Profundidade**	**σ**
E3	1,84 mm	0,05 mm
D5	2,60 mm	0,06 mm
E4	5,08 mm	0,26 mm

Tabela 5.2: Desvio padrão (σ) da medida experimental da profundidade dos defeitos das placas do primeiro grupo.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Placas	F.W. BELL		Gradiômetro		Grad. + Circuito	
	Profundidade	σ	Profundidade	σ	Profundidade	σ
E3	1,64 mm	0,05 mm	2,24 mm	0,17 mm	2,24 mm	0,16 mm
D5	2,30 mm	0,21 mm	2,70 mm	0,12 mm	N.O	N.O
E4	4,78 mm	0,44 mm	4,78 mm	0,45 mm	N.O	N.O

Tabela 5.3: Desvio padrão (σ) da estimativa de profundidade dos defeitos a partir da rotina em MATLAB.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

6
Conclusão

Construímos um equipamento magnético de varredura versátil e de baixo custo, composto por um gradiômetro que utiliza dois sensores de efeito Hall da marca Melexis modelo 90215 com sensibilidade de 3,84 mV/mT, um par de posicionadores da marca Zaber modelo T-LLS260C e um ímã de geometria anel para excitar a placa, o equipamento é automatizado e controlado por um programa em LABVIEW®. Esse equipamento foi eficaz na identificação de defeitos produzidos por eletro-erosão em placas de aço SAE 1020 com profundidades entre 0,01 mm a 5,08 mm e raios entre 0,45 mm a 4,98 mm, sendo equiparável a um equipamento comercial Gaussímetro da marca F.W. BELL modelo 9950 na detecção de defeitos com profundidades maiores que 0,02 mm. O gradiômetro foi mais efetivo na detecção de defeitos de 0,01 mm a 0,02 mm de profundidade e raios de 0,45 mm e 0,5 mm, respectivamente.

Também desenvolvemos uma rotina em MATLAB utilizando o modelo de um prisma retangular para estimar a profundidade dos defeitos das placas, obtivemos com essa rotina resultados com um erro de 3,54%.

Além disso, construímos um sistema de filtros em uma placa de circuito impresso para atenuar o ruído eletrônico e melhorar a sensibilidade de detecção do gradiômetro, que se mostrou eficiente a partir da análise espectral de sinal-ruído e permitiu a obtenção de mapas magnéticos mais nítidos, assim como detectar com maior clareza defeitos com cerca 0,01 mm de profundidade.

O equipamento magnético de varredura construído no laboratório juntamente com o sistema de filtros tem potencial para inspeção em placas de aço utilizadas na indústria e ensaios magnéticos não destrutivos in loco, pois é capaz de identificar defeitos ainda em formação (0,01 mm de profundidade e 0,45 mm de raio). Ademais, devido sua versatilidade, pode ser utilizado tanto para uso na indústria como na pesquisa cientifica em especial nas áreas de fronteira da ciência como na caracterização de amostras in vitro, nanopartículas magnéticas para ensaios imunológicos, micropartículas magnéticas utilizadas no recobrimento de superfícies e amostras de rochas magnéticas.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

7
Referências bibliográficas

AMORIM, F., L. **Tecnologia de Eletroerosão por Penetração da Liga de Alumínio amp 8000 e da Liga de Cobre cube para Ferramentas de Moldagem de Materiais Plásticos**. 2002**.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.

ANTUNES, R. **Susceptibilidade magnética ac de nanopartículas para utilização em hipertermia magnética**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Física) – Departamento de Física, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2016.

Araujo, J., F., D., F., et al. **Characterizing Complex Mineral Structures in Thin Sections of Geological Samples with a Scanning Hall Effect Microscope.** Sensors, 19, 1-16, 2019.

ARAUJO, J., F., D., F., et al. **Novel scanning magnetic microscopy method for the characterization of magnetic nanoparticles**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 499, 1-9, 2020.

ARAUJO, J., F., D., F. **Construção de um Magnetômetro Hall para caracterização de Partículas Magnéticas Utilizadas em Ensaios Imunológicos.** 2009. Dissertação (Mestrado em Física) – Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

ARANTES, L., J., et al. **Avaliação de superfícies usinadas por diferentes fluidos dielétricos no processo de usinagem por eletroerosão**. Metalurgia e Materiais, 56 (2), 91-96, 2003.

ARENAS, M., P., et al. **Evaluation of electric and magnetic signals in heat-resistant HP alloys using scanning probe microscopy**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 491, 1-8, 2019.

C. Li, et al. **Microstructures and mechanical properties of stainless steel clad plate joint with diverse fillermetals**, J. Mater Res Technol. In Press (2020).

C. Rao, et al. **Magneto-optical fiber sensor based on Fabry-Perot interferometer with perovskite magnetic material**. J. Magn. Magn. Mater. 499 (2020) 1-7

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Camacho, J. M.; Sosa, V. **Alternative method to calculate the magnetic field of permanent magnets with azimuthal symmetry**. Revista Mexicana de Física, 59, 8-17, 2013.

Carvalho, H., R; Bruno, A., C. **A Compact SQUID Magnetometer for Thermoremanent Magnetization Immunoassays.** IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 21, 481-484, 2011.

CALLISTER, W., D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

Camuñas-Mesa, L., A..; Linares-Barranco, B.; Serrano-Gotarredona, T. **Neuromorphic Spiking Neural Networks and Their Memristor-CMOS Hardware Implementations**. Materials, 12, 1-28, 2019.

CHEMLA, T., R., et al. **Ultrasensitive magnetic biosensor for homogeneous immunoassay**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 97(26), 14268–14272, 2000.

CHIEH, J., et al. **Eight-Channel AC Magnetosusceptometer of Magnetic Nanoparticles for High-Throughput and Ultra-High-Sensitivity Immunoassay**. Sensor, 18, 1-9, 2018.

CLARKE, J; BRAGINSKI, A., I. **The SQUID Handbook: Fundamentals and Technology of SQUIDs and SQUID Systems**. Berlim: Wiley-Vch, 2006.

COEY, J., M., D. **Magnetism and Magnetic Materials**. New York: Cambridge University Press, 2009.

CULLITY, B., D.; GRAHAN, C., D. **INTRODUCTION TO MAGNETIC MATERIALS**. New Jarsey: John Wiley & Sons, 2009.

Demory, F., et al. **A New High-Resolution Magnetic Scanner for Sedimentary Sections.** Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 20, 3186-3200, 2019.

FARIA, R., N.; LIMA, L., F., C., P. **Introdução ao magnétismo dos materiais**. São Paulo: Editora da Física, 2005.

Figueroa, A., I., et al. **Low temperatureradio-frequency transverse susceptibility measurements using a CMOS oscillator circuit**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 324, 2669-2675, 2012.

F.W. BELL. **Manual Gaussímetro F.W. BELL**: modelo 9950.

F.W. BELL. **Manual Probe Gaussímetro F.W. BELL**: série 9000.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

G. Psuj**, Utilization of Multisensor Data Fusion for Magnetic Nondestructive Evaluation of efects in Steel Elements under Various Operation Strategies**. Sensors 18 (2018) 1-22

GRIFFITHS, D., J. **Eletrodinâmica.** São Paulo: Pearson Addison Wesley, 2011.

GUIMARÃES, A., P., F. **Magnetismo e Ressonância Magnética em Sólidos**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2009.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. **Fundamentos de Física: Eletromagnetismo**. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HEIMFART, T. **Desenvolvimento de sensores magnéticos tipo fluxgate miniaturizados utilizando ligas ferromagnéticas eletrodepositadas**. 2014. Tese (Doutorado em Física Aplicada) – Faculdade de Filosfica, Ciências e Letras de Ribeirão Preto, Universidade de São Paulo, 2014.

Ikeda, S., et al. **Tunnel magnetoresistance of 604% at 300 K by suppression of Ta diffusion in CoFeB/MgO/CoFeB pseudo-spin-valves annealed at high temperature**. Applied Physics Letters, 93, 0825081-0825084, 2009.

J. Tang, et al. **The effect of H2S concentration on the corrosion behavior of carbon steel at 90ºC**. Corrosion Science 52 (2010) 2050-2058

JILES, D. **Introduction to magnetism and magnetic materials**. Flórida: Taylor e Francis Group, 2015.

KLETETSCHKA, G., et al. **Magnetic scanning and interpretation of paleomagnetic data from Prague Synform's volcanics**. Studia Geophysica et Geodaetica, 57, 103-117, 2012.

LIMA, F., E.; CORRÊA, M. **Efeitos da eletroerosão sobre a superfície de peças usinadas**. Revista Tecnologia, 27(1), 26-33, 2006.

Löhndorf, M., et al. **Characterization of magnetostrictive TMR pressure sensors by MOKE.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 316, e223-e225, 2007.

LUDWIG, F., et al. **Magnetorelaxometry of magnetic nanoparticles with fluxgate magnetometers for the analysis of biological targets**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 293, 690-695, 2005.

MELEXIS. **Manual Melexis**: modelo 90215.

MELEXIS. **DataSheet Melexis**: modelo 90215.

Michelena, M., D. Commercial Off-The-Shelf GMR Based Sensor on Board Optos Picosatellite. In: Reig, C.; Cardoso, S.; Mukhopadhyay, S., C. (Orgs). **Giant Magnetoresistance (GMR) Sensors**. 1.ed. Berlim: Springer, 2013. cap. 8, 181-210.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Moisello, E., et al. **An Integrated Thermopile-Based Sensor with a Chopper-Stabilized Interface Circuit for Presence Detection**. Sensor, 19, 1-19, 2019.

Neslušan, M., et al. **Non-destructive monitoring of corrosion extent in steel rope wires via Barkhausen noise emission**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 484, 179-178, 2019.

Noguchi, A., et al. **Scanning SQUID microscopy of a ferromanganese crust from the northwestern Pacific: Submillimeter scale magnetostratigraphy as a new tool for age determination and mapping of environmental magnetic parameters**. Geophysical Research Letters, 44, 5360-5367, 2017.

NUSSENZVEIG, H., M. **Curso de Física Básica 3: Eletromagnetismo**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.

Pacheco, C., J.; Bruno, A., C. **A Noncontact Force Sensor Based on a Fiber Bragg Grating and Its Application for Corrosion Measurement**. Sensor, 13, 11476-11489, 2013.

Pastore, Z., et al**. Mapping magnetic sources at the millimeter to micrometer scale in dunite and serpentinite by high-resolution magnetic microscopy**. Lithos, 328, 174-190, 2018

Pereira, J., M., B., et al. **Novel scanning dc-susceptometer for characterization of heat-resistant steels with different states of aging.** Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 442, 311-318, 2017.

R. Błażej, et al. **The use of magnetic sensors in monitoring the condition of the core in steel cord conveyor belts – Tests of the measuring probe and the design of the DiagBelt system**. Measurement 123 (2018) 48-53.

Reig, A.; Cubells-Beltrán, M., D; Munõz, D. R. **Magnetic Field Sensors Based on Giant Magnetoresistance (GMR) Technology: Applications in Electrical Current Sensing.** Sensor, 9, 7919-7942, 2009.

REIS, A., L., A., et al. **Estimating the magnetization distribution within rectangular rock samples**. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 17, 3350-3374, 2016.

Schnoz, S., et al. **Detection of liquids by magnetic resonance force microscopy in the gradient-on-cantilever geometry**. Journal of Magnetic Resonance, 298, 85-90, 2019.

Sinnecker, J., P. **Materiais Magnéticos Doces e Materiais Ferromagnéticos Amorfos**. Revista Brasileira de Ensino de Física. 22, 3, 396-405, 2000.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

SOUDABEH, A., et al. **Magnetic Fe3O4 nanoparticles coated by natural rubber latex as MRI contrast agent**. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 475, 458-464, 2019.

TAKEUCHI, A., Y. **Técnicas de medidas magnéticas**. São Paulo: Editora da Física, 2010.

Wickramasinghe, H., K. **Scanning probe microscopy: Current status and future trends.** Journal of Vacuum Science & Technology A 8, 363-368, 1990.

Wiesendanger, R., et al. **Magnetic nanostructures studied by scanning probe microscopy and spectroscopy**. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena 15, 1330-1334, 1997.

ZABER. **Manual Zaber Technologies**: T-series.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

7
Apêndice

Apêndice A: Prisma retangular (Simulação dos defeitos)

```
%MODELO TEORICO DO PRISMA RETANGULAR
clear
close all
clc
%DADOS COMUNS A TODAS AS CAMADAS:
z = 0.001/1000;

disp(['z_sensor = 'num2str(z*1000) ' mm'])
%ENTRADAS PARA O MAPA
% Tamanho do Mapa em [mm] TM = [x y]
TM = [160 160]*1e-3;
% Em mm
[x , y] = meshgrid ( - TM(1)/2:rs:TM(1)/2,-TM(2)/2:rs:TM(2)/2);

% Tamanho da Placa em [mm]
PT = [140 140]*1e-3;
% Espessura da placa
Pz = 6.95*1e-3;
% raio do defeito Maior
rM=17.31/1000/2
% raio do defeito menor
rm=17.31/1000/2;
% diferença de altura entre defeitos
K=00/1000;
% raio da esfera maior
re1=sqrt( ((rM^2 - rm^2 - K^2)/(2*K))^2 + rM^2);
hre=sqrt(re1^2 - rM^2);
% Profundidade do defeito da esfera maior
hD=abs(re1-hre);
% profundidade total dos defeitos
hd=2.60/1000;
% raio da esfera menor
re2 = abs((rm^2 + (hd-K)^2)/(2*(hd-K)));
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
hre2 = re2 - hd-K ;

% Tamanho do Prisma Rectangular em [mm] Ps = [x y z]
Ps = [PT(1)/2 - rM PT(2) Pz]/2;
Ps_i = [rM*2 PT(2)/2 - rM Pz]/2;

a = Ps(1);
b = Ps(2);
c = Ps(3);

a_i = Ps_i(1);
b_i = Ps_i(2);
c_i = Ps_i(3);
% close all

% Posição do Prisma Rectangular em [mm] Ps = [x y z] ([0 0 0] coloca
na origem)
Pop = [PT(1)-Ps(1)*2 0 0]/2;
Pop2 =  -[PT(1)-Ps(1)*2 0 0]/2;
Pop3 = [0 PT(2)-Ps_i(2)*2 0]/2;
Pop4 =  -[0 PT(2)-Ps_i(2)*2 0]/2;

% calcula o campo B com uma magnetização MG
Bx1 = Prism_RX(x + Pop(1) , y + Pop(2) , z + Pop(3) ,a,b, c);
Bx2 = Prism_RX(x + Pop2(1) , y + Pop2(2) , z + Pop2(3),a,b,c);
Bx3 = Prism_RX(x + Pop3(1) , y + Pop3(2) , z + Pop3(3),a_i,b_i,c_i);
Bx4 = Prism_RX(x + Pop4(1) , y + Pop4(2), z + Pop4(3),a_i,b_i ,c_i);
BX = Bx1 + Bx2 + Bx3 + Bx4;
By1 = Prism_RY(x + Pop(1) , y + Pop(2) , z + Pop(3) , a , b , c);
By2 = Prism_RY(x + Pop2(1) ,y + Pop2(2) , z + Pop2(3) , a , b , c);
By3 = Prism_RY(x + Pop3(1) ,y + Pop3(2),z + Pop3(3) , a_i , b_i,c_i);
By4 = Prism_RY(x + Pop4(1),y + Pop4(2),z + Pop4(3),a_i , b_i , c_i);
BY = By1 + By2 + By3 + By4;
Bz1 = Prism_RZ(x + Pop(1) , y + Pop(2) , z + Pop(3) , a , b , c);
Bz2 = Prism_RZ(x + Pop2(1) , y + Pop2(2) , z + Pop2(3),a ,b,c);
Bz3 = Prism_RZ(x + Pop3(1),y + Pop3(2),z + Pop3(3),a_i, b_i , c_i);
Bz4 = Prism_RZ(x + Pop4(1) ,y + Pop4(2) , z + Pop4(3),a_i,b_i, c_i);
%Soma dos prismas ao redor do defeito
BZ = Bz1 + Bz2 + Bz3 + Bz4;

%%
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
f = figure(1);
clf(1)
hold on
ax=pcolor(x,y,BZ);
ax.EdgeColor='none';
ax=contour(x,y,BZ);
%Posicionando os prismas retangulares
rectangle('Position',[-Pop(1)-a Pop(2)-b a*2 b*2])
rectangle('Position',[-Pop2(1)-a Pop2(2)-b a*2 b*2])
rectangle('Position',[-Pop3(1)-a_i Pop3(2)-b_i a_i*2 b_i*2])
rectangle('Position',[-Pop4(1)-a_i Pop4(2)-b_i a_i*2 b_i*2])
axis square
% Resolução de solução do defeito
rmd = rs*10;
disp(['resolução do defeito ' num2str(rmd/1000) ' mm'])
disp('Loop');
rsf=20; %resolução do defeito
ff=rM*2/rsf; %tamnho do quadrado

for fx =  0:rsf-1
for fy =  0:rsf-1
xd=-rM+ff*fx+ff/2;
yd=-rM+ff*fy+ff/2;
hm = sqrt(sqrt(xd.^2 + yd^2).^2 - re1^2);
hfd1 =  - imag(hm) + hre;
hm2 = sqrt(sqrt(xd.^2 + yd^2).^2 - re2^2);
hfd2 =  - imag(hm2) + hre2;
hfd = abs(Pz + min([0 hfd2 hfd1]));
pzd = abs(Pz-hfd);
Psd = [ff ff hfd]/2;
ad = Psd(1);
bd = Psd(2);
cd = Psd(3);
Posd = [xd yd -Pz/2+hfd/2];
BZ = BZ + Prism_RZ(x + Posd(1),y +Posd(2),z + Posd(3),ad,bd , cd);
figure(44)
hold on
rectangle('Position',[-Posd(1)-ad Posd(3)-cd ad*2 cd*2])
rectangle('Position',[-Pop4(1)-a_i Pop4(3)-c_i a_i*2 c_i*2])
pause(0.01)
end
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
f = figure(1);
clf(1)
hold on
zero=0;

ax=surf(x*1e3,y*1e3,BZ*1e10);
ax.EdgeColor='none';
rectangle('Position',[-1/2 -1/2 1 1]*rM*2,'Curvature',1)
rectangle('Position',[-1/2 -1/2 1 1]*rm*2,'Curvature',1)
colormap jet
CB = colorbar;
set(get(CB,'title'),'string','B_z (mT)');
CL = CB.Limits;
CL = [ -1 1]*max(abs(CL));
CB.Limits = CL;
caxis(CL);
axis square tight
title 'Simualação Placa D5'
xlabel 'X (mm)'
ylabel 'Y (mm)'
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Apêndice A.1: Prisma retangular (Simulação dos defeitos) sub-rotina

```
% Sub-rotina de BZ
function Bz = Prism_RZ(x,y,z,a,b,c)
u0 = 4*pi.*1e-7; %CONSTANTE DE PERMEABILIDAE MAGNÉTICA NO VÁCUO
M = 3/1000; %M (T) É A MAGNETIZÃO IMPRIMIDA NA AMOSTRA EM Z
K = -u0*M/(4*pi);
Fz1 = F_1(-x,y,z,a,b,c);
Fz2 = F_1(-x,y,-z,a,b,c);
Fz3 = F_1(-x,-y,z,a,b,c);
Fz4 = F_1(-x,-y,-z,a,b,c);
Fz5 = F_1(x,y,z,a,b,c);
Fz6 = F_1(x,y,-z,a,b,c);
Fz7 = F_1(x,-y,z,a,b,c);
Fz8 = F_1(x,-y,-z,a,b,c);
Bz= K.*(Fz1+Fz2+Fz3+Fz4+Fz5+Fz6+Fz7+Fz8);
function Br = F_1(x,y,z,a,b,c)
Br=atan(((x+a).*(y+b))./((z+c).*sqrt((x+a).^2+(y+b).^2+(z+c).^2)))
```

Apêndice B: Estimar profundidade dos defeitos

```
%% INICIALIZAÇÃO

clear
close all
clc
addpath('Functions')
nf=14;
% Arquivos
%% CARREGAR DADOS
% nome do arquivo data Experimental
expfile ='PLaca_D5_NewMed_100_22_11_conf.txt';
a=load(expfile);
[lin,col]=size(a);
stpx = 0.100;
stpy = 0.100;
% interpola um plano com 4 pontos
[X,Y] = meshgrid(0:col*stpx:col*stpx,0:lin*stpy:lin*stpy);
[Xi,Yi] = meshgrid(0:stpx:(col-1)*stpx,0:stpy:(lin-1)*stpy);
B(1,1) = a(1,1); B(1,2) = a(1,end); B(2,1) = a(end,1); B(2,2) =
a(end,end);
b = interp2(X,Y,B,Xi,Yi);
% retira o plano interpolado
f=a-b;
% calibracao sensor A mT/mV;
Bf= -f/0.173; %V/mT
figuraColorEloi(Xi,Yi,Bf);
title('Placa D5 Gradiômetro Experimental - step 100\mum')
%% CORREÇÃO
% Adicionar pontos de referência para fazer correção Ref =[ x_menor
x_maior y_menor y_maior]
Ref=[3.4 46.4 3.7 41.9];
Bfc=fieldCorrection(Xi,Yi,Bf,Ref);
Bfc=fieldCorrection(Xi,Yi,Bfc,Ref);
% FAZER PLOT DO CAMPO NIVELADO E DESNIVELADO
[A B]=find(Bf==min(min(Bf)));
Xu=Xi-Xi(A,B)+0.5;
Yu=Yi-Yi(A,B)-0.5;
[xa,sxa,ya,sya]=slicingField(Xu,Yu,Bf,A+5,B-5);
[xb,sxb,yb,syb]=slicingField(Xu,Yu,Bfc,A+5,B-5);
figure(101)
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
hold on
plot(xa,sxa,'LineWidth',1.25)
plot(xb,sxb,'LineWidth',1.25)
xlabel('x (mm)','Fontsize',nf);
ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
set(gca,'Fontsize',nf);
title('Fatia X D5 - Gradiômetro - step 100\mum
correção','fontsize',12)
grid on
grid minor
legend('Experimental','Corrigido','Location','best')
figure(202)
hold on
plot(ya,sya,'LineWidth',1.25)
plot(yb,syb,'LineWidth',1.25)
xlabel('y (mm)','Fontsize',nf);
ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
set(gca,'Fontsize',nf);
title('Fatia Y D5 - Gradiômetro - step 100\mum
correção','fontsize',12)
grid on
grid minor
legend('Experimental','Corrigido','Location','best')
%% Plota o Map Experimental
figuraColorEloi(Xi,Yi,-Bf);
title('PLaca D5 Gradiômetro Experimental - step 100\mum')
%Plota o Exp corrigido
figuraColorEloi(Xi,Yi,-Bfc);
title('PLaca D5 Gradiômetro Experimental - step 100\mum corrigido')
%Traça linha na metade do defeito em X e Y
[A B]=find(Bfc==min(min(Bfc)));
Xi=Xi-Xi(A,B)+0.5;
Yi=Yi-Yi(A,B)-0.5;
% AFERIMENTO
figure2= figuraColorEloi(Xi,Yi,-Bfc);
hold on
plot3(Xi(1,:),Xi(1,:)*0,Xi(1,:),'k')
plot3(Yi(:,1)*0,Yi(:,1),Yi(:,1),'k')
rm=16/2;
rectangle('Position',[-1/2 -1/2 1 1]*rm*2,'Curvature',1)
axis equal
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
figure_center= figuraColorEloi(Xi,Yi,Bfc);
title ('Placa D5 Experimental')
 [Au Bp]=find(Xi<=0);
 Bp= max(Bp)
[Ap Bu]=find(Yi<=0);
 Ap= max(Ap)
[sX,sBx,sY,sBy]=slicingField(Xi,Yi,Bfc,Ap,Bp);
sX=Xi(1,:);
sY=Yi(:,1);
% Aferir normalização fatias
indexx=find(sX<=-20);
[NsBx Nvalx] = normPL(sBx,[-0.2849 indexx(end)]);
Map_1 =(Bfc - Nvalx(1))./Nvalx(2);
indexy=find(sY<=-20);
[NsBy Nvaly] = normPL(sBy,[-0.2903 indexy(end)]);
%Plota o traço da linha em X
figure(10)
colormap jet
hold on
plot(sX,NsBx,'LineWidth',1.25);
xlabel('x (mm)','Fontsize',nf);
ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
set(gca,'Fontsize',nf);
title('Fatia    X    D5    -    Gradiômetro    -    step    100\mum
Corrigido','fontsize',12)
grid on
grid minor
%Título para resultados
%title('Placa D5 Simulação x Experimental','fontsize',12)
legend('Experimental', 'Teórico','Location','best')
grid on
grid minor
ax = gca; % current axes
ax.XLim=[-20 20];
axx=ax.XLim;
%Plota o traço da linha em Y
figure(20)
%clf(20)
colormap jet
hold on
plot(sY, NsBy,'LineWidth',1.25)
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
xlabel('y (mm)','Fontsize',nf);
ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
set(gca,'Fontsize',nf);
title('Fatia Y D5 - Gradiômetro - step 100\mum
Corrigido','fontsize',12)
%Título para resultados
%title('Placa Y D5 Simulação x Experimental','fontsize',12)
legend('Experimental','Teórico','Location','best')
grid on
grid minor
ay = gca; % current axes
ay.XLim=[-20 20];
axy=ay.XLim;
%%
ErrorVec=[];
%Valor de referência para estimar a profundidade
Valor_prof_ref=2.54;
dih=0.1;
for p_def=Valor_prof_ref-dih:dih/4:Valor_prof_ref+dih
hs= 0.001/1000;
hd= p_def/1000;
save('TM.mat','Xi','Yi','hs','hd')
%corre simulação
 run('Placa_defeitos')
%carrega dados simulação
load('Results_Esfera.mat')
%Tira linha da simulação
[sXf,sBxf,sYf,sByf]=slicingField(Xf,Yf,Bfig);
%Ponto para zerar
index=find(sXf<=-20);
[NsBxf Nvalx] = normPL(sBxf,[min(sBxf) index(end)]);
 index=find(sYf<=-20);
 [NsByf Nvaly] = normPL(sByf,[min(sByf) index(end)]);
%normaliza o campo
Map_2 =(Bfig - Nvalx(1))./Nvalx(2);
 Bsubs= Map_1-Map_2;
 figure7=figure(77);
 clf(77)
 figure7=figuraColorEloi(Xi,Yi,Bsubs);
 title('Subtração Campos Normalizados')
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
[xx,sx,yy,sy]=slicingField(Xf,Yf,Bsubs,A+5,B-5);
 figure(15)
 hold on
 plot(xx,sx,'LineWidth',1.25)
 xlabel('x (mm)','Fontsize',nf);
 ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
 set(gca,'Fontsize',nf);
 title('Fatia X D5 - Gradiômetro-step 100\mum substração','fontsize',12)
 figure(10)
 hold on
 plot(sXf,NsBxf,'LineWidth',1.25)
 xlabel('x (mm)','Fontsize',nf);
 ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
 set(gca,'Fontsize',nf);
 legend ('Teórico')
 grid on
 grid minor
 ax = gca; % current axes
 ax.XLim=axx;
 figure(20)
 hold on
 plot(sYf,NsByf,'LineWidth',1.25)
 xlabel('y (mm)','Fontsize',nf);
 ylabel('B (mT)','Fontsize',nf);
 set(gca,'Fontsize',nf);
 ay= gca; % current axes
 ay.XLim=axy;
 meanPctDiffx = norm(NsBxf-NsBx,2)/norm(NsBx)*100;
 meanPctDiffy = norm(NsByf-NsBy,2)/norm(NsBy)*100;
 disp(['erro meio x: ' num2str(meanPctDiffx)  '%' ])
 disp(['erro meio y: ' num2str(meanPctDiffy)  '%' ])
 %Cálculo do erro
 ErrorVec=[ErrorVec; p_def meanPctDiffx meanPctDiffy]
 end
[minErr indx]=min(ErrorVec(:,2));
 ErrorVec(indx,:)
 ErrorVec(:,:)
```

Apêndice B.1: Estimar profundidade dos defeitos (sub-rotina normalização)

```
if(nargin>1)
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
mv=ops(1);
NV=V-mv;
Mv=NV(ops(2));
NormV=NV./Mv;
else
mv=min(min(V));
NV=V-mv;
Mv=max(max(abs(NV)));
end
Nval=[mv Mv]
```

Apêndice B.2: Estimar profundidade dos defeitos (sub-rotina simulação)

```
%MODELO TEORICO DO PRISMA RETANGULAR PARA ESTIMAR DEFEITOS
addpath('Functions')
%DADOS COMUNS A TODAS AS CAMADAS:
%ENTRADAS PARA O MAPA
% % resolução em [mm]
rs = [0.1]*1e-3;
load('TM.mat');
z = hs;
disp(['z_sensor = ' num2str(z*1000) ' mm']);
x=Xi/1000;
y=Yi/1000;
% Tamanho da Placa em [mm]
PT = [140 140]*1e-3;
% Espessura da placa
Pz = 6.82*1e-3;
% raio do defeito Maior
rM=17.67/1000/2;
% raio do defeito menor
rm=17.67/1000/2;
% diferença de altura entre defeitos
K=00/1000;
% raio da esfera maior
re1=sqrt( ((rM^2 - rm^2 - K^2)/(2*K))^2 + rM^2);
hre=sqrt(re1^2 - rM^2);
% Profundidade do defeito da esfera maior
hD=abs(re1-hre);
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
% raio da esfera menor
re2 = abs((rm^2 + (hd-K)^2)/(2*(hd-K)));
hre2 = re2 - hd-K ;
% disp(['Propoção de interseção da esfera ' num2str(PE) '%'])
% disp(['Raio da esfera ' num2str(re*1000) 'mm'])
% Tamanho do Prisma Rectangular em [mm] Ps = [x y z]
Ps = [PT(1)/2 - rM PT(2) Pz]/2;
Ps_i = [rM*2 PT(2)/2 - rM Pz]/2;
a = Ps(1);
b = Ps(2);
c = Ps(3);
a_i = Ps_i(1);
b_i = Ps_i(2);
c_i = Ps_i(3);
% close all
% Posição do Prisma Rectangular em [mm] Ps = [x y z] ([0 0 0] coloca
na origem)
Pop = [PT(1)-Ps(1)*2 0 0]/2;
Pop2 =  -[PT(1)-Ps(1)*2 0 0]/2;
Pop3 = [0 PT(2)-Ps_i(2)*2 0]/2;
Pop4 =  -[0 PT(2)-Ps_i(2)*2 0]/2;
Bz1 = Prism_RZ(x + Pop(1) , y + Pop(2) , z + Pop(3) , a , b , c);
Bz2 = Prism_RZ(x + Pop2(1) , y + Pop2(2) , z + Pop2(3) , a , b ,
c);
Bz3 = Prism_RZ(x + Pop3(1) , y + Pop3(2) , z + Pop3(3) , a_i , b_i
, c_i);
Bz4 = Prism_RZ(x + Pop4(1) , y + Pop4(2) , z + Pop4(3) , a_i , b_i
, c_i);
BZ = Bz1 + Bz2 + Bz3 + Bz4;
disp('Loop');
rsf=20; %resolução do defeito
ff=rM*2/rsf; %tamnho do quadrado
figure1=figure(1);
figure2=figure(2);
for fx =  0:rsf-1
for fy =  0:rsf-1
xd=-rM+ff*fx+ff/2;
yd=-rM+ff*fy+ff/2;
hm = sqrt(sqrt(xd.^2 + yd^2).^2 - re1^2);
hfd1 =  - imag(hm) + hre;
hm2 = sqrt(sqrt(xd.^2 + yd^2).^2 - re2^2);
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

```
hfd2 =  - imag(hm2) + hre2;
hfd = abs(Pz + min([0 hfd2 hfd1]));
pzd = abs(Pz-hfd);
Psd = [ff ff hfd]/2;
ad = Psd(1);
bd = Psd(2);
cd = Psd(3);
Posd = [xd yd -Pz/2+hfd/2];
 BZ = BZ + Prism_RZ(x + Posd(1) , y + Posd(2) , z +Posd(3),ad,bd,cd);
end
close(figure1)
figure1=figuraColorEloi(x*1000,y*1000,(BZ-BZ(1,1))*1e10);
close(figure2)
figure2=figuraColorEloi(x*1000,y*1000,(BZ-BZ(1,1))*1e10);
hold on
rectangle('Position',[-1/2 -1/2 1 1]*rM*2,'Curvature',1)
rectangle('Position',[-1/2 -1/2 1 1]*rm*2,'Curvature',1)
title 'Simulação Placa D5'
%%
Xf=x*1000;
Yf=y*1000;
Bfig=BZ;
```

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

Apêndice D.1: Procedimento de medida F.W. BELL 9950

Para realizarmos as medidas magnéticas devemos seguir um procedimento de medida utilizando o painel de controle do programa em LABVIEW. A seguir descreveremos brevemente o procedimento utilizado a primeira montagem do equipamento construído no laboratório (F.W. BELL 9950).

1. O primeiro passo, após inicializar o programa, é resetar os posicionadores como um procedimento de segurança, de modo a evitar posicionar a placa em uma região perigosa e para garantir que os posicionadores estão se comunicando com o programa.

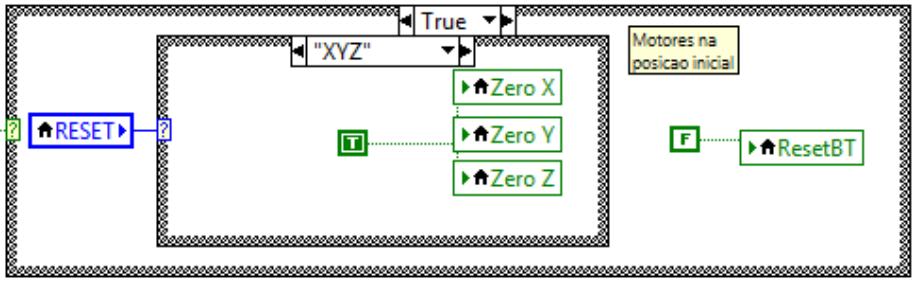

Figura 7.1: Rotina em LABVIEW para resetar os posicionadores no sistema com o F.W. BELL 9950.

2. O segundo passo é atribuir um arquivo .txt para salvar os dados referentes a leitura.

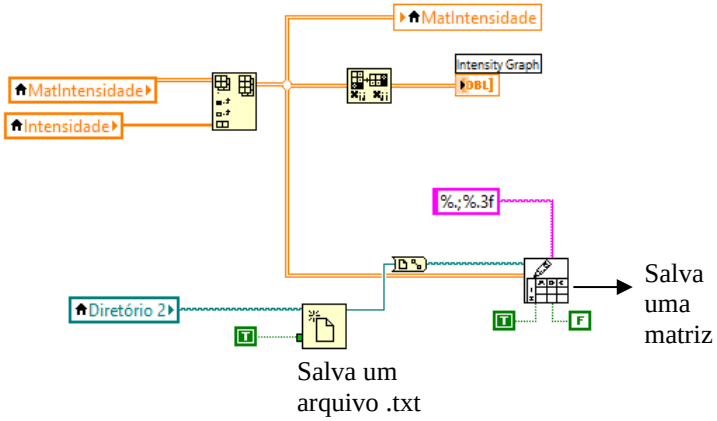

Figura 7.2: Rotina que salva os dados da leitura magnética com o F.W. BELL 9950.

3. O último passo é determinar a área de varredura, esse procedimento define em que região realizaremos o mapeamento, para o caso de uma medida magnética do defeito selecionamos uma região entre as bordas e o defeito, enquanto que para um mapeamento da placa inteira a região deve ser um pouco maior que a área da placa. O tamanho da área em uma medida magnética do defeito é variável e depende do raio do defeito.

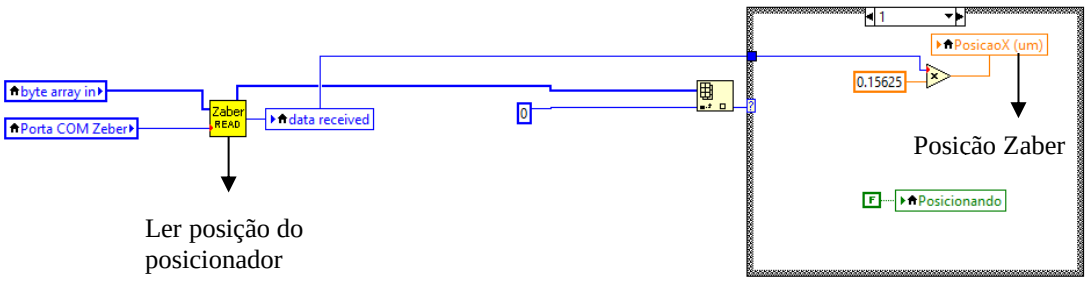

Figura 7.3: Rotina para posicionar o atuador Zaber T-LLS260C no sistema com o F.W. BELL 9950.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

A figura 8.4 apresenta, com destaque para as etapas da rotina descrita acima, a interface do painel principal do programa em LABVIEW, para o F.W. BELL 9950, onde esse procedimento é realizado. A figura 8.5 exibe uma visão geral do diagrama de blocos desse programa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

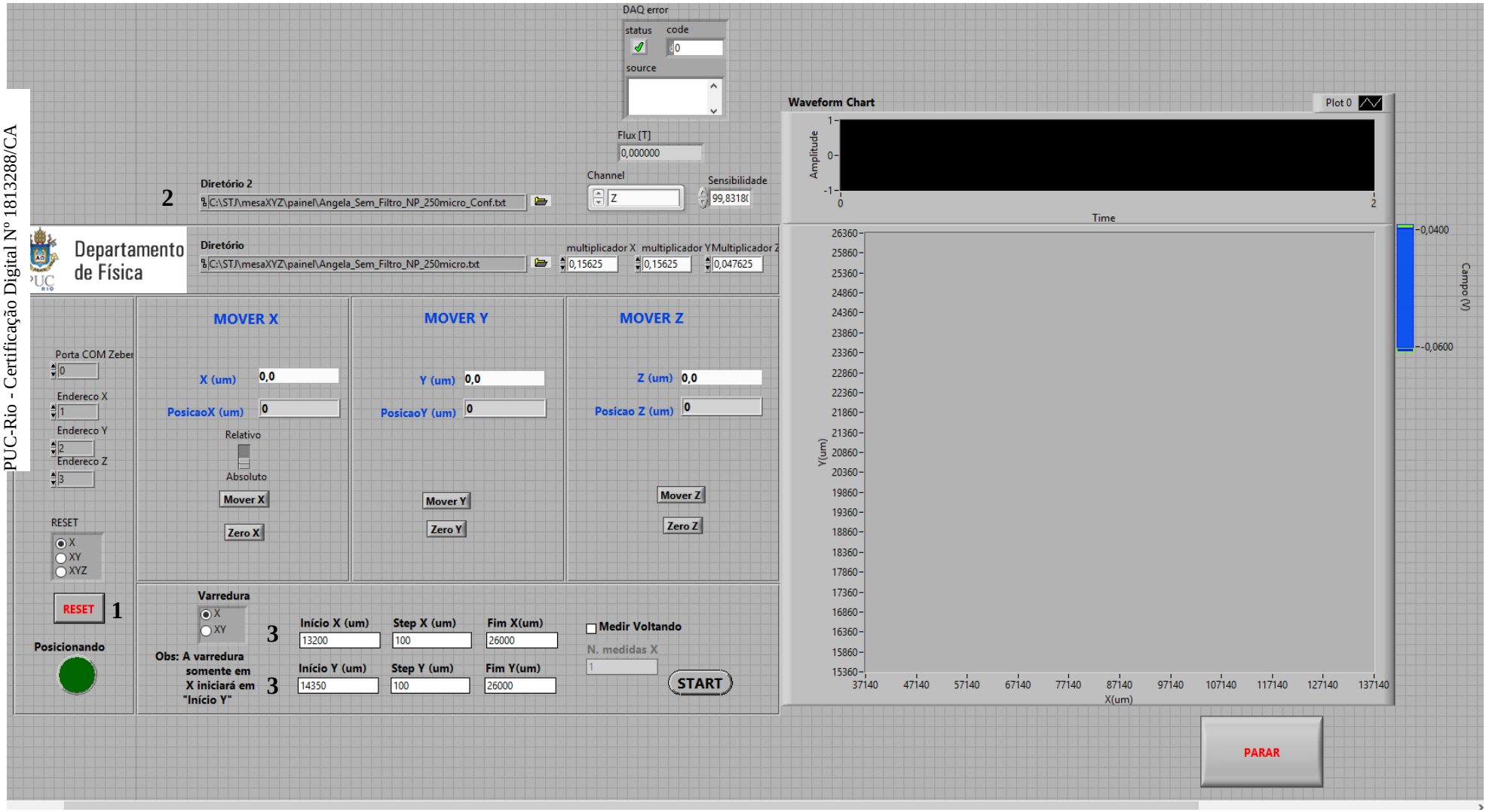

Figura 7.4: Painel principal do programa em LABVIEW para o F.W. BELL 9950.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

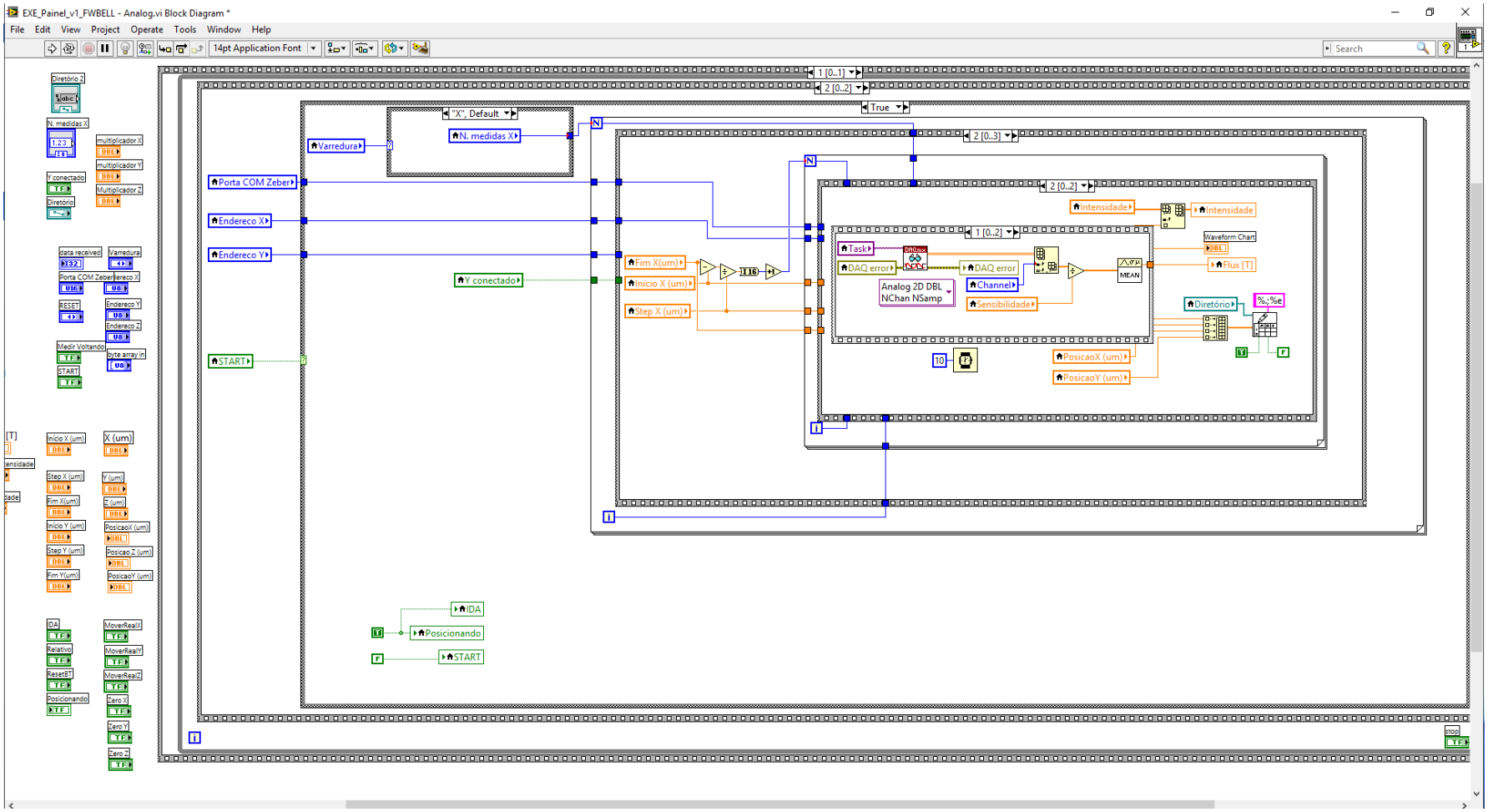

Figura 7.5: Visão geral do diagrama de blocos do programa em LABVIEW para o F.W. BELL 9950.

Apêndice D.2: Procedimento de medida Gradiômetro

Da mesma forma como descrito anteriormente, para realizarmos medidas magnéticas utilizando a segunda montagem (gradiômetro), devemos seguir um procedimento de medida utilizando a interface do programa em LABVIEW. A seguir descreveremos brevemente o procedimento utilizado para esse sistema de medida.

1. O primeiro passo, após inicializar o programa, é resetar os posicionadores como um procedimento de segurança, de modo a evitar posicionar a placa em uma região perigosa e para garantir que os posicionadores estão se comunicando com o programa.

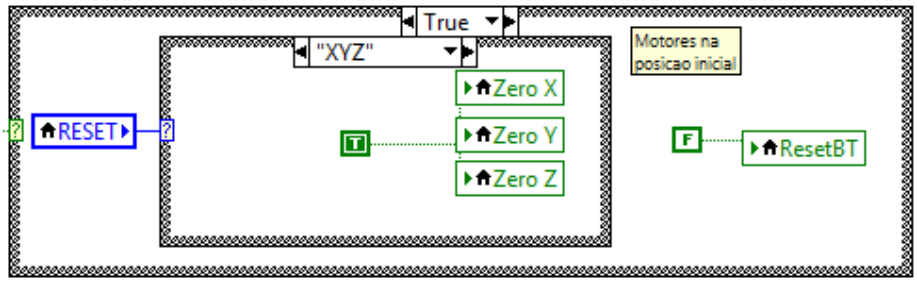

Figura 7.6: Rotina em LABVIEW para resetar os posicionadores no sistema gradiométrico.

2. O segundo passo é atribuir um arquivo .txt para salvar os dados referentes a leitura.

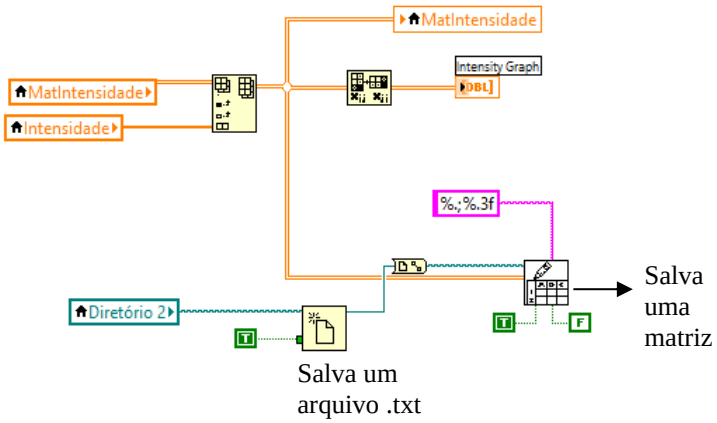

Figura 7.7: Rotina que salva os dados da leitura magnética para o sistema gradiométrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

3. O passo seguinte é zerar os sensores, esse procedimento permite alterar o offset dos sensores, de maneira que ao executarmos essa função o sensor considera a leitura momentânea como “zero”, desse jeito é possível medirmos magneticamente o defeito das placas, realizando esse procedimento enquanto os sensores estão posicionados sobre a região da placa afastados das bordas e do defeito.

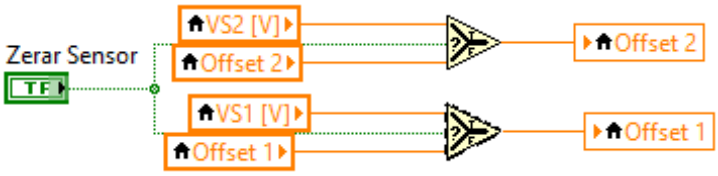

Figura 7.8: Rotina em LABVIEW para zerar os sensores do gradiômetro.

4. Após esse procedimento, determinamos a área em que faremos a varredura. Para ambas as montagens, essa etapa consiste em delimitar uma região onde o defeito fique centralizado, ou que a placa inteira seja centralizada. As regiões de varredura para as medidas magnéticas dos defeitos das placas dependem do raio desses.

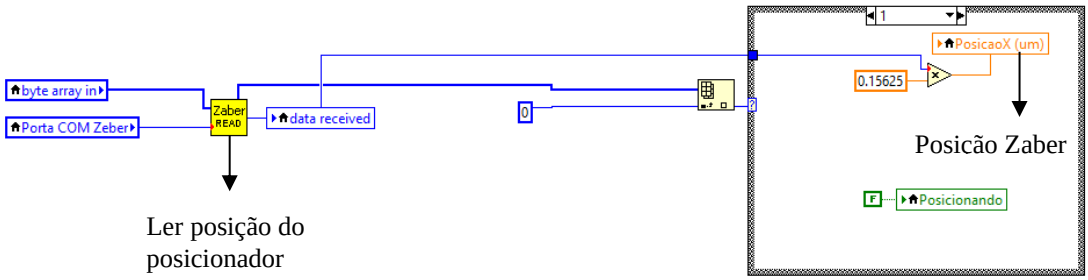

Figura 7.9: Rotina para posicionar o atuador Zaber T-LLS260C no sistema gradiométrico.

5. Por fim, antes de iniciarmos a varredura, determinamos o tempo de espera entre amostras, essa função determina quanto tempo a placa ficará parada até o próximo passo (movimento). Os valores utilizados foram 20 ms e 100 ms, quanto maior o tempo mais demorada será a medida magnética.

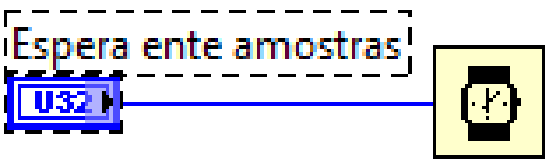

Figura 7.10: Rotina de espera entre tirada de amostras do sistema gradiométrico.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

A figura 8.11 exibe a interface do programa em LABVIEW para o gradiômetro, com destaque para as etapas descritas anteriormente. A figura 8.12 exibe uma visão geral do diagrama de bloco desse programa.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

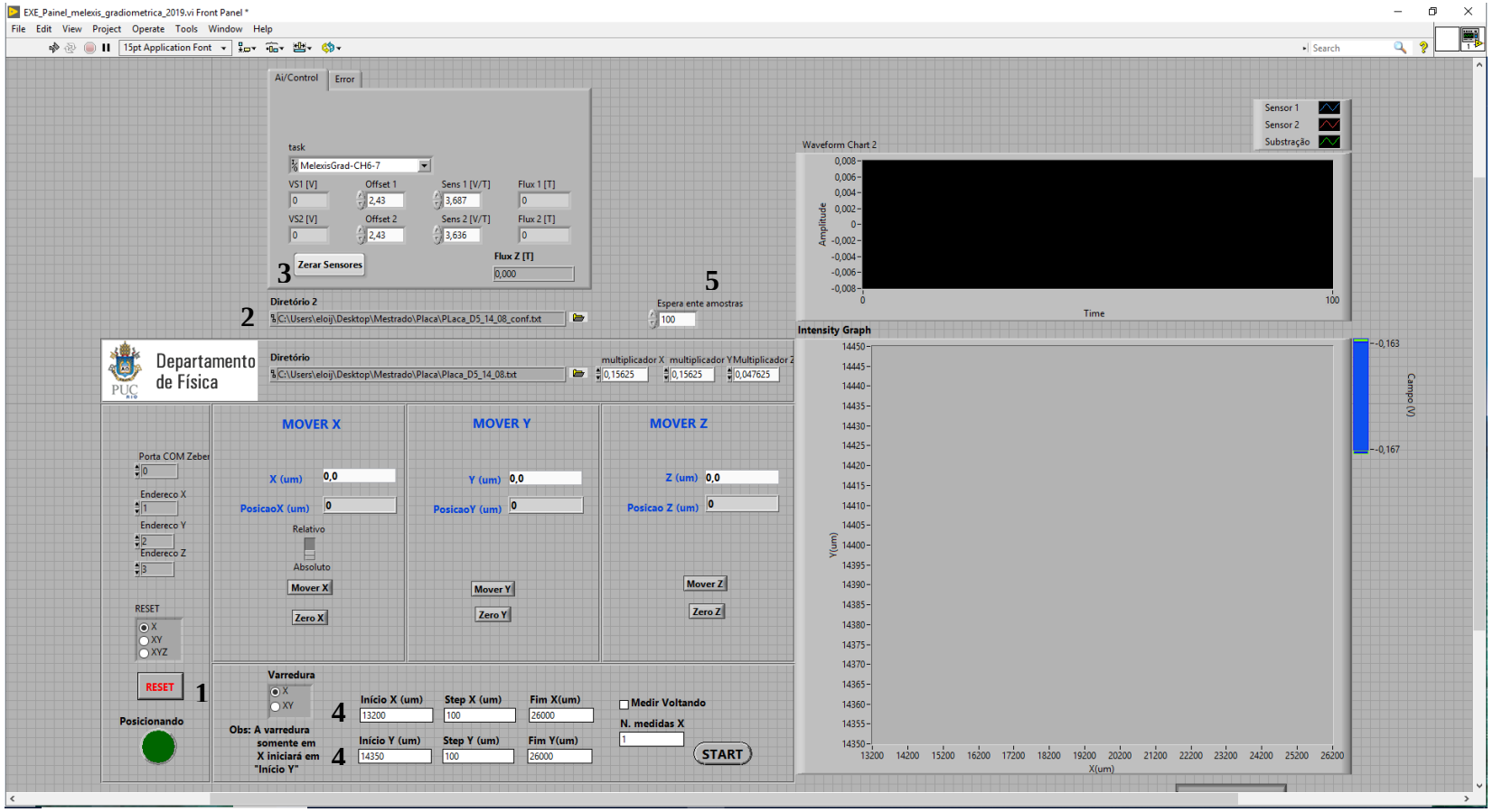

Figura 7.11: Painel principal do programa em LABVIEW para o gradiômetro.

PUC-Rio - Certificação Digital Nº 1813288/CA

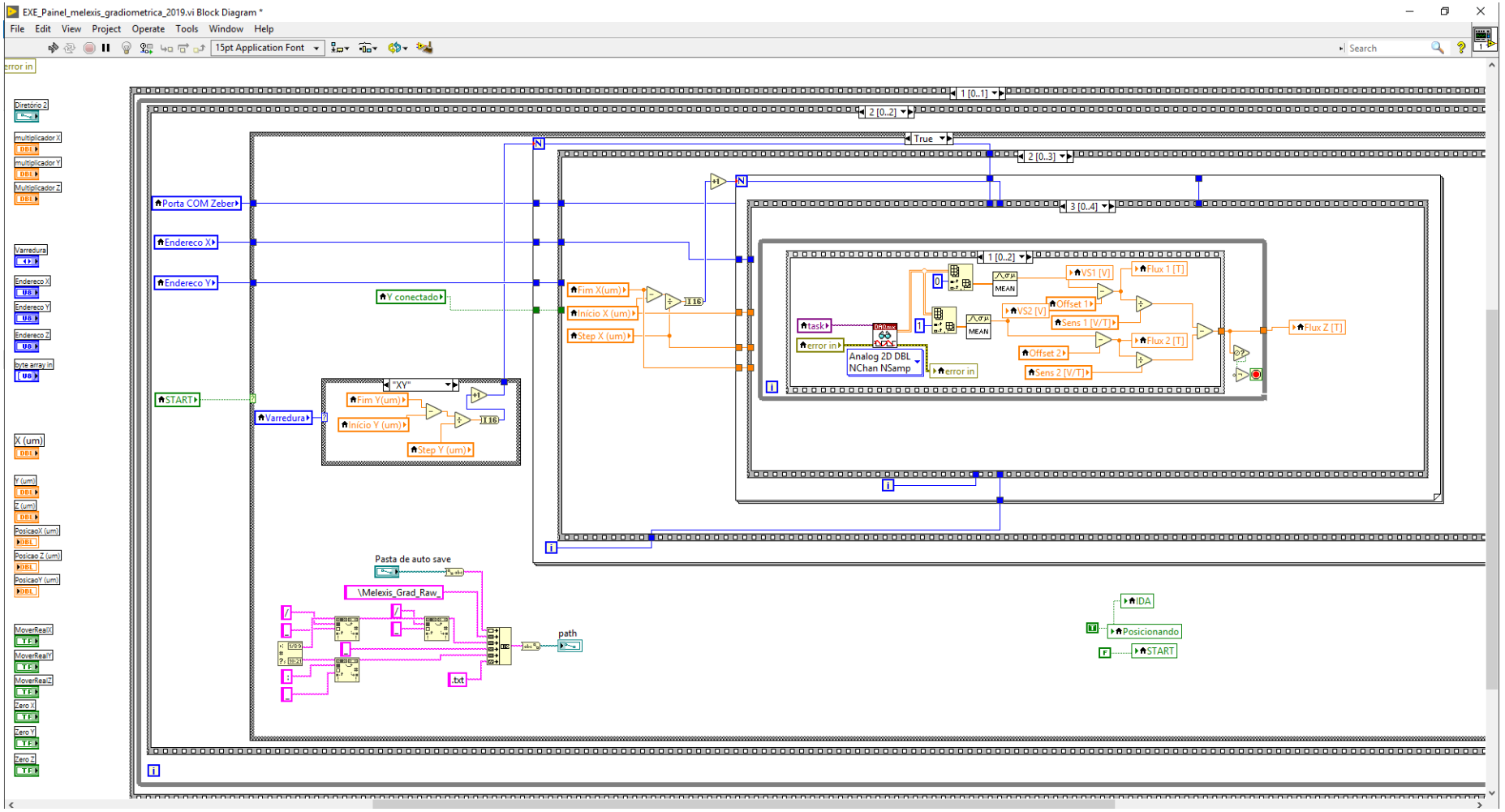

Figura 7.12: Visão geral do diagrama de blocos do programa em LABVIEW para o Gradiômetro.