



**JOÃO FELIPE CHAVES E SILVA**

**Microscópio Magnético de Varredura Adaptável para  
Medição de Campos Remanentes**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Jefferson Ferraz Damasceno  
Felix Araújo

**Rio de Janeiro,  
abril de 2023**



**JOÃO FELIPE CHAVES E SILVA**

**Microscópio Magnético de Varredura Adaptável para  
Medição de Campos Remanentes**

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 Felix Araújo**

Orientador

Departamento de Física - PUC-Rio

**Dr. Helio Ricardo Carvalho**

INMETRO

**Prof. Gerônimo Perez**

UFF

**Prof. Cleânio da Luz Lima**

UFPI

**Prof. Leonardo Alfredo Forero Mendoza**

UERJ

**Rio de Janeiro, 28 de abril de 2023**

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

### João Felipe Chaves em Silva

Graduou-se em Física na Universidade Federal do Piauí - UFPI - Campus Ministro Petrônio Portela, em 2020. Trabalhou então no campo de Óptica Não-Linear, com Efeito de Lente Térmica, Fase de Gouy e Geração de Segundo Harmônico. Trabalha atualmente no Laboratório de Instrumentação e Medidas Magnéticas - L IMM, na PUC-Rio, com ênfase em medições não-invasivas de campo magnético remanente.

#### Ficha Catalográfica

Silva, João Felipe Chaves e

Microscópio Magnético de Varredura Adaptável para Medição de Campos Remanentes / João Felipe Chaves e Silva ; orientador: Jefferson Ferraz Damasceno Felix Araújo. – 2023.

117 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Física, 2023.

Inclui bibliografia

1. Física – Teses. 2. Microscopia magnética de varredura. 3. Delta-mode. 4. Campos remanentes. 5. Sensor hall. 6. Sensor de magnetoresistência. I. Araújo, Jefferson F.D.F. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Física. III. Título.

CDD: 530

*Dedicado a todos aqueles que me apoiaram e em mim acreditaram.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente aos meus pais, João e Márcia, que me apoiaram desde o início, e permitiram que eu fizesse minhas escolhas à minha maneira, nunca por pressão.

Agradeço aos meus companheiros: Thaís, Caíque, Lívio, Sebastião e Lanna, que me suportaram por tanto tempo, mas sempre estiveram de prontidão para discutir, por mais absurdo que fosse o tema da discussão.

Agradeço a Fredy, o qual me ajudou a desenvolver conhecimentos necessários para alcançar meus objetivos.

Agradeço a Anupama, que me auxiliou em vários momentos com conselhos, tanto profissionais quanto pessoais.

Ofereço também meus agradecimentos ao meu orientador, Jefferson, e aos demais professores que foram essenciais no meu desenvolvimento como pesquisador.

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

# Resumo

Chaves e Silva, João Felipe; Araújo, Jefferson Ferraz Damasceno Felix (Orientador). **Microscópio Magnético de Varredura Adaptável para Medição de Campos Remanentes**. Rio de Janeiro, 2023. 117p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Física, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A Microscopia Magnética de Varredura (MMV) surgiu com o objetivo de permitir a visualização de campos magnéticos de uma amostra ou material por meio de varredura, mostrando-se especialmente útil para geologia, biomedicina, caracterização de materiais e na indústria de aços. Nesse sentido, foi montada uma MMV utilizando uma estrutura de blindagem magnética de  $\mu$ -metal para analisar campos remanescentes. A área sensível dos sensores foi avaliada, e foram escolhidos os sensores HQ-0811 (AKM - Asahi Kasei Microdevices), e STJ-010 (Micro Magnetics), sendo o HQ-0811 padronizado em PCBs (Printed Circuit Board) para facilitar o manuseio e aumentar a robustez do sistema. Na câmara blindada, foram utilizados dois motores de passo piezoelétricos ANC-150 (Attocube Systems), dispostos planarmente, para permitir o movimento das amostras analisadas sob o sensor montado. Para adquirir dados dos sensores, foram usados o Precision Current Source Model 6220 e o Nanovoltmeter Model 2182A (ambos Keithley), utilizando o sistema integrado da Keithley chamado Delta-Mode. Para analisar a eficácia do sistema, três amostras distintas foram analisadas para calibração, e um programa em MATLAB foi escrito para analisar as imagens e extrair a magnetização do material analisado. Além disso, uma amostra de rocha da Bacia do Parnaíba foi mapeada para demonstrar as capacidades do sistema.

## Palavras-Chave

Microscopia Magnética de Varredura; Delta-Mode; Campos Remanentes; Sensor Hall; Sensor de Magnetoresistência.

# Abstract

Chaves e Silva, João Felipe; Araújo, Jefferson Ferraz Damasceno Felix (Orientador). **Adaptable Scanning Magnetic Microscope for Measurement of Remanent Fields**. Rio de Janeiro, 2023. 117p. Master's Thesis - Physics Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Magnetic Scanning Microscopy (MMV) was developed to visualize magnetic fields of a sample or material via scanning, making it particularly useful for geology, biomedicine, material characterization, and the steel industry. To this end, an MMV was assembled using a  $\mu$ -metal magnetic shielding structure to analyze remanent fields. The sensors' sensitive area was evaluated, and the HQ-0811 (AKM - Asahi Kasei Microdevices) and STJ-010 (Micro Magnetics) sensors were chosen, with the HQ-0811 standardized on PCBs (Printed Circuit Board) for easy handling and to enhance the system's robustness. Two piezoelectric step motors, ANC-150 (Attocube Systems), were placed in a planar arrangement in the shielded chamber to enable the analyzed samples' movement under the mounted sensor. The Keithley Delta-Mode system was used in conjunction with the Precision Current Source Model 6220 and Nanovoltmeter Model 2182A (both Keithley) to acquire sensor data. Three distinct samples were analyzed for calibration, and a MATLAB program was created to extract the magnetization of the analyzed material from the images obtained. Additionally, the system's capabilities were demonstrated by mapping a rock sample from the Parnaíba Basin.

## Keywords

Scanning Magnetic Microscopy; Delta-Mode; Remanent Fields; Hall Sensor; magnetoresistance Sensor.

# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>2</b>
<b>Abreviações</b>	<b>11</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>13</b>
1.1 Breve História do Magnetismo . . . . .	13
1.1.1 <i>Epístola de Magnete (1269)</i> . . . . .	13
1.1.2 <i>De Magnete (1600)</i> . . . . .	15
1.1.3 Um Grande Salto para o Magnetismo (1785 - 1892) . .	16
1.1.4 Eletrodinâmica Quântica (1900 - 1965) . . . . .	20
1.2 Microscopia Magnética . . . . .	21
1.2.1 Método de Bitter . . . . .	21
1.2.2 Efeito Hall e Aplicações em Sensores . . . . .	22
1.2.3 Microscopia de Lorentz . . . . .	23
1.2.4 SQUID . . . . .	24
1.2.5 Efeito e Sensores Magnetorresistivos . . . . .	24
1.3 Microscopia Magnética de Varredura (MMV) . . . . .	25
1.3.1 Microscopia de Força Magnética . . . . .	26
1.3.2 Microscopia de Varredura SQUID . . . . .	27
1.3.3 Microscopio de Varredura Hall (SHPM) . . . . .	28
1.4 Trabalhos Anteriores . . . . .	29
<b>2 Objetivos</b>	<b>32</b>
2.1 Objetivos . . . . .	32

<i>SUMÁRIO</i>	4
<b>3 Instrumentação</b>	<b>34</b>
3.1 Estrutura Física do MMV . . . . .	34
3.2 Sensores e Curvas de Resposta(CR) . . . . .	36
3.2.1 Janela de Aquisição . . . . .	36
3.2.2 Produção de Placas . . . . .	37
3.2.3 Curva de Resposta dos Sensores . . . . .	38
3.2.4 Relação Sinal/Ruído . . . . .	41
3.3 Attocube Systems . . . . .	44
3.3.1 Attocube ANP-110 . . . . .	44
3.3.2 AttoCube Controller ANC-150/3 . . . . .	46
3.4 Delta-Mode . . . . .	47
3.4.1 Principios do Método . . . . .	47
3.4.2 Delta-Mode com Média Móvel . . . . .	48
3.5 Automatização em LABVIEW . . . . .	49
3.5.1 Alimentação e Leitura . . . . .	50
3.5.2 Controle de Passos e Varredura . . . . .	50
<b>4 Resultados e Comparativos</b>	<b>52</b>
4.1 Tratamento de Dados . . . . .	52
4.1.1 Configuração e Aquisição de Dados . . . . .	52
4.1.2 Diferenciação e Mapas de Gradientes . . . . .	54
4.1.3 Filtragem de Ruído . . . . .	57
4.1.4 Offset e Suavização Definitivos . . . . .	59
4.1.5 Fit e Obtenção de Magnetização . . . . .	60
4.2 Análises . . . . .	65
4.2.1 Óxido de Ferro Duplo (OD) com MMVH . . . . .	67
4.2.2 Óxido de Ferro Duplo (OD) com MMVM . . . . .	69
4.2.3 Magnetita Tripla (MT) com MMVH . . . . .	72
4.2.4 Magnetita Tripla (MT) com MMVM . . . . .	73
4.2.5 Amostra Níquel (AN) com MMVH . . . . .	76
4.2.6 Amostra Níquel (AN) com MMVM . . . . .	78

<i>SUMÁRIO</i>	5
4.2.7 Caracterização das Amostra OD e MT . . . . .	80
4.2.8 Caracterização da Amostra AN . . . . .	81
4.3 Comparativo . . . . .	82
4.4 Amostra de Rocha (AR) . . . . .	82
4.4.1 Amostra de Rocha (AR) com MMVH . . . . .	84
4.4.2 Amostra de Rocha (AR) com MMVM . . . . .	87
<b>5 Conclusões</b>	<b>90</b>
5.1 Melhorias . . . . .	90
<b>A Mapeador</b>	<b>92</b>

# Lista de Figuras

1.1	Carta de Petrus Peregrinus, um dos primeiros relatos científicos sobre propriedades magnéticas. Traduzida para o inglês em 1904.	14
1.2	Descrição de Gilbert sobre a permanência polar em uma peça de magnetita. . . . .	15
1.3	Descrições encontradas nos livros de Gilbert sobre seus trabalhos com a <b>(a)</b> <i>terrela</i> e <b>(b)</b> descrição de equinócios . . . . .	16
1.4	Publicação sobre as observações de Coulomb quanto à natureza da eletricidade, em 1785. . . . .	17
1.5	Trabalho de 1820 de Ørsted, com ilustração do experimento realizado por ele. . . . .	18
1.6	Trabalho de 1832 de Faraday. . . . .	19
1.7	Trabalho de Maxwell, descrevendo seu modelo do eletromagnetismo.	19
1.8	Demonstração das linhas de campo, utilizando-se de pó magnético, por Faraday. . . . .	21
1.9	Perfil obtido com método de Bitter numa liga de Ferro-Silício. Imagem de microscópio óptico com ampliação de 16x. . . . .	22
1.10	Esquema de funcionamento base de um sensor Hall. . . . .	22
1.11	Imagens obtidas por Microscopia de Lorentz (LTEM) com: <b>(a)</b> domínios magnéticos na estrutura de placa (001) e <b>(b)</b> domínios magnéticos no plano (122). . . . .	23
1.12	Layout e funcionamento de um SQUID . . . . .	24
1.13	Esquema de uma Ponte de Magnetoresistência Túnel . . . . .	25
1.14	Layout como feito em [Martin e Wickramasinghe 1987] . . . . .	26
1.15	Imagem de gradientes magnéticos de um cabeçote de leitura IBM 3380. . . . .	27
1.16	Trabalho de Thomas, descrevendo o layout dos atuadores e SQUID.	28
1.17	Trabalho de Chang, com Layout do aparato Hall . . . . .	28
1.18	Imagem do layout gradiométrico, como apresentado em [Araujo et al. 2023]	29

1.19	Trabalho anterior, com câmara de $\mu$ -metal e estrutura interna utilizada na adaptação do MMV deste trabalho . . . . .	30
1.20	Exemplo do uso do programa de tratamento de dados desenvolvido neste trabalho . . . . .	31
3.1	Câmara de blindagem magnética . . . . .	35
3.2	Layout do MMV com sensor HQ-0811, identificando as partes que o compõe e a imagem obtida da câmara USB. . . . .	35
3.3	Layout do MMV com sensor STJ-010, identificando as partes que o compõe e a imagem obtida da câmara USB. . . . .	36
3.4	Datasheet do sensor HQ-0811, da marca Asahi Kasei <sup>TM</sup> . Destacado em vermelho, consta o diâmetro da janela de aquisição do sensor. . . . .	37
3.5	Datasheet do sensor STJ-010. . . . .	38
3.6	<b>(a)</b> Esquema e <b>(b)</b> arquivo PCB das placas, realizados em Ki-Cad. . . . .	38
3.7	Esquema 3D das placas . . . . .	39
3.8	Par de Helmholtz utilizado na CR. . . . .	39
3.9	CR do sensor HQ-0811. . . . .	40
3.10	CR do sensor STJ-010. . . . .	40
3.11	Configuração do MMV com suporte para bobina. . . . .	42
3.12	Gaussímetro utilizado como base para medidas de campo. . . . .	42
3.13	Analizador de espectro utilizado nas medidas de sinal ruído. . . . .	42
3.14	Gráficos de sinal ruído do sensor HQ-0811, com câmara $\mu$ -metal aberta, a <b>(a)</b> 4 Hz e <b>(b)</b> 80 Hz. . . . .	43
3.15	Gráficos de sinal ruído do sensor HQ-0811, com câmara $\mu$ -metal fechada, a <b>(a)</b> 4 Hz e <b>(b)</b> 80 Hz. . . . .	44
3.16	Layout do Nano-posicionador. . . . .	45
3.17	Método de Movimentação <i>Slip-Stick Drive</i> . . . . .	46
3.18	Controlador AttoCube ANC-150/3, com os 3 módulos identificados . . . . .	46
3.19	Delta Mode com aquisição por média móvel. . . . .	48
3.20	Delta Mode com aquisição por média móvel. . . . .	49

3.21	Painel de controle do Programa de comunicação, controle de passos e Delta Mode. . . . .	49
3.22	Seção do painel responsável por configurações de alimentação e leitura. . . . .	50
3.23	Seção do painel responsável por definição da área de varredura e configuração de RE. . . . .	51
4.1	Amostra em escala de <b>(a)</b> fio de níquel, e <b>(b)</b> mapa obtido. . .	53
4.2	Mapa de Gradientes do fio de Níquel, feito a partir do mapa original. . . . .	55
4.3	Mapa Lógico do fio de Níquel. . . . .	56
4.4	Mapa Lógico do fio de Níquel, após suavização. Repare que o limiar entre ruído e sinal é menos abrupto. . . . .	57
4.5	Mapa Tratado e Filtrado do fio de Níquel. . . . .	61
4.6	Comparativo entre os gradientes do <b>(a)</b> mapa antes do tratamento e <b>(b)</b> mapa depois do tratamento, para o fio de Níquel. .	61
4.7	Tentativa de Fit do fio de Níquel, ajustado aos dados experimentais, na janela em volta do pico. . . . .	62
4.8	Perfil da linha de máximo, pontilhado, com o perfil do modelo, para o fio de Níquel. . . . .	64
4.9	Curva de resíduos entre o fit e os dados experimentais, para o Fio de Níquel. . . . .	65
4.10	Porta amostras com régua, apresentando <b>(a)</b> Óxido de Ferro Duplo (OD) e <b>(b)</b> Magnetita Tripla (MT). . . . .	66
4.11	Porta amostras com régua, apresentando <b>(a)</b> Amostra Ni (AN) e <b>(b)</b> Amostra de Rocha (AR). . . . .	66
4.12	Mapas do tratamento da amostra OD com sensor HQ-0811 demonstrando: <b>(a)</b> Mapa Original, sem tratamento e <b>(b)</b> Mapa de Gradientes. . . . .	67
4.13	Caracterizações da linha com pico máximo do mapa da amostra OD, obtida de sensor HQ-0811. . . . .	68

4.14	Caracterizações da linha com pico máximo do mapa da amostra OD, obtida de sensor HQ-0811. . . . .	68
4.15	Mapas do tratamento da medida 1 da amostra OD com sensor STJ-010 demonstrando: <b>(a)</b> Mapa Original, sem tratamento e <b>(b)</b> Mapa de Gradientes. . . . .	69
4.16	Mapa Tratado da medida 1 da amostra OD, obtida de sensor STJ-010. . . . .	70
4.17	Mapas do tratamento da medida 2 da amostra OD com sensor STJ-010, feito para comparação, demonstrando: <b>(a)</b> Mapa Original, sem tratamento e <b>(b)</b> Mapa de Gradientes. . . . .	71
4.18	Mapa Tratado da medida 2 da amostra OD, obtida de sensor STJ-010. . . . .	71
4.19	Fits entre modelo e dados experimentais da amostra OD, obtida de sensor STJ-010. . . . .	72
4.20	Mapa Original da amostra MT coletado com o sensor HQ-0811. . . . .	73
4.21	Mapas de Gradientes da amostra MT coletados com o sensor HQ-0811. . . . .	73
4.22	<b>(a)</b> Mapa Tratado e <b>(b)</b> Fit teórico da amostra MT coletados com o sensor HQ-0811. . . . .	74
4.23	Mapas Originais da amostra MT coletados com o sensor STJ-010. . . . .	74
4.24	Mapas de Gradientes da amostra MT coletados com o sensor STJ-010. . . . .	75
4.25	Mapas Tratados e Filtrados da amostra MT coletados com o sensor STJ-010. . . . .	75
4.26	Fits entre modelo e dados experimentais dos mapas da amostra MT com sensor STJ-010. . . . .	76
4.27	<b>(a)</b> Mapa Original e <b>(b)</b> Mapa de Gradientes da amostra AN coletado com o sensor HQ-0811. . . . .	77
4.28	<b>(a)</b> Mapa Tratado e <b>(b)</b> Fit Teórico da amostra AN coletado com o sensor HQ-0811. . . . .	77
4.29	Mapas Originais da amostra AN com sensor STJ-010. . . . .	78

<i>LISTA DE FIGURAS</i>	10
4.30 Mapas de Gradientes da amostra AN coletados com o sensor STJ-010. . . . .	79
4.31 Mapas Tratados e Filtrados da amostra MT coletados com o sensor STJ-010. . . . .	79
4.32 Fits entre modelo e dados experimentais dos mapas da amostra MT com sensor STJ-010. . . . .	80
4.33 Curva de magnetização obtida por VSM da magnetita utilizada, próxima à região de campo 0. . . . .	80
4.34 Curva de magnetização obtida por VSM do Fio de Níquel utilizado, próxima à região de campo 0. . . . .	81
4.35 Áreas aproximadas analisadas na AR. . . . .	83
4.36 Mapa Controle, obtido de equipamento auxiliar. . . . .	83
4.37 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR1, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	84
4.38 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR2, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	85
4.39 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR3, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	86
4.40 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR1, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	87
4.41 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR2, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	88
4.42 <b>(a)</b> Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR3, <b>(b)</b> com respectivo mapa de gradientes, <b>(c)</b> e área "equivalente" no MC. . . . .	89

# Abreviações

<b>AFM</b>	<b>Atomic Force Microscope</b>
<b>AN</b>	<b>Amostra Níquel</b>
<b>AR</b>	<b>Amostra Rocha</b>
<b>CR</b>	<b>Curva de Resposta</b>
<b>EP</b>	<b>Erro Percentual</b>
<b>FEM</b>	<b>Força Eletromotriz</b>
<b>MC</b>	<b>Mapa Controle</b>
<b>MFM</b>	<b>Magnetic Force Microscope</b>
<b>MMVH</b>	<b>Microscópio Magnético de Varredura com Hall</b>
<b>MMVM</b>	<b>Microscópio Magnético de Varredura por Magneto-resistência</b>
<b>MT</b>	<b>Magnetita Tripla</b>
<b>OD</b>	<b>Óxido de Ferro Dupla</b>
<b>PCB</b>	<b>Printed Circuit Board (Extensão Ki-Cad)</b>
<b>PCI</b>	<b>Placa de Circuito Impresso</b>
<b>RE</b>	<b>Resolução Espacial</b>
<b>RM</b>	<b>Resolução Magnética</b>
<b>TMJ</b>	<b>Tunnel Magnetic Junction</b>
<b>TMR</b>	<b>Tunnel Magneto-Resistance</b>
<b>VE</b>	<b>Valor de Magnetização Esperado</b>
<b>VM</b>	<b>Valor de Magnetização Obtido</b>

*"Every man is happy until happiness is suddenly a goal."  
Tame Impala*

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Breve História do Magnetismo

Os primeiros relatos de efeitos magnéticos vem de gregos e chineses por volta dos séculos VII a VI a.C. [Nature 1876], geralmente se tratando de observações da atração de materiais magnéticos, como ferro, por minérios como a magnetita. Por exemplo, **Aristóteles** (384 a.C - 322 a.C) atribuiu à **Tales de Mileto** (624 a.C - 546 a.C) a primeira discussão sobre efeitos magnéticos, por volta do século VI a.C [Fowler 2008].

Apesar de relevantes, os primeiros tratados escritos discutindo a natureza dos efeitos magnéticos com experimentos adequados ao método científico só vieram surgir por volta do século XIII, já durante o início da baixa idade média (período entre os séculos XIII e XV).

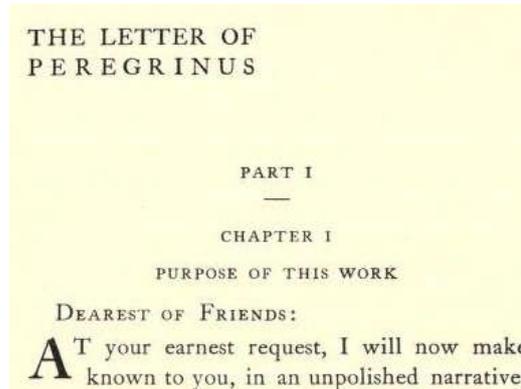
#### 1.1.1 *Epístola de Magnete (1269)*

Um dos primeiros registros científicos, em âmbito ocidental, relacionados ao magnetismo é do século XIII, por Petrus Peregrinus de Maricourt (1240 - ?) numa carta escrita em duas partes endereçada a um amigo leigo, apresentada na Figura 1.1, onde este descreve como identificar magnetita com a qual realizar experimentos, como identificar os polos desta, explora os efeitos de ímãs uns nos outros, e comenta sobre métodos de reversão de polaridade destes [Maricourt 1269].

No segundo capítulo, ele comenta sobre dispositivos que podem ser produzidos com magnetita, como bússolas de suspensão em água, e chega a descrever

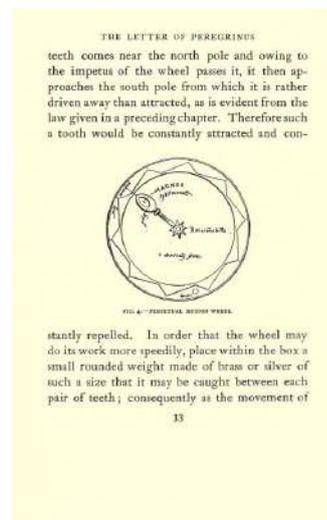
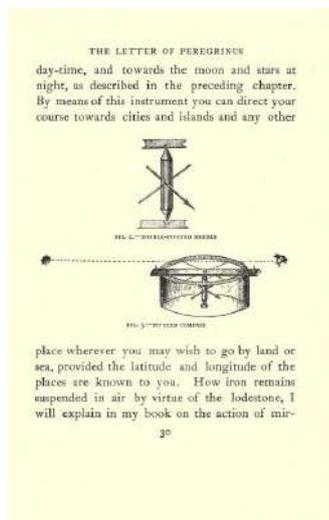
**Figura 1.1:** Carta de Petrus Peregrinus, um dos primeiros relatos científicos sobre propriedades magnéticas. Traduzida para o inglês em 1904.

(a). Capa da carta de Petrus Peregrinus.



(b). Esquete de uma bússola seca. Cap.2 Pag.30

(c). Esquema do moto perpétuo magnético. Cap.2 Pag.33



Figuras retiradas de [Maricourt 1269], de Cap. 1 Pag.1, Cap.2 Pag.30, e Cap.2 Pag.33

uma bússola "seca", além de propor um moto perpétuo (vide se tratar de um engenheiro do século XIII), utilizando a atração e repulsão dos ímãs para rotacionar uma roda dentada.

Deve-se observar que Peregrinus não é creditado como "descobridor" dos fatos relatados, apenas como tendo compilado os conhecimentos apresentados de maneira lógica, sendo o primeiro a usar a palavra "polo" no contexto de magnetismo.

### 1.1.2 De Magnete (1600)

O inglês William Gilbert (1544 -1603), foi um médico e filósofo natural e um dos primeiros a estudar o magnetismo em relação à própria Terra. Publicado em 1600, seu livro *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* [Gilbert 1600], foi um trabalho científico inovador, discorrendo sobre os experimentos feitos por Gilbert num modelo de terra miniaturizado, chamado *terrela* (pequena Terra, em latim). No livro, dividido em 6 volumes, Gilbert discorre sobre vários experimentos utilizando sua *terrela*. Entre suas discussões, ele percebe a permanência dos polos mesmo diante da divisão do ímã, como demonstrado na Figura 1.2, e discorrendo sobre atração e repulsão de polos similares ou opostos.

**Figura 1.2:** Descrição de Gilbert sobre a permanência polar em uma peça de magnetita.

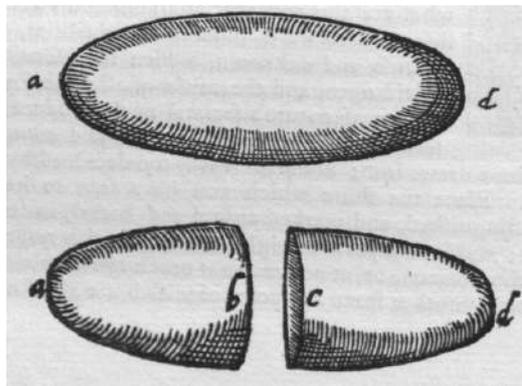
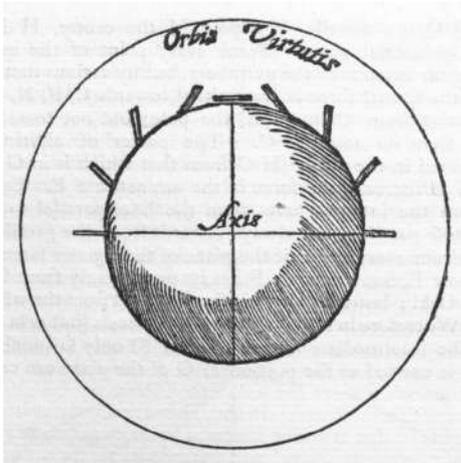


Figura retirada de [Gilbert 1600], Livro 1, Cap 5

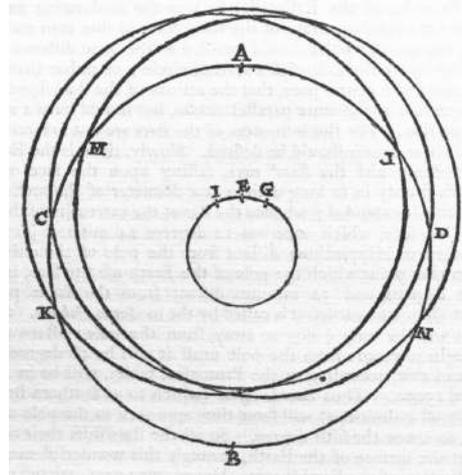
Gilbert também percebeu que o magnetismo não se tratava de uma força radial. Ao aproximar objetos magnéticos, no caso pequenos bastonetes de ferro, ele percebeu que estes não eram atraídos para o centro da *terrela*, sempre se dispoñdo apontando aos polos desta. Diferindo de Petrus Peregrinus, Gilbert descarta a possibilidade de construção de um moto perpétuo utilizando-se de magnetismo. Por fim, no sexto volume de *De Magnete*, Gilbert relaciona suas observações com a própria Terra, concluindo que esta se trata de um objeto magnético, discorrendo também sobre sua rotação e equinócios. Algumas destas descrições são apresentadas na Figura 1.3. Apesar de inovador, seu trabalho apresenta diversos erros, como atribuir as causas da rotação e dos equinócios ao

**Figura 1.3:** Descrições encontradas nos livros de Gilbert sobre seus trabalhos com a (a) *terrela* e (b) descrição de equinócios

(a). Terrela de Gilbert. Livro 1 Cap.6



(b). Descrição dos Equinócios. Livro 6 Cap.8



Figuras retiradas de [Gilbert 1600].

magnetismo e assumir a invariabilidade dos polos.

### 1.1.3 Um Grande Salto para o Magnetismo (1785 - 1892)

O fim do século XVIII e início do século XIX foi um período extremamente frutífero para o magnetismo. As noções de magnetismo e eletricidade avançaram de tal forma que ao fim do século XIX, os dois fenômenos inicialmente tratados individualmente se mostraram intrinsecamente interligados, com modelos teóricos e experimentos empíricos comprovando se tratar de um único fenômeno, o eletromagnetismo.

Num trabalho publicado em 1785, **Charles-Augustin de Coulomb** (1736 - 1806), utilizando-se de trabalhos anteriores com balanças de torção, observou que duas esferas eletrificadas com eletricidade de "mesma natureza" se repeliam com uma força proporcional ao inverso do quadrado da distância [Coulomb 1785], como pode ser observado na Fig 1.4, retirada do trabalho original de Coulomb. Tal observação, apesar de inicialmente aparentar distinta do magnetismo, mostrou que fenômenos elétricos apresentavam propriedades

especiais similares à gravidade.

**Figura 1.4:** Publicação sobre as observações de Coulomb quanto à natureza da eletricidade, em 1785.

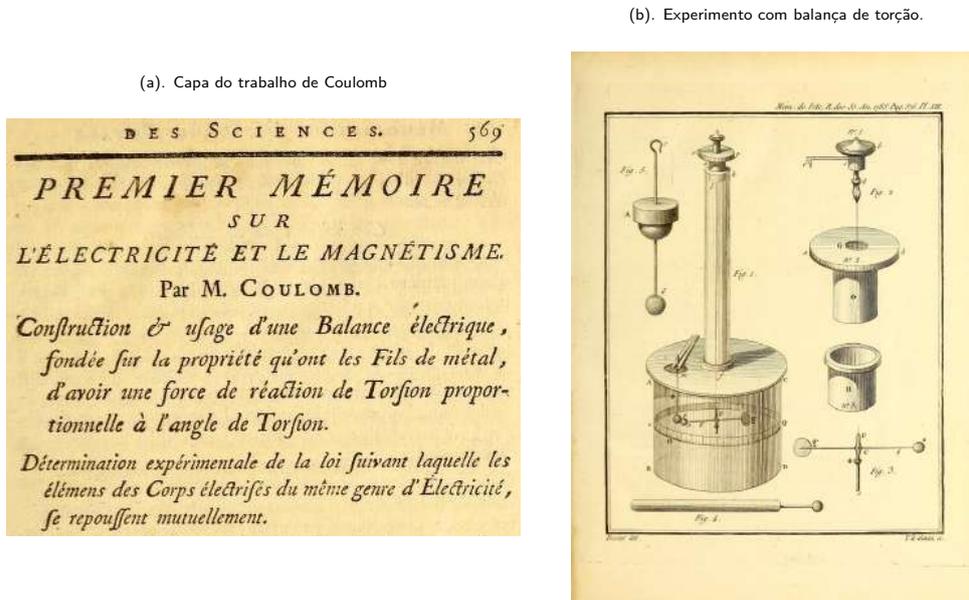


Figura retirada de [Coulomb 1785], Pag. 569 e 577.

Em 1820, **Hans Christian Ørsted** (1777 - 1851) publicou, por financiamento próprio, o *Conflictus Eletrici in Acum Magnetica* [Ørsted 1820], enunciando um experimento realizado por ele onde uma bússola, posicionada em diferentes locais ao redor de um fio por onde passa uma corrente elétrica, muda a direção de alinhamento, como pode ser visto na Figura 1.5. Tal experimento foi revolucionário na época, deixando muitos na comunidade científica duvidosos quanto à sua veracidade. O grande impacto de seu trabalho firmou o solo para a união da eletricidade com o magnetismo, antes considerados fenômenos distintos.

Tomando conhecimento sobre o trabalho de Ørsted, o físico francês **André-Marie Ampère** (1775 - 1836) publicou em 1822 um tratado, no qual ele relata como dois fios condutores de corrente se comportam quando colocados próximos com correntes paralelas e antiparalelas. Aprofundando-se nas observações empíricas, Ampère publicou em 1827 sua obra mais relevante, o *Mémoire sur la théorie mathématique des phénomènes électrodynamiques uniquement déduite de l'expérience*, onde ele descreve matematicamente os fenômenos

**Figura 1.5:** Trabalho de 1820 de Ørsted, com ilustração do experimento realizado por ele.



Figura retirada de [Ørsted 1820]

anteriormente observados, além de cunhar o termo do que viria ser conhecida como eletrodinâmica [Ampère 1826].

Entre 1831 e 1837, **Carl Friedrich Gauss** (1777 - 1855) e **Wilhelm Eduard Weber** (1804 - 1891) trabalharam em parceria, dando várias contribuições cruciais para o desenvolvimento do eletromagnetismo, como conectar a cidade de Göttingen com um telégrafo eletromecânico e a descoberta por Gauss da lei matemática que carrega seu nome [Bruno e Baker 1999].

Pouco tempo após as observações realizadas por Ørsted e a descoberta da relação da eletricidade com o magnetismo, **Michael Faraday** (1791 - 1867) montou dois aparatos que utilizavam eletricidade para obter o que ele chamou de rotação eletromagnética. Dez anos após, utilizando um "anel indutor", ele observou que, ao passar uma corrente através de um solenoide e aproximá-lo de outro similar, uma corrente de mesma intensidade e oposta passava a circular pelo segundo solenoide. O fenômeno descoberto por ele foi apresentado à Royal Society em 1831, apresentado na Figura 1.6, além de observar em 1832 que os "tipos" de eletricidade, antes pensados dois fluidos carregados e distintos, se tratavam de partes de um mesmo fenômeno [Faraday 1832]. As observações de Faraday, além de seu tratamento do magnetismo através de "linhas de força" foram cruciais para o desenvolvimento matemático do eletromagnetismo por Maxwell.

Figura 1.6: Trabalho de 1832 de Faraday.

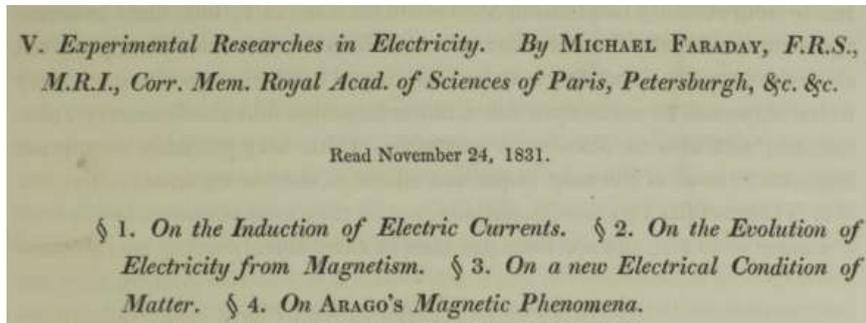


Figura retirada de [Faraday 1832].

Nos anos seguintes, Faraday entrou em contato regular com o físico **James Clerk Maxwell** (1831 - 1879), partilhando com eles muitas ideias, o que gerou em 1861 e 1862 uma série de publicações, chamadas "*On physical lines of force*", abordando a natureza do eletromagnetismo e propondo um modelo para a descrição do comportamento do mesmo, contando como uma série de 20 equações e variáveis, como pode ser visto na Figura 1.7 [Maxwell 1861]. Entretanto, o trabalho de maior impacto por Maxwell é uma dedução teórica onde o mesmo demonstra que a luz, tratada distintamente no campo da óptica, juntamente com a eletricidade e o magnetismo, tratam-se de manifestações de um mesmo fenômeno [Maxwell 1865]. Tal observação coloca o trabalho de Maxwell como um dos de maior importância para a física do século XX, dando origem a campos completamente novos, como *Mecânica Quântica* e *Relatividade*.

Figura 1.7: Trabalho de Maxwell, descrevendo seu modelo do eletromagnetismo.

388 Prof. Maxwell on the Theory of Molecular Vortices

Here the near coincidence of the results in the first and third columns shows that the relation between  $k$  and  $T$  may be approximately expressed by the formula

$$k = 14.15 T^{\frac{2}{3}}, \text{ or } T = \left( \frac{k}{14.15} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad . . . (7)$$

Hastings, April 1, 1861.

LI. *On Physical Lines of Force.* By J. C. MAXWELL, Professor of Natural Philosophy in King's College, London.

[With a Plate.]

Figura retirada de [Maxwell 1861]

Os trabalhos de Maxwell foram posteriormente revisados por **Oliver Heaviside** (1850 -1925), onde o mesmo readéqua as antigas 20 equações e variáveis em uma série de 4 equações do eletromagnetismo [Heaviside 1892].

#### 1.1.4 Eletrodinâmica Quântica (1900 - 1965)

Um dos pontos de dúvida no desenvolvimento do eletromagnetismo foi conciliar este com a mecânica clássica. As primeiras faíscas de solução foram dadas com o advento da teoria da relatividade, proposta por **Albert Einstein**, em 1905 [Einstein 1905]. Após isto, e com o advento da mecânica quântica, **Paul Dirac** quantificou o campo eletromagnético, introduzindo conceitos como operadores de criação e aniquilação [Dirac 1927].

A Eletrodinâmica Quântica se desenvolveu rapidamente nos anos seguintes, mas não sem problemas. Pesquisadores como **Wolfgang Pauli**, **Eugene Wigner**, **Pascual Jordan**, **Werner Heisenberg** e **Enrico Fermi** deram contribuições substanciais no desenvolvimento da teoria, montando um arcabouço teórico capaz de descrever com precisão quase qualquer interação entre partículas e fótons [Fermi 1932]. Entretanto, a teoria vigente falhava em explicar dados experimentais precisos encontrados com o desenvolvimento da tecnologia de micro ondas, apontados, por exemplo, num trabalho de **Willis E. Lamb, Jr.** e **Robert C. Retherford** até que, em 1947, **Hans Bethe** propôs pequenas correções de constantes, dando origem à Renormalização, sendo esta condizente com as observações experimentais da época [Bethe 1947].

Por fim, trabalhos de **Shin'ichirō Tomonaga**, **Julian Schwinger**, **Richard Feynman** e **Freeman Dyson** possibilitaram o desenvolvimento de formulações que obedeciam a invariância de Lorentz, ou seja, a física se comportava da mesma maneira independente do referencial inercial. Seus trabalhos permitiram a computação de observáveis de qualquer ordem perturbativa, e a Renormalização proposta por Bethe se mostrou muito útil no desenvolvimento de Teoria Quântica de Campos [Dyson 1949]. Por seus trabalhos Tomonaga, Schwinger e Feynman foram agraciados com o prêmio Nobel em Física de 1965.

## 1.2 Microscopia Magnética

A **microscopia** (do grego *μικροσ*, significando "pequeno", e *σκοπεω*, significando "observar"), mais especificamente aplicada ao magnetismo, inicialmente se preocupava com a visualização de linhas de campo em ímãs permanentes. Por muito tempo, a melhor técnica de visualização consistia em distribuir sobre uma superfície uma limalha ou pó de material magnético e, em seguida, com a aproximação de um ímã permanente, observar como as linhas se redistribuíam.

**Figura 1.8:** Demonstração das linhas de campo, utilizando-se de pó magnético, por Faraday.

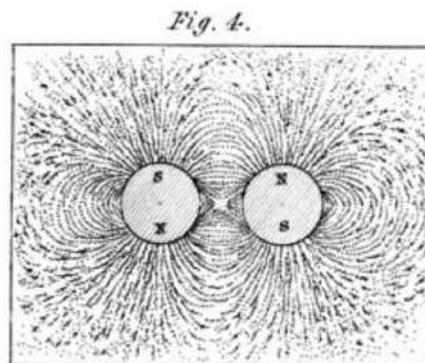


Figura retirada de [Faraday 1852]

### 1.2.1 Método de Bitter

O método de detecção com limalha/pó de magnetita foi posteriormente aperfeiçoado por Francis Bitter, como relatado em seu trabalho de 1931 [Bitter 1931], utilizando-se de coloides com partículas magnéticas em suspensão, com posterior análise por microscópio óptico, como pode ser observado na Figura 1.9, o que permite ao instrumento a visualização de detalhes em escala nanométrica. O uso das suspensões cunhou o nome de Método de Bitter, em sua homenagem.

**Figura 1.9:** Perfil obtido com método de Bitter numa liga de Ferro-Silício. Imagem de microscópio óptico com ampliação de 16x.

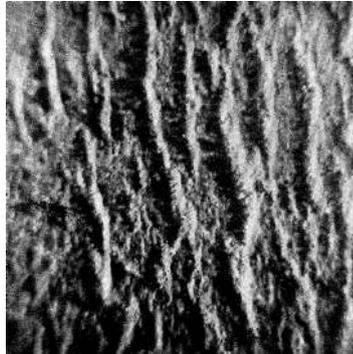


Figura retirada de [Bitter 1931].

## 1.2.2 Efeito Hall e Aplicações em Sensores

O Efeito Hall consiste no aparecimento de um potencial transverso a uma corrente, quando esta é influenciada por um campo magnético perpendicular à mesma, como na Figura 1.10. O efeito foi primeiramente observado por **Edwin Hall**, em 1879 [Hall 1879].

**Figura 1.10:** Esquema de funcionamento base de um sensor Hall.

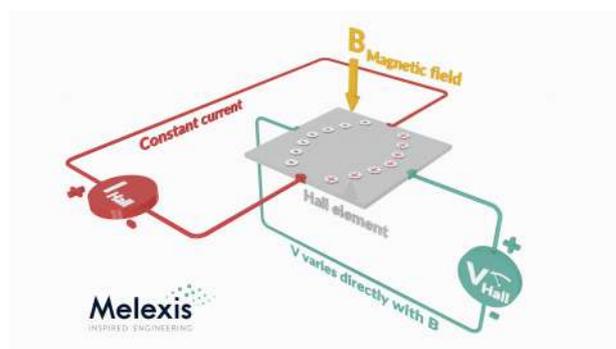


Figura retirada de [MELEXIS s.d].

Devido à forma como o potencial transversal se comporta e suas dependências, este pode ser avaliado para obter, de forma indireta, informações sobre o campo magnético que o gerou, tornando o efeito aplicável em sensores magnéticos. Sensores de efeito magnético geralmente consistem de uma fina tira ou camada de um semicondutor tipo-p, em geral à base de Gálio e Arsênio (GaAs),

Índio e Antimônio (InSb) ou Índio e Arsênio (InAs), através do qual passa uma corrente, com outros acessos perpendiculares para medir o potencial transversal [Eletronic-Tutorials 2013].

Quando tais sensores são colocados sob influência de um campo magnético, geralmente perpendicular à direção da corrente no sensor, as cargas e buracos em movimento sofrem uma deflexão na tira semicondutora, devido à força de Lorentz, gerando um acúmulo de cargas e buracos lateral. O potencial gerado por este acúmulo pode então ser medido, sendo este proporcional à corrente e ao campo que influencia o sensor.

### 1.2.3 Microscopia de Lorentz

Por fim, o método que apresenta a maior resolução é utilizando um Microscópio Eletrônico de Transmissão (MET), onde um feixe de elétrons de alta energia é irradiado sobre amostras finas, e por fim é mensurada a deflexão destes elétrons por força de Lorentz, cunhando o termo de Microscopia de Lorentz [Hale, Fuller e Rubinstein 1959]. Tal método de caracterização permite a visualização de detalhes magnéticos em escalas nanométricas, como pode ser visto na Figura 1.11.

**Figura 1.11:** Imagens obtidas por Microscopia de Lorentz (LTEM) com: **(a)** domínios magnéticos na estrutura de placa (001) e **(b)** domínios magnéticos no plano (122).

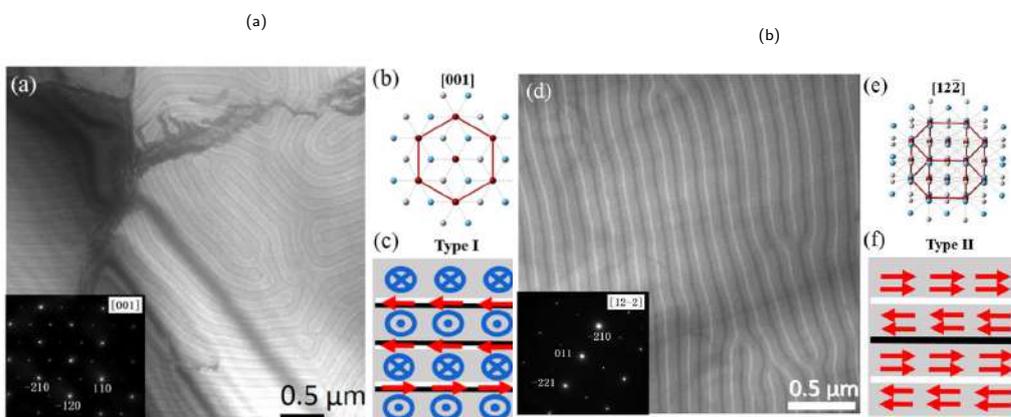


Figura retirada de [Ding et al. 2018].

### 1.2.4 SQUID

O **Superconducting QUantum Interference Device** (SQUID) foi proposto inicialmente num trabalho de 1964 [Jaklevic et al. 1964]. A ideia consiste em criar um anel supercondutor com separações, ou barreiras isolantes, extremamente finas. Correntes aplicadas ao anel portanto, fluem igualmente entre os "braços" do anel. Entretanto, ao aplicar um campo magnético local, este gera no anel uma corrente contrária ao fluxo de campo, que se soma ou se subtrai da corrente que flui no anel, gerando uma diferença de potencial, como pode ser visto na Figura 1.12.

**Figura 1.12:** Layout e funcionamento de um SQUID

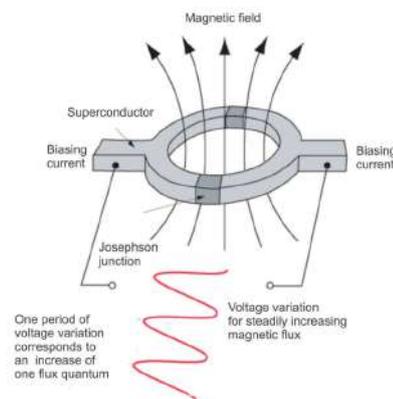


Figura retirada de [Marcon e Ostanina 2012].

É importante ressaltar que devido às características supercondutoras do anel, o fluxo total (soma do fluxo aplicado vindo da amostra, fluxo devido à corrente no anel e fluxo de bobinas auxiliares do sistema SQUID) é quantizado, sempre se aproximando aos múltiplos inteiros do quantum de fluxo mais próximos, gerando um padrão oscilatório na corrente sempre que o fluxo variar de meios inteiros.

### 1.2.5 Efeito e Sensores Magnetorresistivos

Inicialmente observado por **Sir William Thomson**, ou Lorde Kelvin, em 1857, o Efeito Magnetorresistivo trata-se de uma alteração na resistência de um material quando este é colocado na presença de um campo magnético. Kelvin

percebeu pequenas variações na resistência de uma peça retangular de níquel de aproximadamente 0,5 % [Thomson 1857].

**Figura 1.13:** Esquema de uma Ponte de Magnetoresistência Túnel

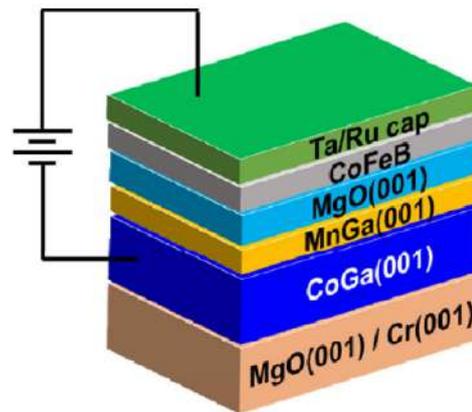


Figura retirada de [Suzuki et al. 2016]

Posteriormente, em 1975, Michel Jullière observou que, utilizando uma estrutura similar a uma junção de Josephson, mas trocando os materiais supercondutores por materiais ferromagnéticos, era possível perceber uma alteração mensurável na resistência, de aproximadamente 15 %, quando na presença de um campo magnético paralelo à direção de magnetização das camadas ferromagnéticas [Julliere 1975]. Avanços feitos na produção destas pontes, chamadas Junções Túnel Magnéticas (TMJ), conseguem atingir alterações na resistência de até 70 %, sendo o efeito nomeado de Magnetoresistência Túnel (TMR), com dispositivo exemplificado na Figura 1.13. Além disso, foram estudadas também como interações com o Torque de Transferência de Spin (STT), aumentariam a eficiência no sensoriamento, dando origem aos sensores à base de Junções Spin Túnel (STJ) [Tedrow e Meservey 1972].

### 1.3 Microscopia Magnética de Varredura (MMV)

Com o desenvolvimento da microscopia e do sensoriamento magnético, deu-se origem a um nicho, dentro da microscopia magnética, que necessitava

extrair informações magnéticas diversas de amostras extensas. Com tal intuito, o emprego de atuadores espaciais que auxiliavam na coleta de dados ponto a ponto deu origem à Microscopia Magnética de Varredura.

### 1.3.1 Microscopia de Força Magnética

Um dos primeiros trabalhos empregando um sensor magnético com aquisição pontual de dados auxiliado por atuadores foi um trabalho de 1987 no qual é utilizado um Microscópio de Força Magnética (MFM) auxiliado por atuadores piezo-elétricos [Martin e Wickramasinghe 1987], como demonstrado na Figura 1.14.

Figura 1.14: Layout como feito em [Martin e Wickramasinghe 1987]

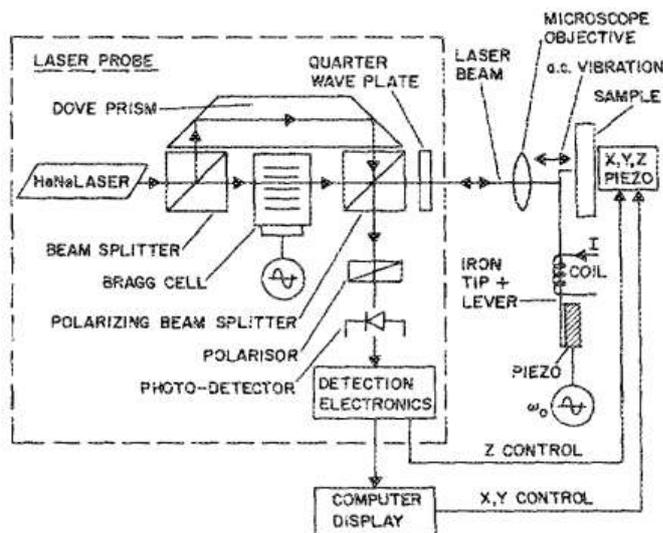


Figura retirada de [Martin e Wickramasinghe 1987]

O MFM é um instrumento com uma configuração similar ao Microscópio de Força Atômica (AFM), dotado de cantiléver recoberto com material magnético, que após colocado em contato com a amostra varre esta em busca por campos magnéticos dispersos no material analisado. Tipicamente, o MFM é utilizado em dois modos, um estático, onde a deflexão da ponta provê as informações sobre os campos da amostra, e um modo dinâmico, onde o cantiléver é modelado como um oscilador harmônico, com a informação sendo extraída das mudanças de fase e da frequência de oscilação. Para a medição da deflexão, é utilizado um setup com um laser de He-Ne que mede a amplitude de deflexão, à partir

da qual são extraídas informações do campo magnético local, produzindo uma imagem como pode ser visto na Figura 1.15.

**Figura 1.15:** Imagem de gradientes magnéticos de um cabeçote de leitura IBM 3380.

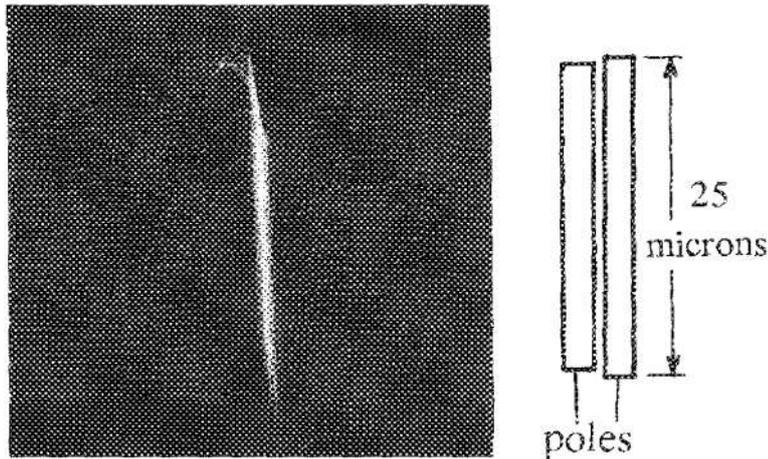


Figura retirada de [Martin e Wickramasinghe 1987]

### 1.3.2 Microscopia de Varredura SQUID

Posteriormente, *Thomas et al.* desenvolveram uma estrutura de varredura similar, porém mudando o tipo de sensoriamento para SQUID e escaneando rochas, num trabalho utilizado como base para diversos outros [Thomas, Moyer e Wikswo 1992].

Um dos grandes avanços desse trabalho foi o uso de um sensor puramente magnético, no caso o SQUID, para uma análise de perfis magnéticos atrelado ao paleomagnetismo, como pode ser visto na análise de rochas apresentada na Figura 1.16. Entretanto, apesar de o SQUID ser um dos sensores disponíveis mais sensíveis e contar com aplicações diversas, o mesmo trabalha sob regime criogênico, o que pode tornar sua aplicação complicada e custosa.

Figura 1.16: Trabalho de Thomas, descrevendo o layout dos atuadores e SQUID.

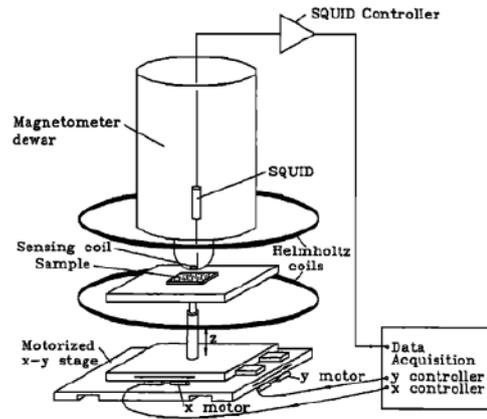


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental protocol.

Figura retirada de [Thomas, Moyer e Wikswo 1992]

### 1.3.3 Microscópio de Varredura Hall (SHPM)

Próximo ao mesmo período, *Chang et al.* desenvolveu uma montagem similar, porém empregando sensores Hall, como pode ser visto na Figura 1.17, com o objetivo de analisar vórtices em filmes de  $La_{1.85}Sr_{0.15}CuO_4$ .

Figura 1.17: Trabalho de Chang, com Layout do aparato Hall

#### SCANNING HALL PROBE MICROSCOPE

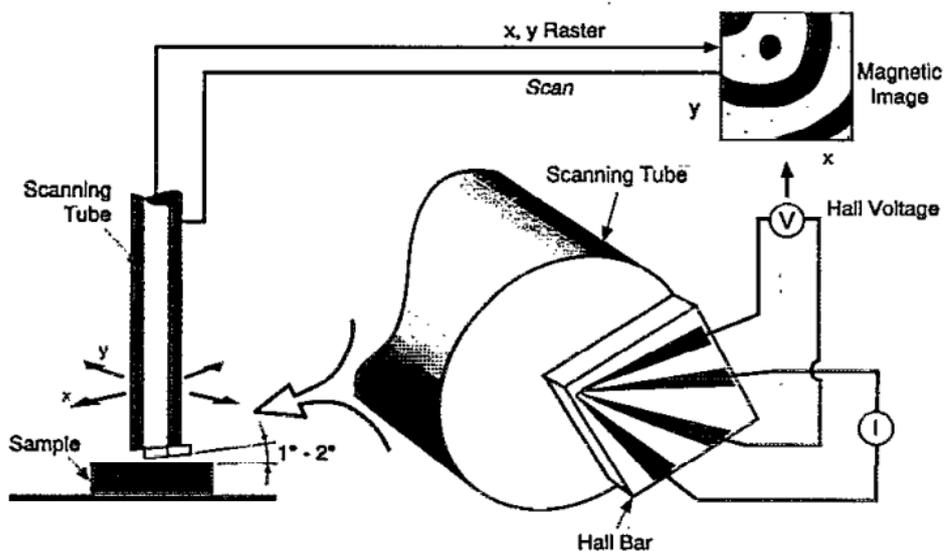


Figura retirada de [Chang et al. 1992]

A técnica apresenta várias vantagens sob o uso de SQUID, sendo mais barata, robusta, e requerendo um aparato técnico de complexidade inferior.

Além das características descritas, MMV's utilizando sensores Hall podem ser montados em configurações gradiométricas (com sensores dispostos a distâncias próximas, porém diferentes da amostra), úteis na redução de ruído para realização de medições de precisão, como observado num trabalho de [Araujo et al. 2023] na Figura 1.18.

**Figura 1.18:** Imagem do layout gradiométrico, como apresentado em [Araujo et al. 2023]

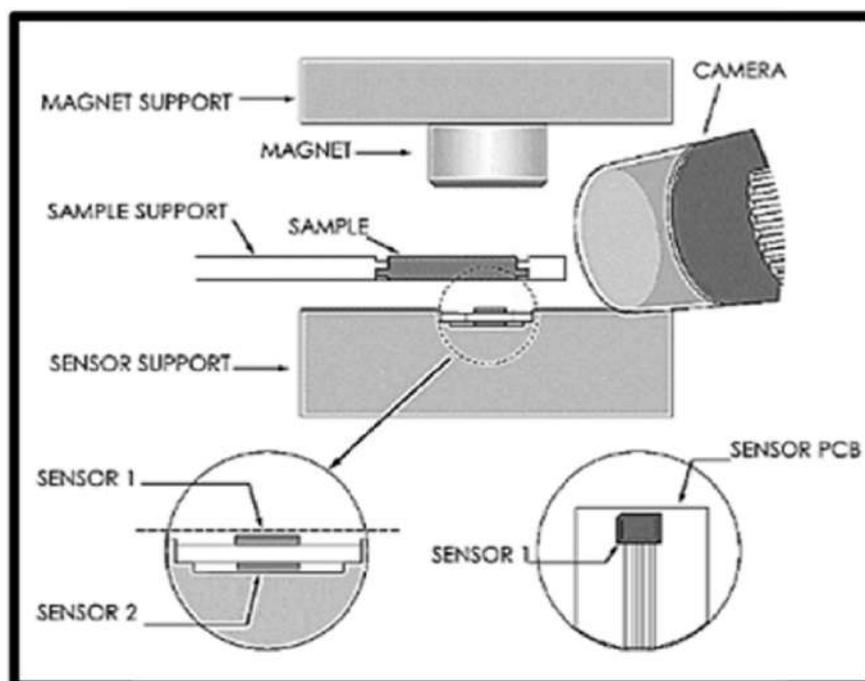


Figura retirada de [Araujo et al. 2023]

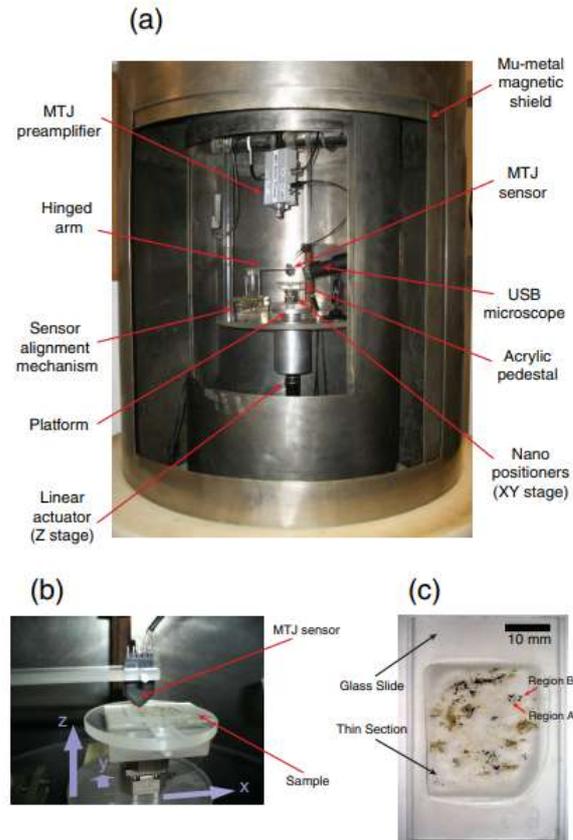
## 1.4 Trabalhos Anteriores

O projeto descrito por esta dissertação se apoiou em diversos trabalhos prévios. Estes, por sua vez, lidaram com montagens e configurações do MMV, com programas de controle e aquisição e, por fim, com o desenvolvimento de programas de tratamento de dados.

**Figura 1.19:** Trabalho anterior, com câmara de  $\mu$ -metal e estrutura interna utilizada na adaptação do MMV deste trabalho

Meas. Sci. Technol. 25 (2014) 105401

E A Lima et al

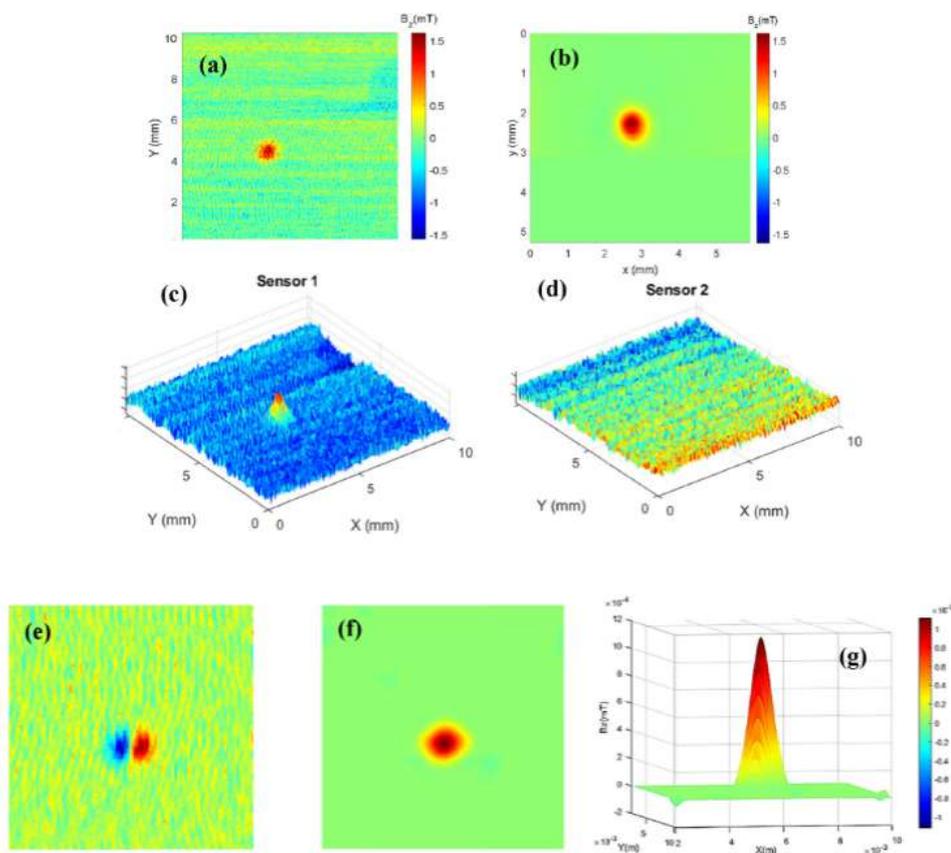


Figuras retiradas de [Lima et al. 2014]

O desenvolvimento deste MMV utiliza-se de uma câmara de  $\mu$ -metal previamente montada para utilização de um *Tunnel Magnetoresistance Resistance Sensor* (TMR), além de basear-se nos métodos e montagens anteriores de MMV's, como pode ser observado na Figura 1.19 [Lima et al. 2014].

Além disto, um programa de tratamento de dados foi desenvolvido durante o transcorrer deste trabalho, com uma das etapas de tratamento de imagem sendo utilizada para tratar dados em um trabalho recente [Araujo et al. 2023], como demonstrado na Figura 1.20. O programa em questão será discutido em profundidade no Capítulo 3.

**Figura 1.20:** Exemplo do uso do programa de tratamento de dados desenvolvido neste trabalho



Figuras retiradas de [Araujo et al. 2023]

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é:

- **Adaptar uma estrutura de blindagem  $\mu$ -metal**, previamente presente no laboratório e anteriormente citada em trabalhos anteriores, para um Microscópio Magnético de Varredura (MMV).
- **Versatilizar o microscópio para vários sensores.** Para tanto, será realizada uma pequena avaliação de diversos sensores, tomando em consideração aspectos como área sensível, para a escolha dos mais convenientes para aplicação no MMV.
- **Montar um sistema de leitura, aquisição e posicionamento na dita estrutura.** Tal sistema deverá consistir em: uma fonte de precisão, com espectro de alimentação suficiente para os sensores escolhidos; um nanovoltímetro, com sensibilidade suficiente para captação de sinais pouco intensos; um sistema de atuadores, com precisão no passo equivalente à janela de sensoriamento dos sensores.
- **Testar as capacidades do MMV.** Tal teste será realizado analisando amostras com resultados já conhecidos, obtidos de sensores auxiliares. Além disso, um programa auxiliar foi desenvolvido para tratar os resultados obtidos destas amostras.
- **Tentar realizar um estudo de aplicabilidade do MMV para o micropaleomagnetismo.** Para tanto, após a avaliação das capacidades do MMV, uma amostra de rocha foi escolhida para ser analisada.

O intuito final é desenvolver e testar o aparato para descrições finas de perfis magnéticos remanentes, além de desenvolver um programa de tratamento de dados automatizado que acompanhe o mesmo, extraindo informações relevantes das amostras analisadas. Tal aparato se mostraria especialmente útil para aplicações futuras no estudo de rochas por micropaleomagnetismo.

# Capítulo 3

## Instrumentação

Neste capítulo serão apresentados os mecanismos de avaliação, instrumentos utilizados, programas de controle e aquisição além de diversas nuances que auxiliarão na adaptação da estrutura prévia para um MMV operacional.

**ATENÇÃO: É importante diferenciar aspectos com respeito à "resolução", quando esta é mencionada neste trabalho. "Resolução Espacial (RE)" é um parâmetro configurável, definido como o tamanho mínimo do passo, realizado pelos posicionadores, que pode ser identificado nos mapas de varredura como a dimensão espacial das arestas de um pixel, ou um dado coletado. "Resolução Magnética (RM)" é um parâmetro físico, e em geral, invariável para o sensor, e consiste na região dentro da qual um dado sensor extrai uma medição. É importante ressaltar que apesar de a RM ser geralmente fixa, o campo que um sensor detecta de uma mesma amostra pode variar de acordo com a distância desta.**

### 3.1 Estrutura Física do MMV

A estrutura física do MMV foi adaptada de um trabalho prévio desenvolvido por [Lima et al. 2014], consistindo de uma câmara  $\mu$ -metal (material metálico tipicamente usado em blindagens magnéticas) de duas camadas que atua como um escudo contra campos magnéticos externos, especialmente os de baixa frequência. A câmara possui dimensões de 2,00 m de altura por 0,60 m de diâmetro na camada externa, como observado na Figura 3.1, com a camada interna possuindo 2,00 m de altura por 0,45 m de diâmetro.

**Figura 3.1:** Câmara de blindagem magnética

Imagem do autor.

Na parte interior da câmara, como observado também em [Lima et al. 2014], é encontrada uma base de acrílico, os nano posicionadores, uma câmera USB que permite a visualização durante a medição (podendo ser desligada caso necessário). Além do mencionado, foi adicionado um braço com suporte para sensor, um suporte circular que permite a instalação de uma bobina de 8,6 cm de diâmetro e a câmera USB foi reposicionada lateralmente. Fotografias da montagem interna da câmara com sensores HQ-0811 e STJ-010 podem ser encontradas nas Figuras 3.2 e 3.3.

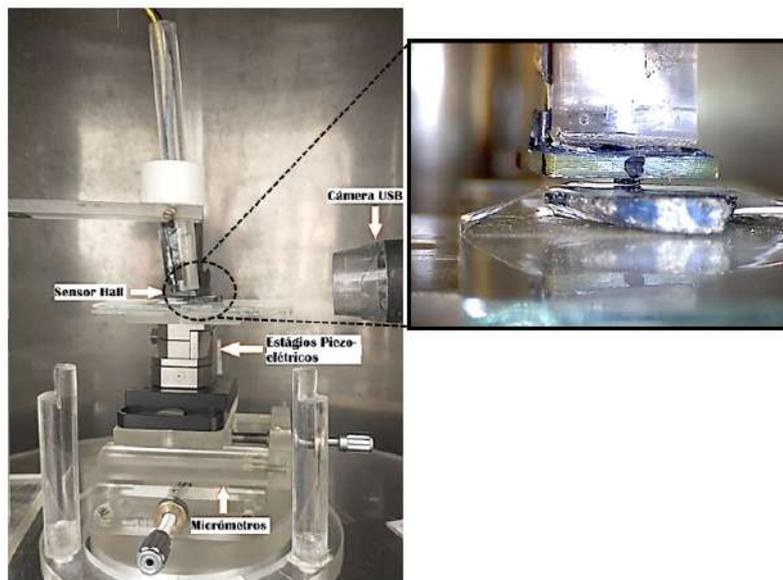
**Figura 3.2:** Layout do MMV com sensor HQ-0811, identificando as partes que o compõe e a imagem obtida da câmera USB.

Imagem do autor.

**Figura 3.3:** Layout do MMV com sensor STJ-010, identificando as partes que o compõe e a imagem obtida da câmera USB.

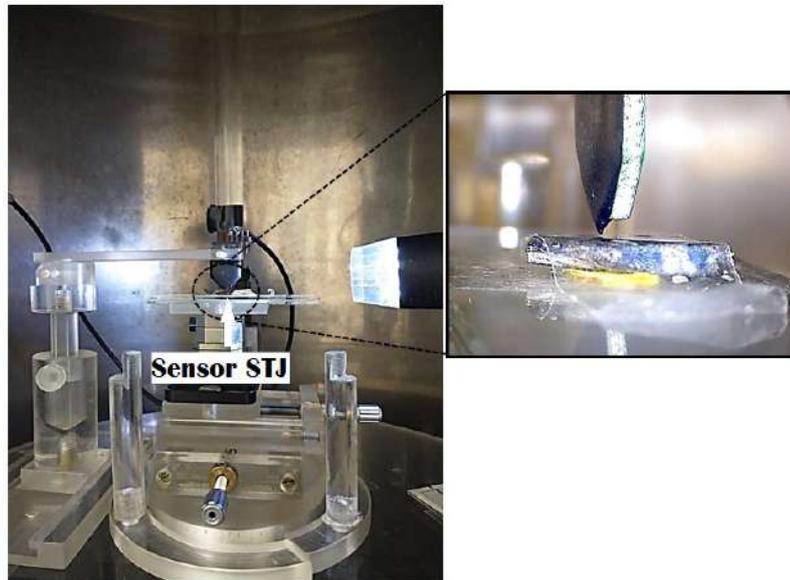


Imagem do autor.

## 3.2 Sensores e Curvas de Resposta(CR)

Um dos pontos cruciais para a montagem do MMV é escolher um sensor adequado, com qualidades essenciais às medições a serem realizadas. Para tanto, foi feita uma análise para avaliar as características dos sensores escolhidos para avaliação, com pesquisa nos datasheets disponíveis sobre os mesmos e avaliação de relações de sinal ruído. Segue abaixo a metodologia seguida.

### 3.2.1 Janela de Aquisição

Todos os sensores em questão se baseiam em efeito Hall para extrair informações sobre o campo magnético local. Considerando que as medições são feitas num espaço equivalente ao tamanho da área sensível do sensor, estas gerarão informações mais acuradas quanto menor for esta. Tal informação pode geralmente ser encontrada com consulta do datasheet dos sensores, sendo normalmente identificada com a letra  $\phi$ , como destacado na 3.4.

Os sensores avaliados, com suas devidas RM's, constam a seguir:

**Figura 3.4:** Datasheet do sensor HQ-0811, da marca Asahi Kasei™. Destacado em vermelho, consta o diâmetro da janela de aquisição do sensor.



Figura retirada de: HQ-0811 InAs Quantum Well Hall Element Datasheet [AKM 2009]

- HQ-362A15 com RM de  $300 \mu\text{m}$
- HG-176A com RM de  $300 \mu\text{m}$
- EQ-430L com RM de  $300 \mu\text{m}$
- EQ-431L com RM de  $300 \mu\text{m}$
- HQ-0811 com RM de  $200 \mu\text{m}$
- STJ-010 com RM de  $6 \mu\text{m}$  a  $10 \mu\text{m}$

Após feita a avaliação, 4 dos sensores que possuem RM's superiores a  $200 \mu\text{m}$  foram descartados, sendo o sensor HQ-0811 da Asahi Kasei Microdevices o escolhido para utilização no MMV, sendo identificado como **Microscópio Magnético de Varredura com Hall (MMVH)**. Além deste, o sistema também foi testado com sensor de magneto-resistência STJ-010 da Micro Magnetics™, como na Figura 3.5, sendo este identificado por **Microscópio Magnético de Varredura por Magneto-resistência (MMVM)**.

### 3.2.2 Produção de Placas

Selecionados os sensores a serem utilizados foi decidido, ainda durante as fases iniciais do projeto, a padronização por placas de circuito para os HQ-0811, de forma a facilitar o manuseio e tornar a montagem e as conexões mais robustas.

Um projeto foi desenvolvido no programa Ki-Cad para a produção das placas, como pode ser visto nas Figuras 3.6 e 3.7, sendo a empresa responsável

Figura 3.5: Datasheet do sensor STJ-010.

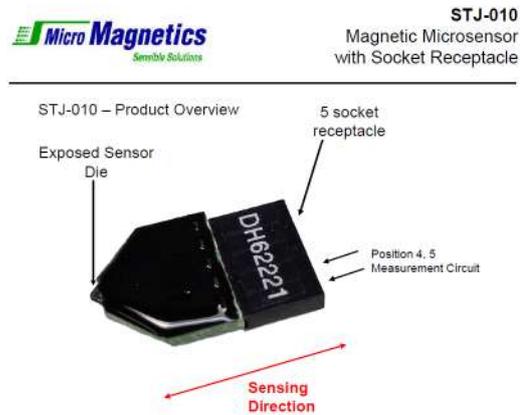


Figura retirada de: MicroMagnetics STJ-010 Magnetic Microsensor with Socket Receptacle [MicroMagnetics 2007].

Figura 3.6: (a) Esquema e (b) arquivo PCB das placas, realizados em Ki-Cad.

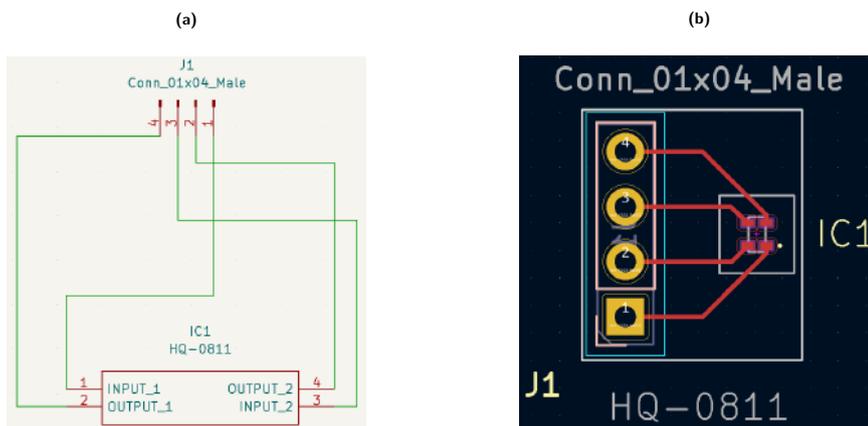


Imagem do autor produzida em Ki-Cad.

pela produção e teste, uma empresa local, de nome *PRV TECH Soluções Eletrônicas*.

Com a obtenção das placas, onde 5 foram produzidas, as mesmas foram testadas em campo DC, produzido por um par de helmholtz, com suas devidas CR's coletadas, como pode ser observado na seção seguinte.

### 3.2.3 Curva de Resposta dos Sensores

Para a Curva de Resposta (CR) foram usados um Par de Helmholtz, de produção da PUC-Rio, apresentado na Figura 3.8, alimentado por uma fonte

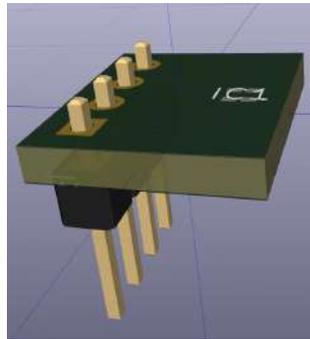
**Figura 3.7:** Esquema 3D das placas

Imagem do autor produzida em Ki-Cad.

DC INSTRUTHERM™ DC Power Supply FA-3030, utilizada na CR do sensor HQ-0811, e por uma fonte Keithley™ Precision Current Source Model 6220 , utilizada na CR do sensor STJ-010.

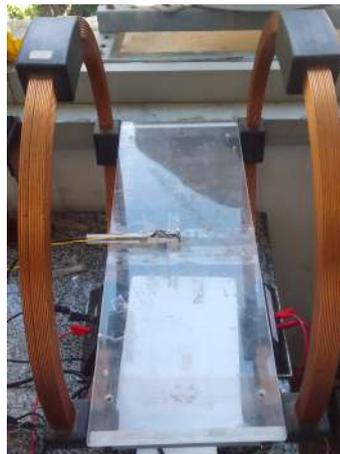
**Figura 3.8:** Par de Helmholtz utilizado na CR.

Imagem do autor.

De posse da CR desse par, foram feitas várias medições utilizando o sensor HQ-0811, sendo este alimentado por uma Keithley Precision Current Source Model 6220 com **3 mA**, a CR obtida para o sensor foi de aproximadamente  $1,8 (V/T) + 0,3 \times 10^{-3}$ , como pode ser observado na Figura 3.9.

Para o sensor STJ-010, as medidas realizadas foram alimentadas e extraídas de um Keithley™ Nanovoltmeter Model 2182A, com o par de Helmholtz sendo alimentado por uma Keithley Precision Current Source Model 6220. A razão da escolha desta alimentação para o par é o fato da maior sensibilidade do STJ-010 requerer menores campos para a sua CR. Na Figura 3.10 é apresentado

Figura 3.9: CR do sensor HQ-0811.

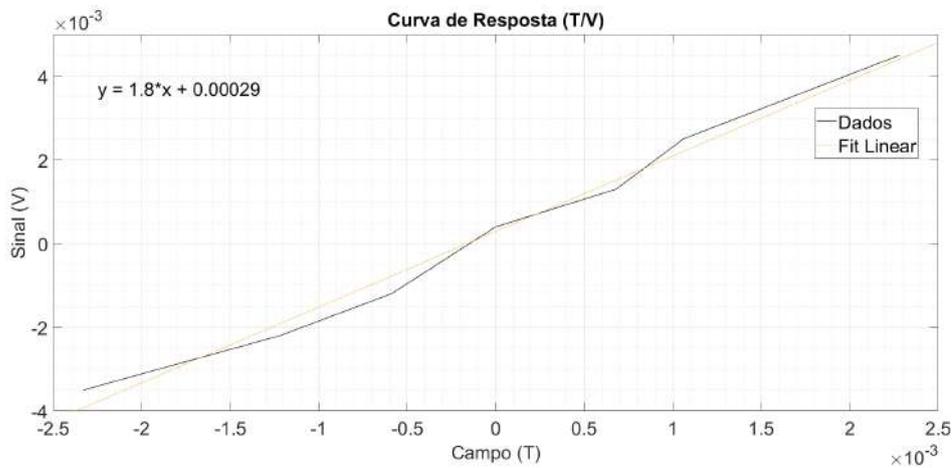


Imagem do autor.

a CR obtida, com alimentação do STJ-010 em  $10 \mu\text{A}$ , sendo o fit da reta  $7,6 \times 10^{-5} \text{ (V/T)} - 3 \times 10^{-9}$ .

Figura 3.10: CR do sensor STJ-010.

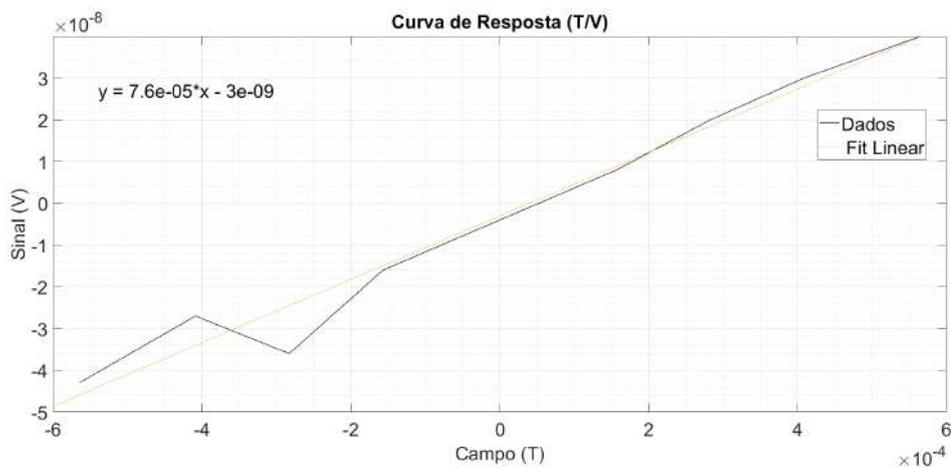


Imagem do autor.

É importante notar que os resultados crus das calibrações não podem ser usados diretamente no trabalho. As equações de CR são equações lineares, podendo ser padronizadas como:

$$L = \text{Sense} \cdot B + \text{Off} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1,  $L$  é a leitura de sinal, em Volts,  $Sense$  é o a razão Tensão/Campo, em Volts por Tesla,  $B$  é o campo medido, em Tesla, e  $Off$  é um desvio relativo, em Volts. Quando é feita uma medição, os valores  $L$ ,  $CR$  e  $Off$  são conhecidos, logo, rearranjando as equações para obter  $B$ , teremos:

$$B = \frac{L - Off}{Sense} \quad (3.2)$$

### 3.2.4 Relação Sinal/Ruído

Uma segunda característica importante a ser estudada é quão grande o sinal produzido no sensor (no caso de sensores hall, o potencial transversal) é em relação ao ruído de fundo em medidas padrão. Devido ao método distinto de funcionamento de sensores de magneto resistência, onde tanto a alimentação como a leitura são feitas em paralelo, o sensor STJ-010 não foi avaliado da forma descrita à seguir

As especificidades para a avaliação são as seguintes:

- Uma bobina personalizada, com características como relação campo/-corrente previamente calculadas e testadas ( $7,7 \times 10^{-4}$  T/A, no SI), é montada em um suporte de acrílico, como na Figura 3.11, sendo o sensor HQ-0811 a ser testado colocado na posição onde foi medido o maior campo da CR. Tal posição e intensidade do campo são medidos com o uso de um *Series 9950 Gauss/Teslameter*, da F.W. Bell, como apresentado na Figura 3.12.
- Os sensores são alimentados com uma corrente de **3 mA**, por uma fonte *Keithley 6220 Precision Current Source*, na mesma configuração a ser utilizada futuramente na aquisição de medidas.
- A bobina é alimentada por uma *Keithley 6221 Dc and AC Current Source*, com uma corrente alternada de **105 mA**, com CR previamente calculada de  $7,7 \times 10^{-4}$  T/A, em duas configurações distintas de frequência, **4 Hz** e **80 Hz**

**Figura 3.11:** Configuração do MMV com suporte para bobina.

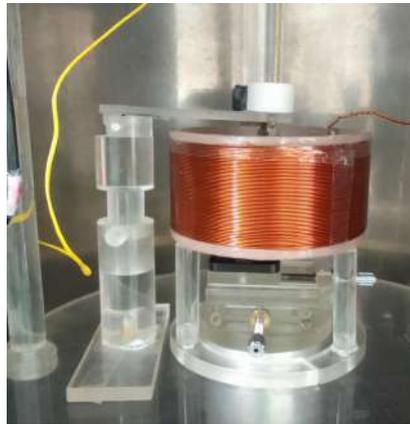


Imagem do autor

**Figura 3.12:** Gaussímetro utilizado como base para medidas de campo.



Imagem do autor

- Um analisador de espectro *Model SR760 FFT Spectrum Analyzer*, da Stanford Research Systems, apresentado na figura 3.13, controlado por um programa de aquisição e controle feito em LABView, recebe a saída do potencial transversal do sensor HQ-0811, gerando um gráfico de frequências por intensidade de sinal.

**Figura 3.13:** Analisador de espectro utilizado nas medidas de sinal ruído.



Imagem do autor.

- As avaliações são feitas em 4 configurações distintas, sendo estas: frequência do campo de 4 Hz com câmara  $\mu$ -metal aberta, frequência do campo de 4 Hz com câmara  $\mu$ -metal fechada, frequência do campo de 80 Hz com câmara  $\mu$ -metal aberta, frequência do campo de 80 Hz com câmara  $\mu$ -metal fechada. As configurações em questão cobrem o funcionamento do sensor tanto em alta como em baixa frequência, e servirão como comparativo quanto à eficácia da blindagem magnética da câmara.
- A relação sinal ruído é calculada tomando o pico máximo de sinal encontrado no gráfico, e subtraindo o mesmo pela média do ruído de fundo.

Com estas especificações, pode ser observado na Figura 3.14 as relações Sinal/Ruído obtidas para as duas frequências de prova com a câmara  $\mu$ -metal aberta, e na Figura 3.15, constam a relação Sinal/Ruído nas duas frequências de prova com a câmara fechada para o sensor escolhido.

**Figura 3.14:** Gráficos de sinal ruído do sensor HQ-0811, com câmara  $\mu$ -metal aberta, a (a) 4 Hz e (b) 80 Hz.

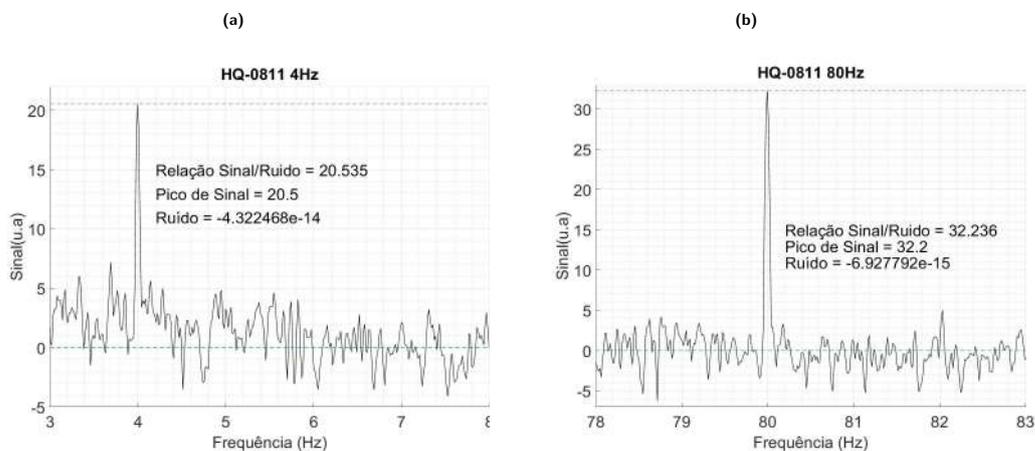


Imagem do autor produzida em MatLab.

Deve-se observar que em ambas as situações, as relações Sinal/Ruído obtidas com a câmara fechada são invariavelmente melhores, com melhorias entre 10 % e 25 % em relação à câmara aberta. A proposta inicial de aplicação de tal câmara era isolar os experimentos nela contidos de ruídos de fundo, em especial os de baixa frequência (visto que os experimentos nela realizados também ocorrem sob situações de baixa frequência). Os dados em questão

**Figura 3.15:** Gráficos de sinal ruído do sensor HQ-0811, com câmara  $\mu$ -metal fechada, a (a) 4 Hz e (b) 80 Hz.

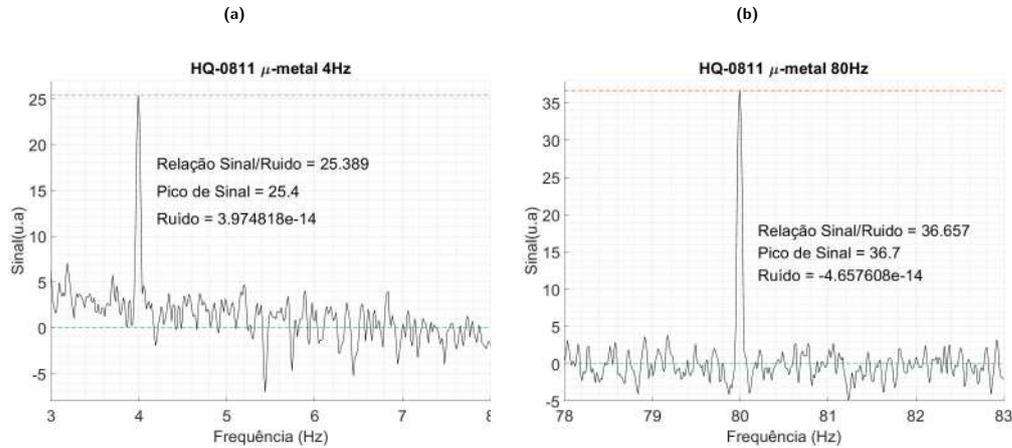


Imagem do autor produzida em MatLab.

mostram que o isolamento magnético aparenta ser mais efetivo exatamente nesta situação.

### 3.3 Attocube Systems

Uma das necessidades na construção de um microscópio é garantir uma boa Resolução Espacial (RE). Para tanto, nano posicionadores *Attocube*<sup>TM</sup> ANP-110 foram adaptados da montagem de [Lima et al. 2014], oferecendo RE's na faixa de dezenas de nanômetros, tipicamente em torno de 50 nm. As informações pertinentes ao funcionamento do sistema podem ser encontradas em manuais online da própria empresa em [Attocube 2009].

#### 3.3.1 Attocube ANP-110

Os nano posicionadores Attocube da série ANP utilizam-se do princípio de funcionamento *slip-stick*. Como demonstrado na Figura 3.16, o nano posicionador consiste em um atuador piezoelétrico, onde é aplicada uma tensão elétrica para movimentação; uma mesa de suporte segura no trilho guia, na qual podem ser posicionados os itens à serem escaneados; um trilho guia, que mantém a mesa em movimentação paralela ao eixo; uma membrana flexível, que prende o trilho

guia ao suporte e recobra a posição deste ao fim de cada passo; e a estrutura de suporte, sobre o qual o nano posicionador é fixado.

**Figura 3.16:** Layout do Nano-posicionador.

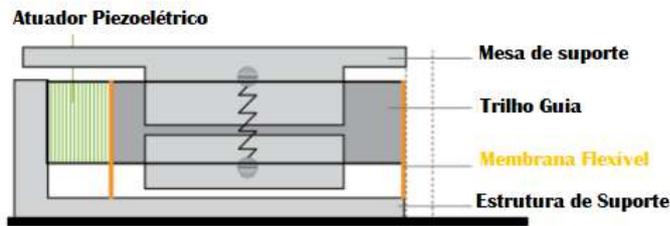


Figura retirada de: AttoMotion User Manual-Premium Line Positioners and Scanners Página 7 [Attocube 2009].

O método de funcionamento do nano posicionador, chamado *Slip-Stick Drive*, consiste no seguinte:

- Passo 1: Com a mesa de suporte firmemente afixada ao trilho guia, uma tensão DC é gradualmente aplicada ao atuador piezoelétrico. A aplicação de tensão gera uma deformação no atuador, movendo o trilho guia, e consequentemente, a mesa de suporte.
- Passo 2: A mesa se prende ao trilho guia, movendo-se de acordo com a tensão aplicada ao piezo. Devido ao aumento gradativo, o trilho guia não desliza sob a mesa, permanecendo preso à esta.
- Passo 3: A aplicação de tensão cessa, e o trilho guia se move de volta à posição original. Devido à rápida aceleração e à inércia da mesa de suporte, o trilho guia retorna à posição inicial com baixíssima fricção, com a mesa de suporte permanecendo quase estacionária.

Deve ser ressaltado que o princípio de funcionamento do nano posicionador é baseado em fricção, e portanto não é 100 % reproduzível entre ciclos. É também atestado no manual do usuário que o tamanho do passo no movimento de abertura do nano posicionador é maior que no movimento de fechamento. Tais fatores foram observados durante a montagem do aparato, sendo abordados por programação em LabView.

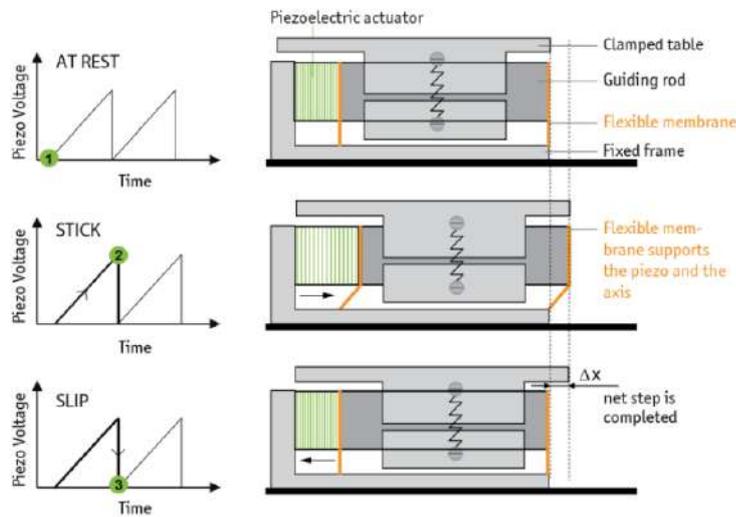
Figura 3.17: Método de Movimentação *Slip-Stick Drive*

Figura retirada de: AttoMotion User Manual-Premium Line Positioners and Scanners Pag. 7 [Attocube 2009].

### 3.3.2 AttoCube Controller ANC-150/3

Para o controle das operações dos nano posicionadores, o controlador *AttoCube Controller ANC-150/3* foi utilizado. Após ser conectado aos nano posicionadores com os cabos supridos pelo fabricante, o mesmo foi conectado à um computador para uso remoto, usando um conector macho RS-232.

O modelo ANC-150/3 conta com 3 módulos de controle para eixos independentes, como pode ser visto na Figura 3.18.

Figura 3.18: Controlador AttoCube ANC-150/3, com os 3 módulos identificados



Figura retirada de: AttoCube User Manual Piezo Step Controller ANC-150 Pag.11 [Attocube 2009]

Pode ser observado na Figura 3.18 que o controlador é dotado de algumas funções, entre elas: modo **CAP**, que permite a medição da capacitância do nano posicionador, e portanto a avaliação do funcionamento do mesmo; modo **CCON**,

utilizado para controle externo, amplamente usado no trabalho desenvolvido; modo **OFF**, funcionando como aterramento dos nano posicionadores; modo **RUN**, tratando-se do controle manual dos nano posicionadores através dos botões; modo **EXT** que permite o escaneamento com eletrônica externa.

## 3.4 Delta-Mode

Delta-Mode<sup>TM</sup> é um modo de aquisição de medidas, desenvolvido pela marca Keithley, onde dados coletados sob reversão de corrente são tratados por média, com o objetivo de descartar ruídos de Força Eletromotriz térmicas (FEM térmicas) que podem alterar os dados obtidos. O modo de operação do mesmo consiste na operação conjunta entre um *Precision Current Source Model 6220* e *Nanovoltmeter Model 2182A*, com a forma de operação, descrita posteriormente, podendo ser obtida dos manuais da empresa [Keithley 2009].

### 3.4.1 Princípios do Método

O método funciona inicialmente aplicando uma corrente positiva, na qual é adquirida uma tensão  $T_1$ , em seguida a polaridade é trocada, adquirindo uma tensão  $T_2$ , e por fim, uma média dos dois valores é feita, com o resultado sendo a medida real.

$$\text{Medida Delta} = \frac{T_1 - T_2}{2} \quad (3.3)$$

Um exemplo prático seria uma medida num circuito ôhmico, onde a resistência é 10 k $\Omega$  com uma corrente delta de 1 mA. Desprezando efeitos térmicos, a tensão esperada do circuito seria de 10 V, entretanto, se imaginarmos que efeitos térmicos introduzem um ruído de 10 mV, os valores de  $T_1$  e  $T_2$  se alterariam:

$$T_1 = 10 + 0.01$$

$$= 10.01 \text{ V}$$

$$T_2 = -10 + 0.01$$

$$= -9.99 \text{ V}$$

O valor final, tido como a leitura real, seria então:

$$\begin{aligned} \text{Medida Delta} &= \frac{T_1 - T_2}{2} \\ &= \frac{10.01 - (-9.99)}{2} \\ &= \frac{20}{2} = 10 \text{ V} \end{aligned}$$

Retornando assim a medida real que teríamos sem FEMs.

### 3.4.2 Delta-Mode com Média Móvel

O aparelhos da marca Keithley, sendo os utilizados no caso; *Precision Current Source Model 6220* e *Nanovoltmeter Model 2182A*, utilizam-se de uma janela móvel de medição para aquisição das médias, como pode ser visto em 3.19:

**Figura 3.19:** Delta Mode com aquisição por média móvel.

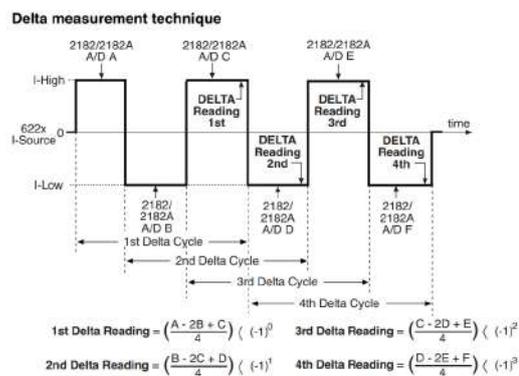


Figura retirada de: Model 6220/6221 Reference Manual Página 142 [Keithley 2009]

Cada ciclo de aquisição Delta consiste em 3 mudanças na polaridade da corrente aplicada, com uma média ponderada onde a medida intermediária tem peso duplicado. Cada medida é também multiplicada por um termo negativo com ordem dependente do número de ciclos, de forma a manter as medições realizadas sempre positivas. Uma imagem de ambas as Keithley's em funcionamento Delta-Mode é apresentada na Figura 3.20.

**Figura 3.20:** Delta Mode com aquisição por média móvel.



Imagem do autor

## 3.5 Automatização em LABVIEW

Com o intuito de prover a comunicação necessária para as medições dos sensores e controlar os passos dos atuadores piezoelétricos, uma rotina em LABVIEW foi adaptada de trabalhos anteriores. Tal programa visa permitir todos os controles de entrada e saída do MMV a partir de uma plataforma única, além de padronizar a leitura em arquivos de texto que serão posteriormente lidos por programas auxiliares de análise em MATLAB. O painel de controle pode ser visualizado na Figura 3.21.

**Figura 3.21:** Painel de controle do Programa de comunicação, controle de passos e Delta Mode.

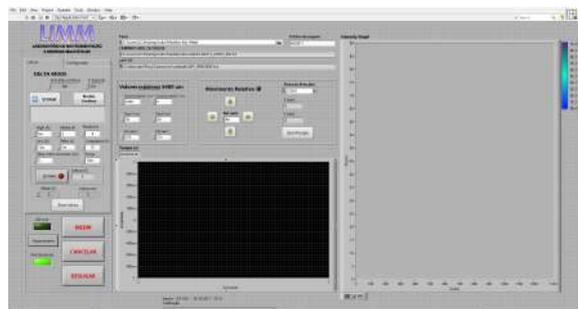


Imagem do autor, obtida de LabVIEW.

Uma pequena descrição das partes ajustáveis do painel será apresentada à seguir.

### 3.5.1 Alimentação e Leitura

Nesta seção do painel é possível controlar a *inputs* (alimentação dos elementos conectados, além de definição de sensores utilizados), *Compliance* (limite de tensão para prevenir danos aos elementos alimentados), além de prover um auxílio visual da *Leitura* detectada, e permitir a realização de *offsets* (definição do zero da medida).

**Figura 3.22:** Seção do painel responsável por configurações de alimentação e leitura.

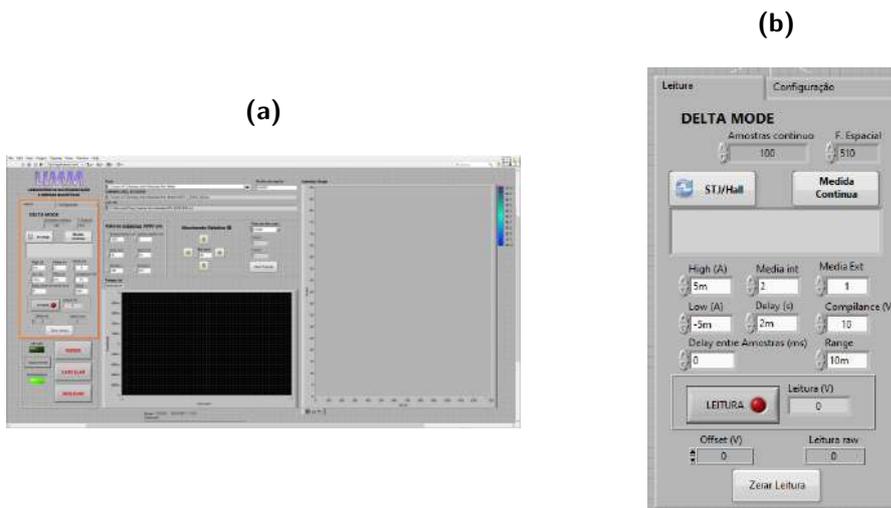


Imagem do autor produzida em LABVIEW

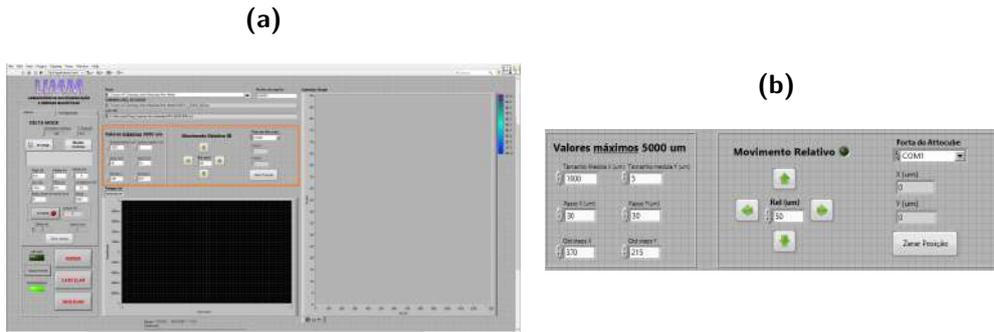
Todos os parâmetros descritos podem ser observados na Figura 3.22.a, onde visualizamos o painel inteiro, com um destaque para a seção mencionada e também na Figura 3.22.b, onde vemos um zoom da seção mencionada com as funções descritas.

### 3.5.2 Controle de Passos e Varredura

De forma análoga, o programa provê ao usuário um controle sobre as características de varredura, um referencial para as medições à serem feitas,

além da possibilidade de personalizar a RE do mapa a ser feito (controle sobre o tamanho do passo), como pode ser observado na Figura 3.23.a, onde visualizamos o painel inteiro, com um destaque para a seção mencionada e também na Figura 3.23.b, onde vemos um zoom da seção mencionada com as funções descritas.

**Figura 3.23:** Seção do painel responsável por definição da área de varredura e configuração de RE.



# Capítulo 4

## Resultados e Comparativos

### 4.1 Tratamento de Dados

Após feita a aquisição de dados, é crucial que, antes do processo de análise, os dados sejam tratados com o objetivo de eliminar ruído e tornar o sinal mensurável. Para tanto, foi desenvolvido um programa em **MatLab**, identificado como **Mapeador**. As seções seguintes apresentam uma descritiva passo-a-passo do programa, apresentando incluso trechos-exemplo do código. O programa **Mapeador** foi previamente utilizado e descrito em [Araujo et al. 2023], em artigo recente.

A amostra à ser utilizada no caso exemplo foi ajustada em um porta-amostra, se tratando de um fio de níquel com 99,9 % de pureza, com dimensões de  $125 \times 480 \mu\text{m}$  (Raio e Altura da cavidade). O sensor em questão, um Hall-0811 da marca Asahi Kasei<sup>TM</sup>, foi alimentado usando Delta-Mode<sup>TM</sup> com 3 mA.

#### 4.1.1 Configuração e Aquisição de Dados

**ATENÇÃO:** Por razões de abreviação e sucintez, os trechos do programa utilizados como exemplo foram reduzidos, retirando trechos não decisivos para a lógica do código, mantendo entretanto a estrutura original. Para visualizar o código-fonte na íntegra, favor consultar o Apêndice.

A primeira e segunda seção tratam da configuração dos parâmetros à serem utilizados no algoritmo, identificação do tipo de sensor, opções de suavização, e limitadores lógicos.

Inicialmente, o programa utiliza os dados providenciados em arquivo **.txt**, agrupando-os apropriadamente para o tratamento. Os arquivos são compostos por 3 colunas, sendo as duas primeiras os valores de passo (em nanômetros) dos atuadores nos eixos X e Y, e a 3ª coluna onde constam as leituras de campo magnético medidos (em Volts) para cada posição no plano XY.

Os dados podem ser dispostos num espaço 3D, com os eixos X e Y identificando a posição, e o eixo Z com o valor da leitura na posição. Antes da plotagem, uma calibração previamente medida (vide Capítulo 2) é aplicada aos valores tabelados, transformando o eixo Z de Volt para Tesla. Na Fig. 4.1 consta um gráfico exemplo, identificado como **Mapa Original**, juntamente com uma foto da amostra em questão.

**Figura 4.1:** Amostra em escala de (a) fio de níquel, e (b) mapa obtido.

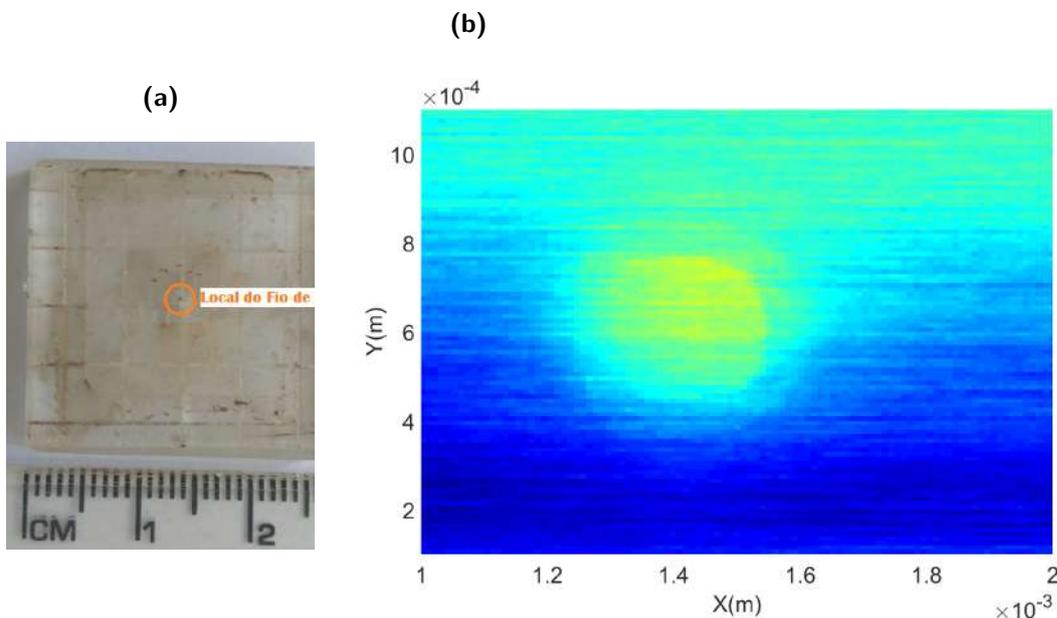


Imagem do autor.

São então inseridas no programa as características dos poços (profundidade e diâmetro) e a densidade média do material colocado nestes, como pode ser visto no trecho abaixo retirado do programa. **É válido ressaltar que as medidas de magnetização retiradas por este método podem diferir da**

realidade, visto que as massas de material em questão se encontram no limiar de erro de balanças de precisão disponíveis. Considerando isso, as magnetizações são obtidas comparando os dados obtidos com um modelo de um cilindro de correntes, calculado por Lei de Biot-Savart, onde as dimensões e densidade do material são utilizadas para estimar a massa do cilindro, por fim obtendo uma razão da densidade de corrente na área do cilindro, em  $A\ m^2/kg$ .

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parâmetros da Amostra %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Raio = 125e-6; % Raio da cavidade (m)
Altura = 480e-6; % Altura da cavidade (m)
Area = pi*Raio^2;
Volume = Area*Altura;
DistanciaSensor = -Altura; % Distância do sensor à cavidade (m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Características do Material %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Densidade = 8.9e3; % Densidade (kg/m^3)
Massa = Densidade*Volume; % Massa (kg)
% Primeira aposta do valor de momento magnético
MomentoMagnetico = 7e-7;
% NÃO MEXER
Permeabilidade = 1.25e-6;
Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)

```

## 4.1.2 Diferenciação e Mapas de Gradientes

Abaixo consta uma pequena seção extraída do algoritmo, onde constam variáveis de importância no tratamento, sendo estas **Janela**, **Calibra** e **Recalibra**.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Suavizador %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% O comando seguinte seta as regras de suavização, útil para ambos os
% programas
Suaviza = Sim; % Aplica filtro durante a feitura dos processos (Altera o resultado final)
Janela = 6; % Seta o tamanho da janela móvel que realizará as médias
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Limitadores Lógicos %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Insira abaixo o valor do limite mínimo de aquisição de sinal (Entre 0 e 1).
% É aconselhável rodar o programa uma vez para procurar os valores mais
% adequados para o tratamento. Vale sempre tentar buscar valores que deixem
% as regiões de interesse visíveis, inclusive os picos.

```

```

Calibra = 0.05;
% Pós tratamento MÉTODO DE BUSCA E REMOÇÃO DE RAMPA + MÉTODO LÓGICO DE
% GRADIENTES. "1" para sim, "0" para não.
PontoProblema = Sim; % Utiliza lógica de gradientes e baseia o algoritmo nos máximos localizados pela lógica
Retratar = Sim;
Recalibra = 0.08; % Limite mínimo para guardar valores do mapa lógico

```

Para tratar os dados, o algoritmo inicialmente varre o **Mapa Original** em busca de um valor máximo absoluto, que será usado como referência. É então feita uma diferenciação ao longo de X no mapa inteiro, sendo o mapa obtido, identificado por **Mapa de Gradientes** normalizado, como pode ser visto na Fig. 4.2.

**Figura 4.2:** Mapa de Gradientes do fio de Níquel, feito a partir do mapa original.

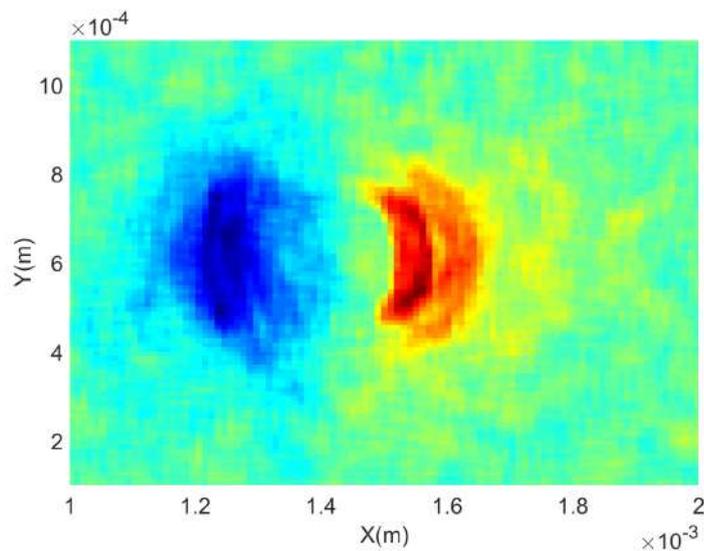


Imagem do autor.

A partir do **Mapa de Gradientes**, é feito um loop onde o algoritmo busca, usando a variável **Calibra** como filtro passa-alto, por valores que correspondam à um mínimo percentual do valor máximo no mapa; todo valor abaixo deste percentual é considerado ruído, todo valor acima é considerado sinal. Usando o filtro, um **Mapa Lógico** é obtido, guardando as posições de sinais e ruídos, identificando os pontos por **1** (quando sinal) ou **0** (quando ruído), como pode ser visto na Fig. 4.3.

Deve-se considerar que os picos do **Mapa Original** seriam descartados como ruído ante as condições anteriormente descritas, como pode ser percebido na Fig. 4.3. Para contornar este problema, nos aproveitaremos da variável

Figura 4.3: Mapa Lógico do fio de Níquel.

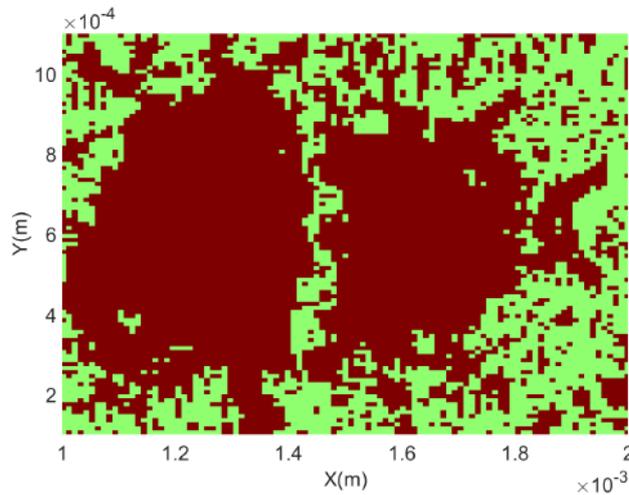


Imagem do autor.

**Janela.** Esta variável guarda um número, correspondente a uma quantidade de elementos nos eixos X e Y, gerando uma janela móvel de tamanho **X** por **Y**. Os valores dentro da janela são utilizados para fazer uma média aritmética, com valores que divergem substancialmente desta média sendo descartados e iguados a esta média. A janela então se move ao longo do mapa, ponto a ponto, atualizando os valores em cada passo. Utilizando esse comando no **Mapa Lógico**, obtemos uma versão suavizada do mesmo (com valores contínuos entre 0 e 1), um **Mapa Lógico Suavizado**, como pode ser visto na Fig. 4.4.

Abaixo consta a seção do código responsável pela diferenciação e construção dos mapas de lógicos e de gradientes:

```

XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
% DIFERENCIAÇÃO %
XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX

\\
% A matriz de taxas se mostra eficiente na localização de sinais em meio à
% ruído e drift.
\\
Filtro = ones(Janela)/(Janela^2); % Cria a janela e faz as médias
ZGrad = diff(Z); % Deriva os valores obtidos, obtendo uma matriz de taxas
ZGrad = ZGrad/(max(max(ZGrad)));
ZGrad = filter2(Filtro,ZGrad); % Filtra o mapa de gradientes, diminuindo o ruído
\\
[NX,NY] = size(Z); % Seta o número de linhas e colunas da matriz do mapa
ZABS=abs(ZGrad); % Gera uma matriz com os valores absolutos das taxas
ZLOG = ZABS; % Cria a base do mapa lógico
\\
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZABS(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca

```

**Figura 4.4:** Mapa Lógico do fio de Níquel, após suavização. Repare que o limiar entre ruído e sinal é menos abrupto.

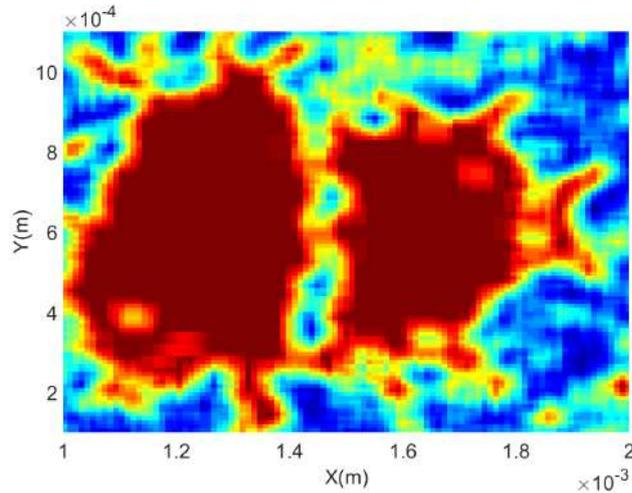


Imagem do autor.

```

for VarreduraColuna = NY:-1:1
    if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > Calibra*max(max(ZABS))
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 1;
    else
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
    end
end
end
\\
% Ao fim do algoritmo, temos uma matriz lógica de 0's e 1's, localizando as
% regiões com variação apreciável no gradiente.
\\
ZLOGF = filter2(Filtro,ZLOG); % Filtra o mapa lógico, utilizando os pontos
% próximos dos 1's também (Útil para manter o sinal, entretanto pode
% inserir ruído nos mapas.

```

### 4.1.3 Filtragem de Ruído

Com o intuito de diminuir os ruídos e melhorar os tratamentos, o algoritmo inicialmente escolhe uma linha de valores da matriz que forma o **Mapa Original**, identificada no código pela variável **OffsetI**, e a subtrai de todas as outras linhas do mapa, como pode ser visto no trecho abaixo:

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (PASSO 1) LÓGICA DE GRADIENTES %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
\\
OffsetI = Z(40,:); % Linha aleatória que será usada como offset para todo o mapa

```

```
ZT = Z - OffsetI; % Realiza o offset
ZBusca = ZLOGF;
```

É válido mencionar que o programa funciona com 2 métodos distintos. O primeiro método se utiliza de inserções manuais para a retirada da linha **OffsetI**. Isso mostra-se útil quando o algoritmo não é capaz de identificar, ou identifica erroneamente a melhor linha à ser retirada. O segundo método procura automaticamente pela linha, se utilizando apenas das informações colocadas sobre a amostra. O acesso a ambos pode ser especificado no início do programa.

Sabendo disto, utilizando o método automatizado e após realizar o offset inicial, o algoritmo entra num loop, avaliando o ponto a ponto de acordo com o **Mapa Lógico Suavizado**. Pontos identificados por valores diferentes de **0** são mantidos, enquanto pontos identificados por **0** tem seu valor guardado, para a realização de uma posterior média, mas são zerados no mapa atual.

Por fim, os valores guardados são utilizados para a realização de uma média, e o valor dessa média é alocado para todos os valores considerados como ruído no mapa lógico, como descrito no trecho abaixo:

```
ZRuido = zeros(NX,NY);
\\
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0 % Muda o valor para setar o limite de aquisição de dados
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
        else
            ZRuido(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
        end
    end
end
ZRuido = mean(mean(ZRuido));
\\
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZT == 0
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZRuido;
        else
            end
        end
    end
end
```

#### 4.1.4 Offset e Suavização Definitivos

Os mapas obtidos das medições muitas vezes possuem drifts ou rampas que podem alterar o valor da magnetização, inserindo erros. Tal problema é especialmente prejudicial em sensores muito sensíveis, como o STJ-010. Para tanto, o último passo do tratamento visa buscar dentro do mapa qual a melhor linha para realizar o offset definitivo. Tal processo inclui um auxílio visual, com o programa mostrando os offsets realizados, linha por linha, para o usuário, permitindo a identificação de problemas e tratamentos ruins

O passo em questão funciona em um loop, subtraindo as linhas no atual ciclo do mapa inteiro, similar ao processo realizado com a variável **OffsetI**. Entretanto, este loop tem o intuito de buscar por uma linha específica, que maximize o valor absoluto do pico identificado como sinal. Devido a sua grande importância para o trecho, é válido ressaltar as variáveis **Pré-Contraste**, **Contraste** e **ContrasteAtual**. A variável **Pré-Contraste** muda em cada ciclo, guardando a informação do ponto de máximo absoluto encontrado no mapa atual. A variável **Contraste** muda sempre que seu valor é superior à variável **Pré-Contraste**, ou seja, sempre que o loop encontra um valor de máximo absoluto maior que o ciclo anterior. Por fim, a variável **ContrasteAtual** guarda o índice da linha onde foi encontrado o maior máximo absoluto em todos os ciclos, servindo posteriormente para identificar qual a linha ideal para realizar o offset. Abaixo consta o trecho em questão:

```
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (PASSO 2) TRATAMENTO POR MAIOR PICO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\\
% O próximo algoritmo busca corrigir o drift, para tanto, ele subtrairá
% pela linha correspondente do teste. Um auxílio visual é apresentado para
% eventuais alterações caso o algoritmo não seja capaz de identificar o
% melhor tratamento
\\
Contraste=0;
ContrasteAtual=1;
\\
for B = 1:1:NX
    OffsetZ = Z(B,:);
    MediaLocal=mean(OffsetZ);
    ZT = Z - OffsetZ;
    ZT(1,:)=ZT(2,:);
    if PontoProblema == 1
        ZBusca = ZLOGF;
```

```

ZComp = ZT;
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0 % Varre cada célula do mapa lógico, setando quais valores são úteis
            ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
        else
            ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
        end
    end
end
ZComp(end,:)=0;
ZEscolhido = ZComp;
else
    ZEscolhido = ZT;
end
MaximoLocalZ = max(max(ZEscolhido));
PreContraste= abs(MaximoLocalZ);
if mean(ZLOGF(B:end-1,:)) > 0
else
    if PreContraste>Contraste
        Contraste = PreContraste;
        ContrasteAtual = B;
    end
end
end
\\
% Este trecho mostra, linha por linha, os mapeamentos com suas devidas
% correções. Útil para identificar qual a melhor linha para ser utilizada
% no algoritmo de correção.
\\
[XM,YM]=find(ZT==max(max(ZT)));
\\
% As duas linhas à seguir garantem que, no caso do mapa ter mais de um
% máximo, o algoritmo guardará o valor do primeiro.
\\
XM = XM(1,1);
YM = YM(1,1);
\\
end

```

Com o fim do tratamento de imagem, o **Mapa Tratado** pode ser visualizado em Fig. 4.5. Por razão de avaliação do quão fiel os gradientes se mantêm após o tratamento, como pode ser visto em Fig. 4.6.

#### 4.1.5 Fit e Obtenção de Magnetização

Com o mapa tratado, o objetivo do algoritmo é agora realizar um ajuste com o intuito de obter a magnetização da amostra em questão. O ajuste é feito por um modelo de cilindro de correntes, e para tanto, o programa requer a inserção de características da amostra, como diâmetro e profundidade do porta amostras, densidade do material no porta amostra, e um "chute" de

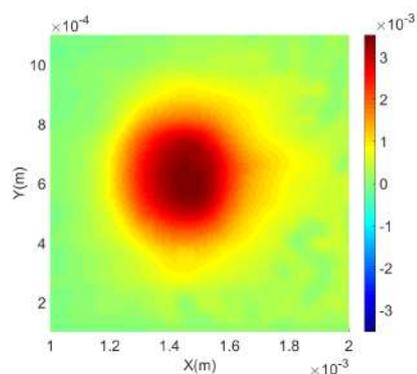
**Figura 4.5:** Mapa Tratado e Filtrado do fio de Níquel.

Imagem do autor.

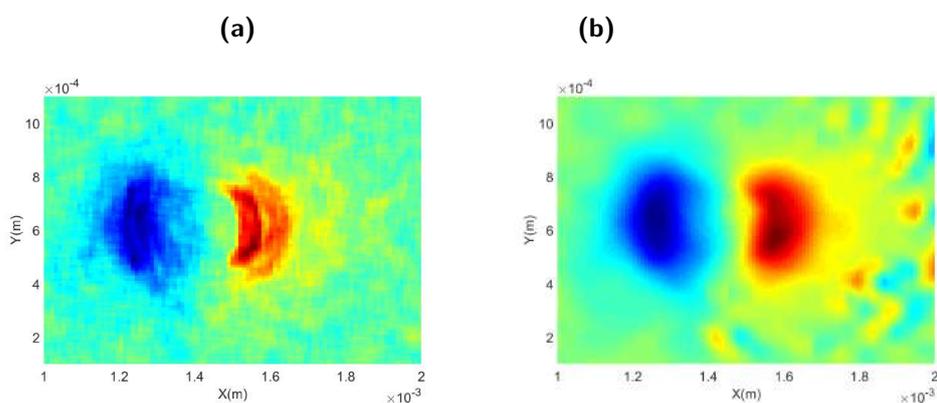
**Figura 4.6:** Comparativo entre os gradientes do (a) mapa antes do tratamento e (b) mapa depois do tratamento, para o fio de Níquel.

Imagem do autor.

momento magnético da amostra em questão (é útil aproximar o chute de um valor esperado, salvando tempo de computação e agilizando o processo de ajuste) [Araujo, Bruno e Carvalho 2010].

O processo pode ser dividido em três partes, onde primeiramente o algoritmo busca pela linha que contém o maior pico absoluto no mapa, e cria uma janela de análise em volta desta linha. Ele então realiza um loop para encontrar inicialmente o momento magnético, e portanto a magnetização, da amostra em questão, como pode ser visualizado no trecho abaixo, e na Figura 4.7:

**Figura 4.7:** Tentativa de Fit do fio de Níquel, ajustado aos dados experimentais, na janela em volta do pico.

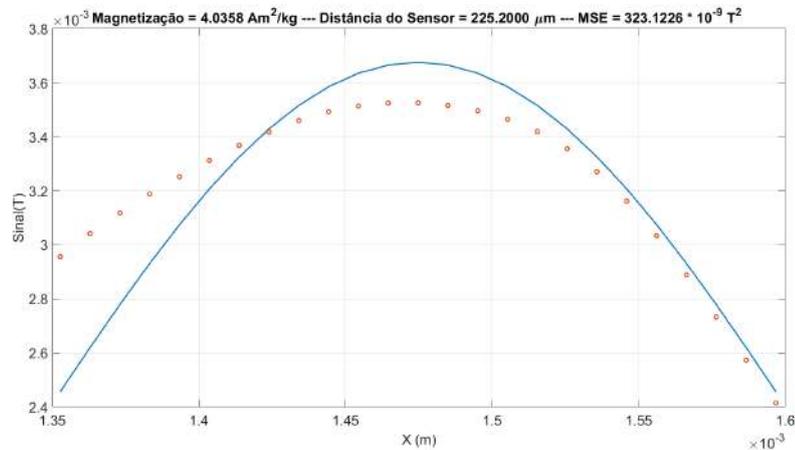


Imagem do autor.

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO TEÓRICO (FIT DE MOMENTO MAGNÉTICO) %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

\\
ErroMedioMinimo=1e6;
Condicional = 1;
ErroMedio = 1e5;
\\
% Este trecho visa definir a "direção" de aproximação do momento
% magnético. Caso o algoritmo identifique um aumento de erro no ciclo
% seguinte, a variação de momento magnético vira para o sentido oposto
% ao atual.
for i=1:1:5
    DeltaMomMag = 0.001*MomentoMagnetico;
    MomentoMagnetico = MomentoMagnetico + Condicional*DeltaMomMag;
    Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)
    Biot = zeros(NX,1);
    for i=1:1:NX
        x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida));
        FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
        Biot(i,1) = Magnetizacao*integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura)*1e-2; % Resultado em mT
    end
    ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
    if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
        MomMagmin = MomentoMagnetico;
        Magmin = Magnetizacao;
    else
        Condicional = -1* Condicional;
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
    end
end
end
\\
% O condicional muda de valor, entre positivo e negativo, sempre que
% detecta um aumento de erro no fit, garantindo que os valores sempre
% variem em direção ao menor erro
\\

```

```

ErroMedioMinimo=1e6;
ErroMedio = 1e5;
GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
\\
while GatilhoErro>0
    DeltaMomMag = 0.001*MomentoMagnetico;
    MomentoMagnetico = MomentoMagnetico + Condicional*DeltaMomMag;
    Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)
    Biot = zeros(NX,1);
    for i=1:1:NX
        x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida));
        FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
        Biot (i,1) = Magnetizacao*integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura)*1e-2; % Resultado em mT
    end
end
\\
% calcula o erro medio quadratico
ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
    ErroMedioMinimo = ErroMedio;
    MomMagmin = MomentoMagnetico;
    Magmin = Magnetizacao;
end
end
Magnetizacao = Magmin;
\\

```

O fit em questão trata-se de um modelo de cilindro de correntes por Biot-Savart, apresentada na Eq. 4.1.5:

$$B(x, y, z) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{\text{circuito}} \frac{Idl \times r'}{r'^3}$$

Onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo,  $I$  é a corrente no cilindro de corrente modelado, e  $r'$  é o vetor posição do ponto de medição do campo em relação ao cilindro. Desenvolvendo este termo adequadamente para a geometria do sistema em questão, obteremos, como demonstrado na Figura 4.1

$$B_z(x', y', z') = \frac{\mu_0 I}{4\pi l} \left|_{-l/2}^{l/2} \cdot \int_0^{2\pi} \frac{R(R - x \cos(\phi))}{[(x - R \cos(\phi))^2 + (R \sin(\phi))^2 + (\text{DistanciaSensor} - h)^2]^{3/2}} d\phi \right. \quad (4.1)$$

Onde  $R$  trata-se do raio da cavidade cilíndrica, com  $x$  modelando um dos eixos no plano XY,  $l$  é a altura da cavidade cilíndrica,  $\phi$  trata-se do

ângulo no plano XY, **DistanciaSensor** é literalmente a distância do sensor ao topo da amostra, e **h** é a variável que modela o eixo perpendicular ao plano XY.

O processo de fit consiste em 2 etapas feitas em loop, onde inicialmente se utiliza o "chute" de momento magnético inicial para tentar modelar a distância do sensor, e posteriormente é feito o mesmo processo para modelar o momento magnético, e por fim, a magnetização. Em cada ciclo, o valor do parâmetro procurado é alterado e é calculado um erro quadrático médio entre o modelo e os valores obtidos experimentalmente, numa janela próxima ao pico da curva. Ao atingir o valor que minimiza o erro quadrático médio, o algoritmo guarda o valor do parâmetro como definitivo.

**Figura 4.8:** Perfil da linha de máximo, pontilhado, com o perfil do modelo, para o fio de Níquel.

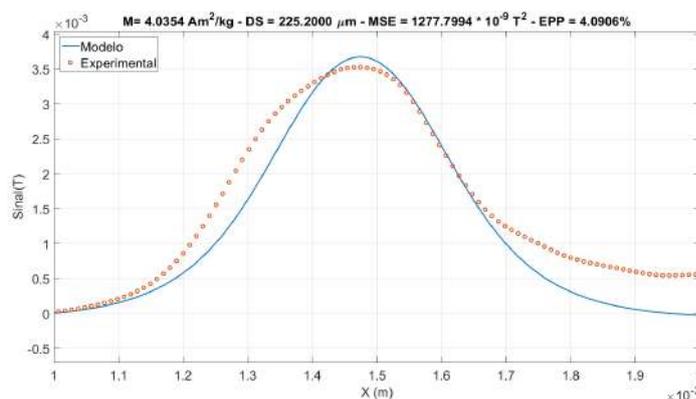


Imagem do autor.

Por fim, como mostrado na Figura 4.8, são apresentadas todas as informações obtidas, além de um ajuste para toda a curva selecionada e uma curva de resíduos, apresentada na Figura 4.9.

**É importante ressaltar que o processo comparativo é feito somente numa pequena janela próxima ao valor de máximo encontrado no mapa; o intuito é diminuir o efeito adverso que as suavizações podem ter sob o modelo.**

**Figura 4.9:** Curva de resíduos entre o fit e os dados experimentais, para o Fio de Níquel.

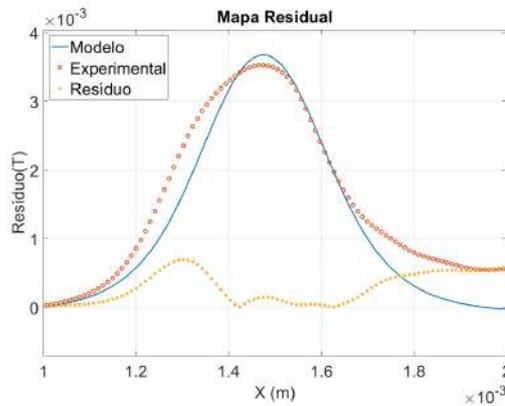


Imagem do autor.

## 4.2 Análises

Para uma avaliação do funcionamento do MMV, foram escolhidas 3 amostras de calibração: um porta amostra com 2 poços de  $200 \mu\text{m}$  de raio por  $100 \mu\text{m}$  de profundidade aproximadamente, preenchidos com um pó de óxido de ferro, ou "ferrugem", identificado por **Óxido de Ferro Duplo (OD)**, na Figura 4.10.a; porta amostra com três poços, em disposição triangular, com  $200 \mu\text{m}$  de raio por  $400 \mu\text{m}$  de profundidade, separados de cerca de  $900 \mu\text{m}$  quando mais próximos, e  $1300 \mu\text{m}$  quando mais distantes, preenchidos por magnetita, identificada por **Magnetita Tripla (MT)**, na Figura 4.10.b; um porta amostra preenchido com um fio de Níquel, de dimensões  $125 \mu\text{m}$  de raio por  $480 \mu\text{m}$  de altura, identificada por **Amostra Ni (AN)**, apresentada na Figura 4.11.a.

Além disto, para testar as capacidades do MMV, foi feito o estudo de uma rocha do aglomerado de diques basálticos do Jurássico-Triássico, extraída da borda oeste da bacia do parnaíba, identificada por **Amostra Rocha (AR)**, apresentada na Figura 4.11.b.

Sobre as amostras, informações relevantes a serem dadas são: a amostra OD foi preparada utilizando pó de óxido de ferro, identificado como **Supermagna RW 222** da empresa **Metal-Chek**, supondo se tratar de magnetita 96 %; a amostra MT se tratam de micropartículas magnéticas de magnetita 99 % ; A

**Figura 4.10:** Porta amostras com régua, apresentando (a) Óxido de Ferro Duplo (OD) e (b) Magnetita Tripla (MT).

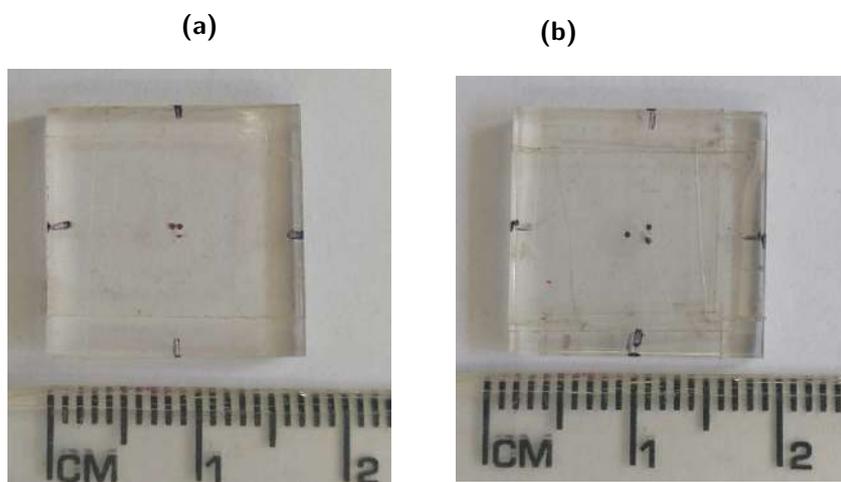


Imagem do autor.

**Figura 4.11:** Porta amostras com régua, apresentando (a) Amostra Ni (AN) e (b) Amostra de Rocha (AR).

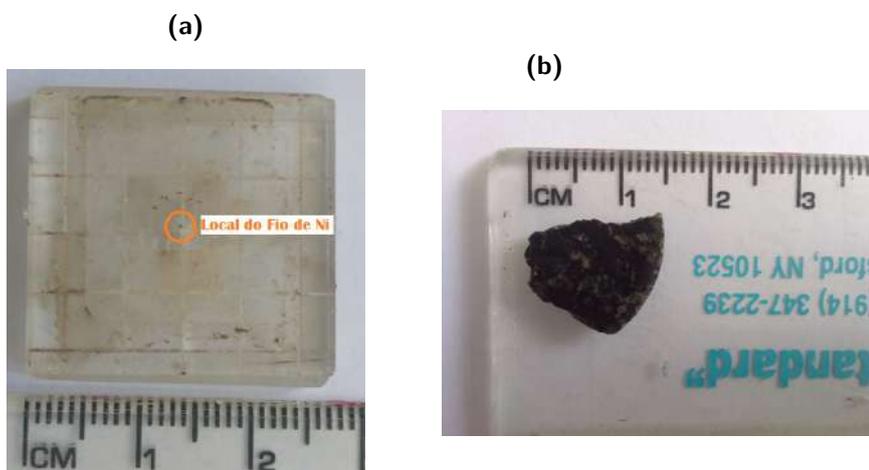


Imagem do autor.

amostra AN se trata de um fio de Níquel com 99,9 % de pureza, inclusive usado previamente em outros trabalhos para calibração [Araujo et al. 2023].

Todas as amostras, excetuando-se a AR (por motivos posteriormente discutidos), foram utilizadas para medidas de teste do equipamento, com análise pelo programa **Mapeador**, sendo os resultados obtidos comparados com medidas feitas por *Vibrating-Sample Magnetometer (VSM)* e também por um MMV de posse do grupo de pesquisa no qual este trabalho foi desenvolvido.

### 4.2.1 Óxido de Ferro Duplo (OD) com MMVH

Na Figura 4.12 é apresentado o Mapa Original e o Mapa de Gradientes da amostra OD, utilizando o microscópio na configuração com sensor HQ-0811. Para o tratamento em questão foram usados:

- **Calibra**= 0.08
- **Recalibra**= 0.10
- **Janela**= 3

**Figura 4.12:** Mapas do tratamento da amostra OD com sensor HQ-0811 demonstrando: **(a)** Mapa Original, sem tratamento e **(b)** Mapa de Gradientes.

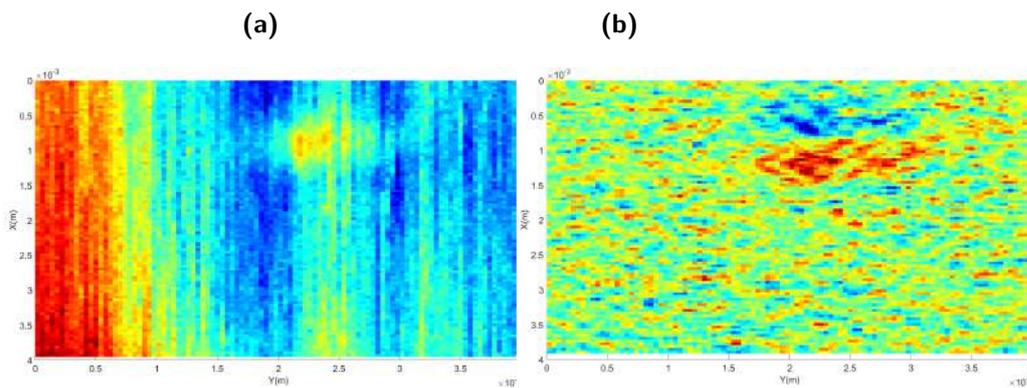


Imagem do autor.

Um dos primeiros pontos a serem considerados é que a amostra OD possui uma pequena mancha de pó de ferrugem, decorrente do preparo da mesma, e cuja detecção não é clara mediante o ruído observado. Tal mancha é perceptível na foto da OD da Figura 4.10, um pouco abaixo relativamente aos dois poços preenchidos. Na Figura 4.13 é apresentado o resultado final do tratamento da amostra OD.

É possível ver que o tratamento chega a distinguir o sinal dos dois poços, apesar de ainda haver superposição do sinal entre eles. Outro ponto a ser considerado é que o sensor não foi capaz de diferenciar a mancha anteriormente mencionada do ruído de fundo.

Com o mapa em mãos, foi então feito o ajuste de acordo com o modelo teórico, sendo a linha avaliada colhida ao longo do eixo **Y**, passando pelo pico

**Figura 4.13:** Caracterizações da linha com pico máximo do mapa da amostra OD, obtida de sensor HQ-0811.

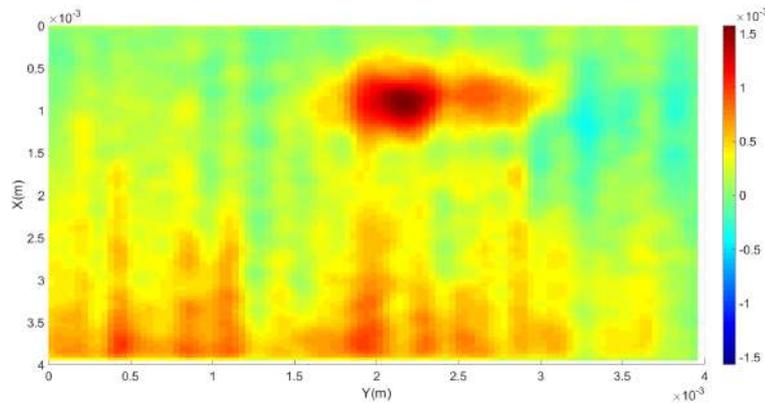


Imagem do autor.

de detecção. Foi encontrado que a altura média do sensor em relação à parte superior do porta-amostra era de cerca de  $149,4 \mu\text{m}$ , sendo condizente com o esperado para o layout em questão (as medições sempre são feitas com o sensor "encostando" na amostra). Além disso, foi encontrada uma magnetização de remanência de aproximadamente  $6,40 \text{ A m}^2/\text{kg}$ , com um erro percentual entre os picos teórico e experimental de cerca de  $10 \%$ .

**Figura 4.14:** Caracterizações da linha com pico máximo do mapa da amostra OD, obtida de sensor HQ-0811.

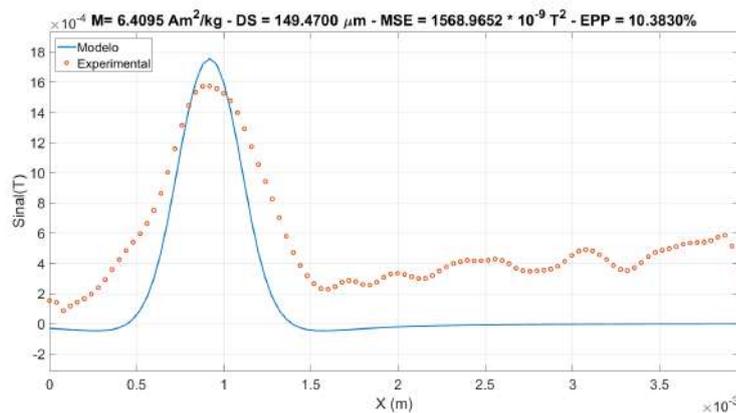


Imagem do autor.

Na Figura 4.14 é apresentado o comparativo do *Fit* teórico com os resultados experimentais, onde **M** se trata da Magnetização, **DS** é a Distância do Sensor, **MSE** é o Erro Quadrático Médio (*Mean Square Error*), e **EPP** é o Erro Percentual do Pico. Uma das características perceptíveis no fit é o

quão alargado o sinal aparenta em relação ao modelo. Entre as supostas razões para isso, está o fato da RM do sensor permitir "vazamentos" de sinal de sítios próximos, a diferença substancial entre a RM do sensor ( $200 \mu\text{m}$ ) e a RE dos posicionadores ( $40 \mu\text{m}$ ), e o processo de suavização realizado previamente no tratamento de imagem, o qual diminui os gradientes de sinal, alargando medidas e abrandando/diminuindo picos.

### 4.2.2 Óxido de Ferro Duplo (OD) com MMVM

Devido à peculiaridades nas medidas realizadas com MMVM, optou-se por apresentar medidas auxiliares, por motivos de comparação. Na Figura 4.15 são apresentados o Mapa Original e o Mapa de Gradientes da amostra OD, utilizando o microscópio na configuração com sensor STJ-010. Para o tratamento em questão foram usados:

- **Calibra**= 0.08
- **Recalibra**= 0.10
- **Janela**= 3

**Figura 4.15:** Mapas do tratamento da medida 1 da amostra OD com sensor STJ-010 demonstrando: **(a)** Mapa Original, sem tratamento e **(b)** Mapa de Gradientes.

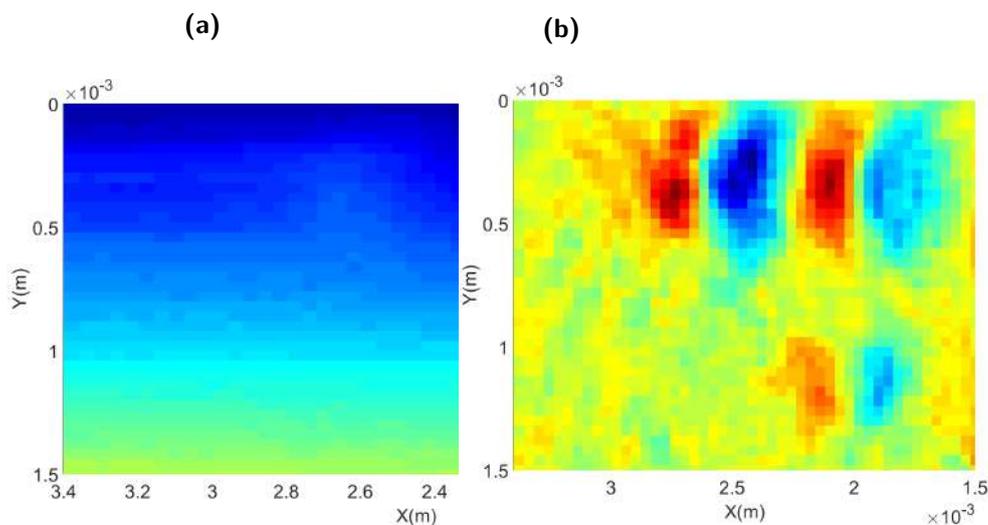


Imagem do autor.

Vale notar que, observando Figura 4.15.a, muito pouco pode ser discernido entre sinal e ruído. Entretanto, apesar de uma análise visual inicial não mostrar nenhum detalhe relevante, uma análise do Mapa de Gradientes da Figura 4.15.b mostra que existem pontos no Mapa Original que não condizem com gradientes esperados de ruído.

**Figura 4.16:** Mapa Tratado da medida 1 da amostra OD, obtida de sensor STJ-010.

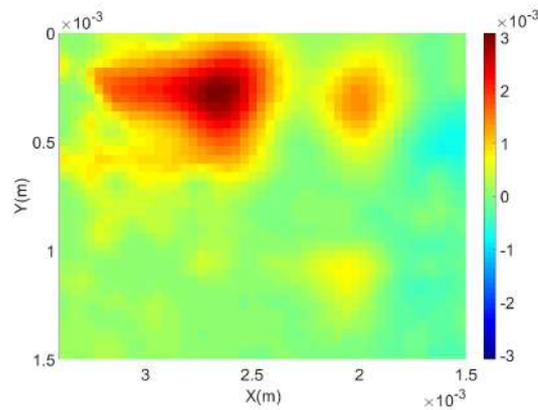


Imagem do autor.

No Mapa Tratado e Filtrado da Figura 4.16 é possível perceber que a resolução magnética do STJ-010 aparenta ser bem melhor e menos ruidosa que a obtida com o sensor HQ-0811. Além disto, como é possível perceber, o STJ foi capaz de captar o sinal gerado pela mancha de ferrugem do porta amostra, o discernindo do ruído de fundo.

Entretanto, é possível perceber uma distensão lateral de sinal, similar a um "arrasto", sendo tal efeito observado com frequência nas medidas utilizando STJ-010. No Mapa de Gradientes é possível identificar que o arrasto trata-se de um erro.

Por parâmetro comparativo, na Figura 4.17 pode ser observado uma medida similar, onde novamente o Mapa Original não possui detalhes suficientes para distinguir sinal de ruído, e no Mapa de Gradientes é visível que os sinais dos dois poços, além do sinal da mancha, podem ser observados. O Mapa Tratado e Filtrado é apresentado na Figura 4.18.

Após o tratamento de imagem realizado nos dados, a comparação do modelo com os dados experimentais pode ser observada na figura 4.19.

**Figura 4.17:** Mapas do tratamento da medida 2 da amostra OD com sensor STJ-010, feito para comparação, demonstrando: **(a)** Mapa Original, sem tratamento e **(b)** Mapa de Gradientes.

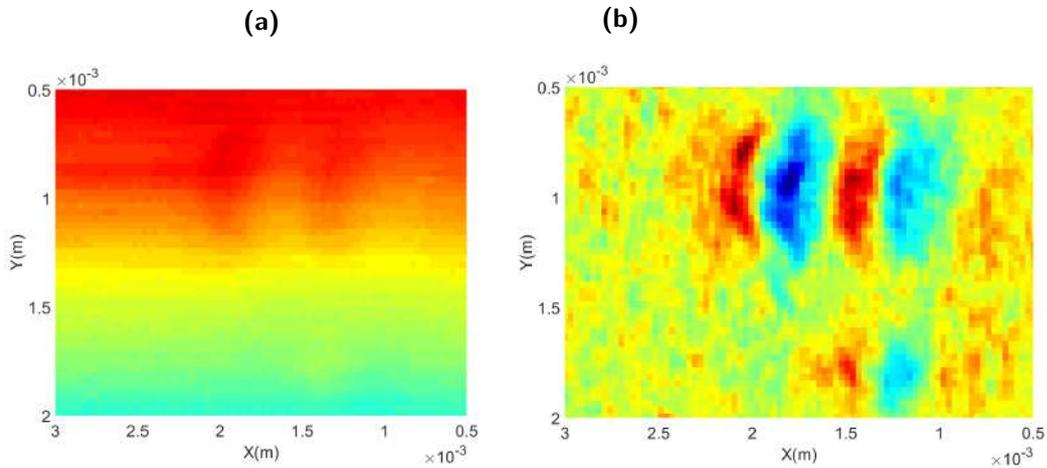


Imagem do autor.

**Figura 4.18:** Mapa Tratado da medida 2 da amostra OD, obtida de sensor STJ-010.

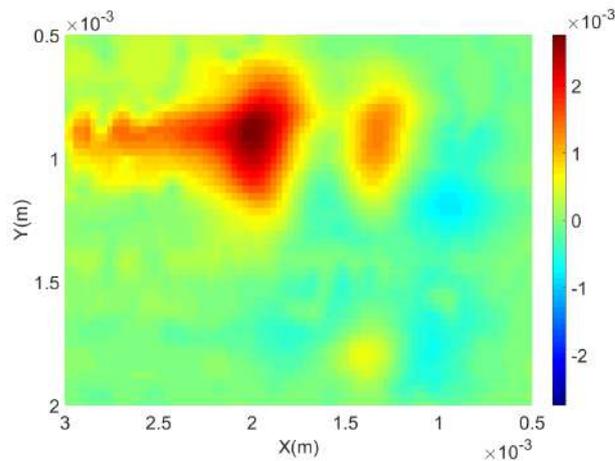


Imagem do autor.

Dos ajustes foi extraído que a distância média da área sensível do sensor STJ-010 se situa entre  $63 \mu\text{m}$ , para a Figura 4.19.a, e  $80 \mu\text{m}$  da amostra, para a Figura 4.19.b, o colocando um pouco mais próximo da amostra relativamente que o sensor HQ-0811. É suposto que tal observação se deve ao encapsulamento do sensor HQ-0811, que distancia a área de detecção do sensor da amostra, enquanto o sensor STJ-010 não possui tal encapsulamento. Além disto, as magnetizações obtidas dos mapas foram de cerca de  $6,41 \text{ A m}^2/\text{kg}$  para a Figura 4.19.a e  $6,40 \text{ A m}^2/\text{kg}$  para a Figura 4.19.b, estando próximas aos resultados

**Figura 4.19:** Fits entre modelo e dados experimentais da amostra OD, obtida de sensor STJ-010.

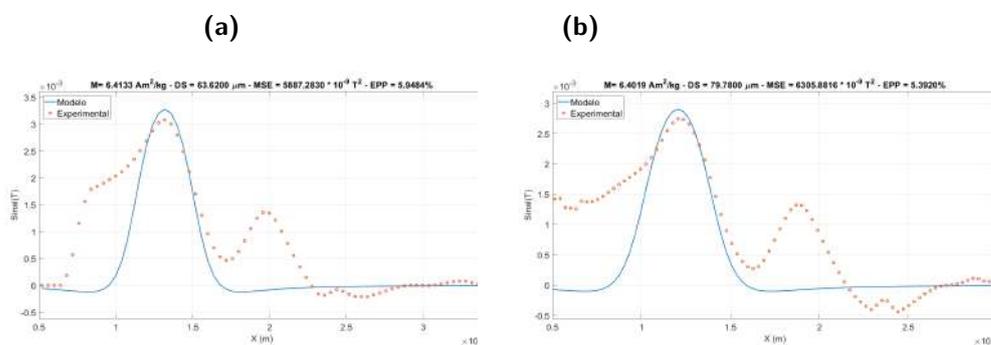


Imagem do autor.

obtidos pelo sensor HQ-0811 para a amostra OD. Foram calculados os erros relativos entre o pico dos dados e o pico do fit, fazendo-se uma razão entre os valores, onde foi obtido 5,9 % e 5,4 %, respectivamente.

### 4.2.3 Magnetita Tripla (MT) com MMVH

Na Figura 4.20 é apresentado o Mapa Original da amostra MT, utilizando o microscópio na configuração com sensor HQ-0811. Para o tratamento da Figura 4.20, foi usado:

- **Calibra**= 0.08
- **Recalibra**= 0.10
- **Janela**= 3

É possível notar na Figura 4.20 que o mapa apresenta ruídos consideráveis. Para tornar possível a extração de informações, é feito o tratamento produzindo um Mapa de Gradientes, demonstrado na Figura 4.21.

Na Figura 4.21 é possível perceber que os gradientes no poço isolado, à esquerda da amostra, são mais expressivos, dando um indício da região que será utilizada para a obtenção da magnetização.

**Figura 4.20:** Mapa Original da amostra MT coletado com o sensor HQ-0811.

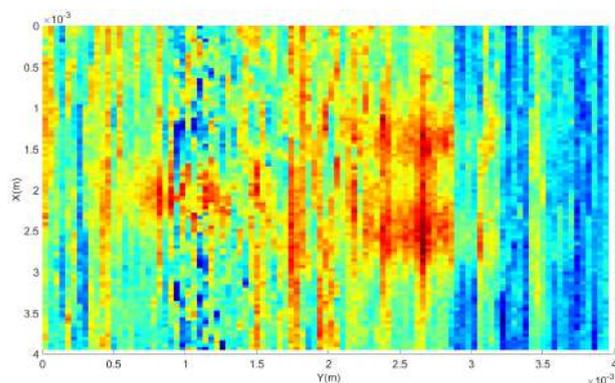


Imagem do autor.

**Figura 4.21:** Mapas de Gradientes da amostra MT coletados com o sensor HQ-0811.

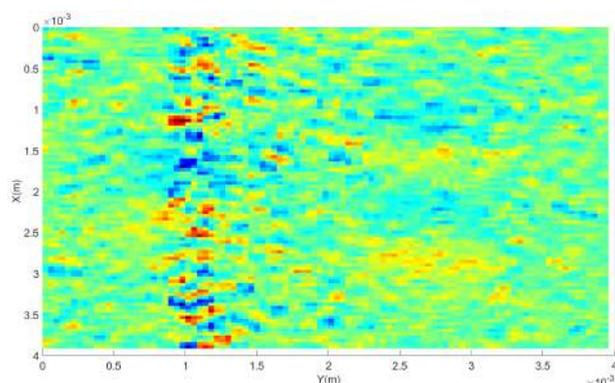


Imagem do autor.

Como pode ser percebido na Figura 4.22.a, o tratamento não foi totalmente efetivo. Os altos ruídos permanentes no Mapa Original foram amenizados, porém não extinguidos.

Por fim, dos Fits, como pode ser visto na Figura 4.22.b, extraímos a distância do sensor e a magnetização, sendo estas  $107 \mu m$  e  $6,25 A m^2/kg$ , respectivamente.

#### 4.2.4 Magnetita Tripla (MT) com MMVM

Na Figura 4.23 são apresentados os Mapas Originais da amostra MT, utilizando o microscópio na configuração com sensor STJ-010. Para o tratamento

**Figura 4.22:** (a) Mapa Tratado e (b) Fit teórico da amostra MT coletados com o sensor HQ-0811.

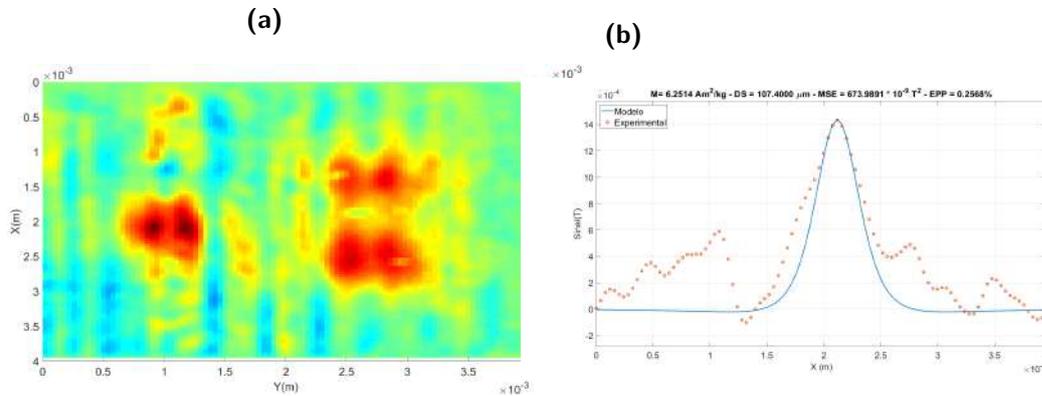


Imagem do autor.

em questão foram usados:

- **Calibra**= 0.08
- **Recalibra**= 0.10
- **Janela**= 3

**Figura 4.23:** Mapas Originais da amostra MT coletados com o sensor STJ-010.

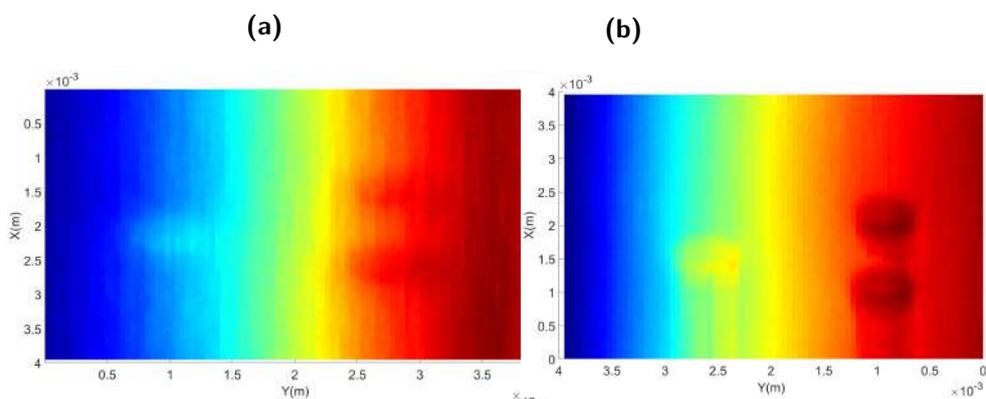


Imagem do autor.

É possível perceber que os Mapas Originais apresentados na Figura 4.23 possuem um gradiente lateral de campo, observado anteriormente nas medidas com amostra OD (Vide Figura 4.15 e 4.17). Devido à problemas na aquisição de medidas, antes de ser realizada a medida 4.23.b, a amostra MT foi remagnetizada,

**Figura 4.24:** Mapas de Gradientes da amostra MT coletados com o sensor STJ-010.

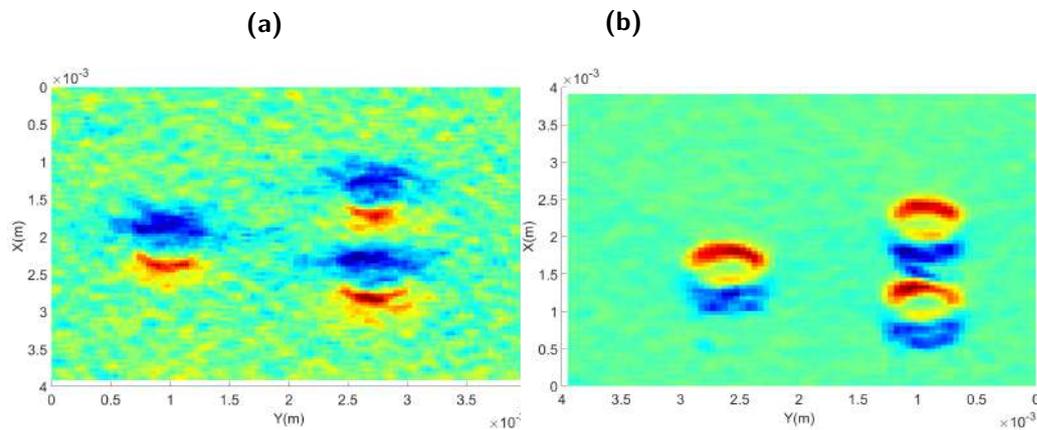


Imagem do autor.

aplicando um campo de 1T inicialmente, sendo este gradativamente reduzido à zero.

Novamente, é fácil notar que os Mapas de Gradientes são eficientes em identificar as regiões com campo no mapa, diferenciando estas do ruído de fundo, como pode ser observado na Figura 4.24. Além disso, como pode ser observado na figura 4.24.b, a remagnetização da amostra anterior à medida é eficiente na melhoria do sinal e suavização dos ruídos de fundo.

**Figura 4.25:** Mapas Tratados e Filtrados da amostra MT coletados com o sensor STJ-010.

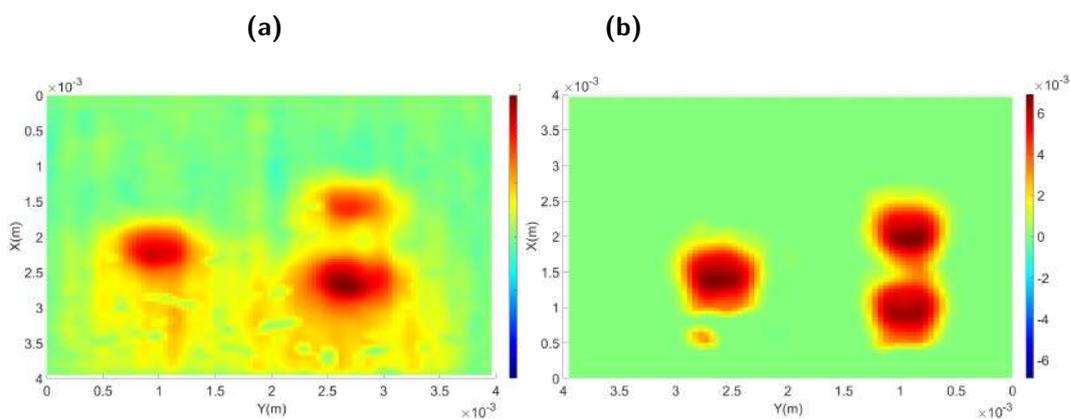


Imagem do autor.

Por fim, percebe-se a diferença na nitidez do sinal entre as amostras da Figura 4.25.a e 4.25.b, muito possivelmente devido à remagnetização. Na Figura

4.25.a é visível que o tratamento promove buracos nas regiões em torno dos picos, mas ainda os mantém nítidos.

**Figura 4.26:** Fits entre modelo e dados experimentais dos mapas da amostra MT com sensor STJ-010.

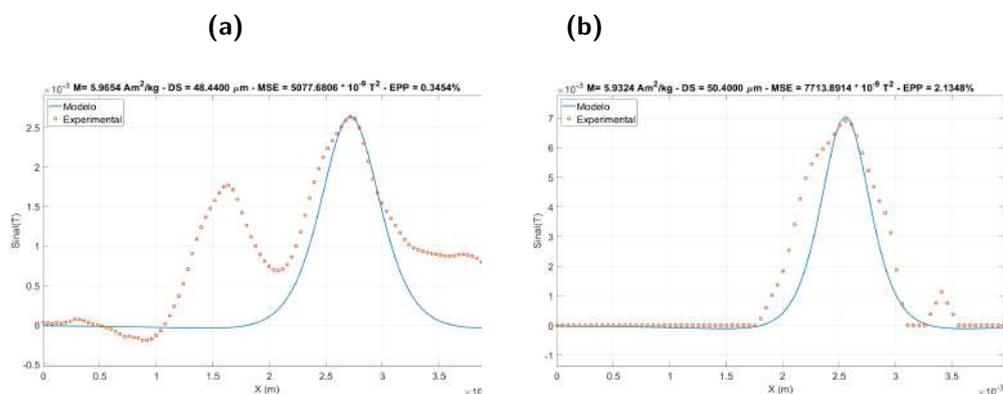


Imagem do autor.

Nos modelos da Figura 4.26, pode ser percebido que as magnetizações obtidas diferem daquelas obtidas pelo sensor HQ-0811. Na Figura 4.26.a, a magnetização obtida foi de  $5,96 \text{ A m}^2/\text{kg}$  enquanto na Figura 4.26.b, a magnetização foi de  $5,93 \text{ A m}^2/\text{kg}$ . É interessante notar que os trechos fitados são de regiões diferentes do mapa, com a Figura 4.26.a localizando o ponto de maior pico próximo aos dois poços do porta amostra, enquanto a Figura 4.26.b o localiza no poço isolado à esquerda do porta amostra. As distâncias condizem com o esperado para o STJ-010, sendo estimadas em  $48,4 \text{ } \mu\text{m}$  e  $50,4 \text{ } \mu\text{m}$ , respectivamente.

#### 4.2.5 Amostra Níquel (AN) com MMVH

Na Figura 4.27 é apresentado o Mapa Original e o Mapa de Gradientes da amostra AN, utilizando o microscópio na configuração com sensor HQ-0811. Para o tratamento em questão foram usados:

- **Calibra**= 0.08
- **Recalibra**= 0.10
- **Janela**= 3

**Figura 4.27:** (a) Mapa Original e (b) Mapa de Gradientes da amostra AN coletado com o sensor HQ-0811.

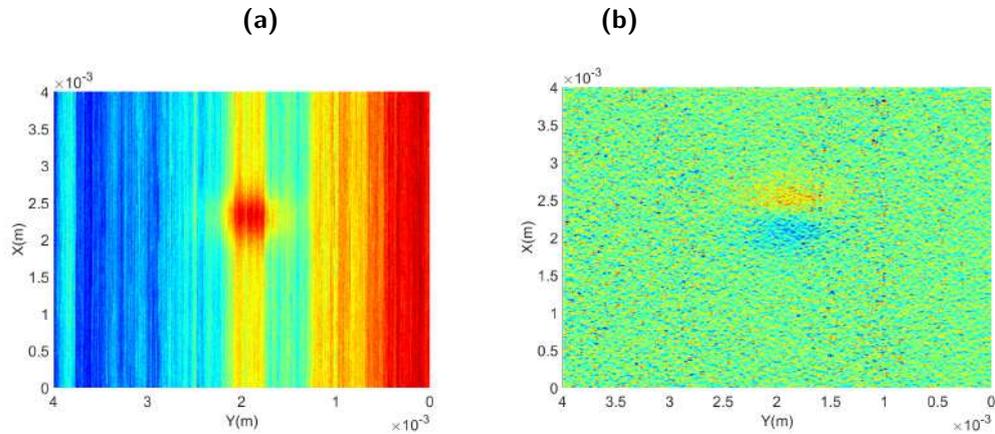


Imagem do autor.

Pode-se perceber na Figura 4.27.a um visível arrasto, provavelmente decorrente do sensor "arranhar" fisicamente a amostra. Tal fator se mostra então um teste conveniente para comprovar a capacidade do tratamento. Na Figura 4.27.b, é apresentado o Mapa de Gradientes da amostra AN. É notável que os gradientes no mapa não são muito substanciais, o que levaria a pensar que poderia haver perda de qualidade no tratamento.

**Figura 4.28:** (a) Mapa Tratado e (b) Fit Teórico da amostra AN coletado com o sensor HQ-0811.

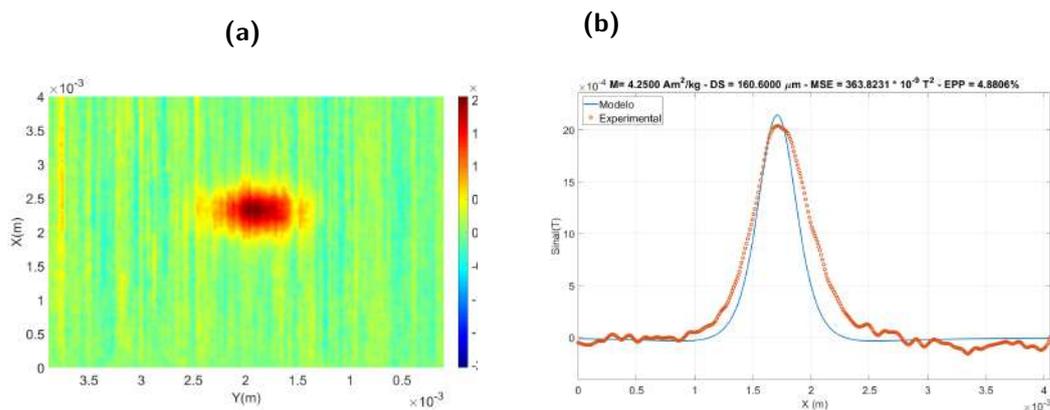


Imagem do autor.

Entretanto, como demonstrado no mapa da Figura 4.28.a, os gradientes apresentados são suficientes para diferenciar o pico do ruído de fundo. A forma do mapa é próxima do que seria esperado, apesar de uma alongação aparente.

Por fim, como demonstrado no fit do modelo aos dados experimentais da Figura 4.28.b, foram obtidos resultados para a magnetização de remanência e a distância de  $4,25 \text{ A m}^2/\text{kg}$  e  $160,6 \mu\text{m}$ , respectivamente.

#### 4.2.6 Amostra Níquel (AN) com MMVM

Na Figura 4.29 são apresentados os Mapas Originais da amostra AN, utilizando o microscópio na configuração com sensor STJ-010. Para o tratamento em questão foram usados:

- **Calibra**= 0.02
- **Recalibra**= 0.05
- **Janela**= 4

**Figura 4.29:** Mapas Originais da amostra AN com sensor STJ-010.

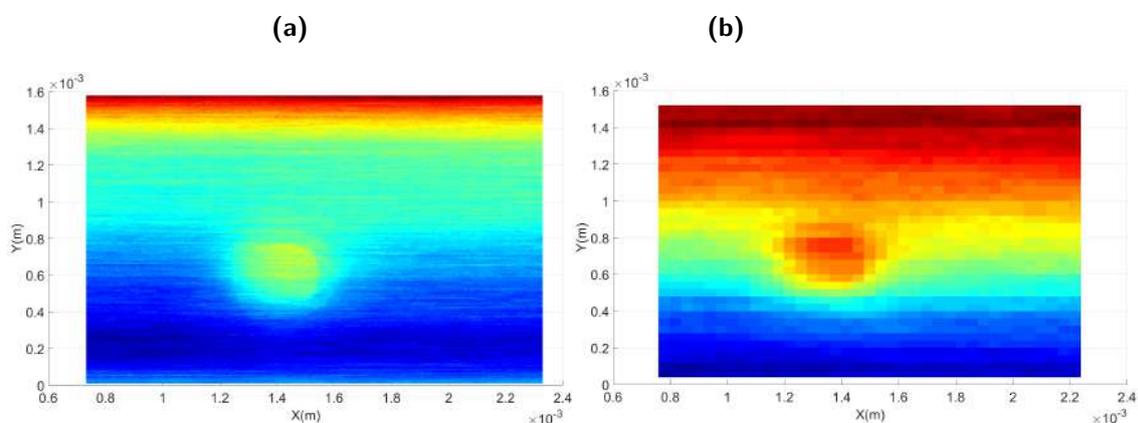


Imagem do autor.

O primeiro ponto a ser ressaltado é a diferença entre as RE's das medidas, com a medida apresentada na Figura 4.29.a tendo RE de  $10 \mu\text{m}$ , enquanto a Figura 4.29.b tendo RE de  $40 \mu\text{m}$ . Posteriormente, os mapas de gradientes são apresentados na Figura 4.30, identificando claramente os picos de sinal na amostra.

Por fim, na Figura 4.31, são apresentados os mapas finais obtidos pós-tratamento. É notável que, em ambas as medidas, os mapas finais obtidos são

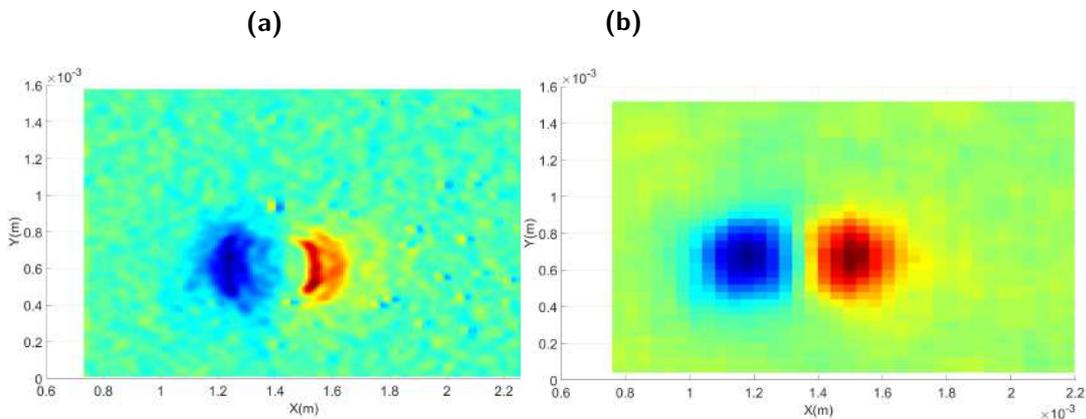
**Figura 4.30:** Mapas de Gradientes da amostra AN coletados com o sensor STJ-010.

Imagem do autor.

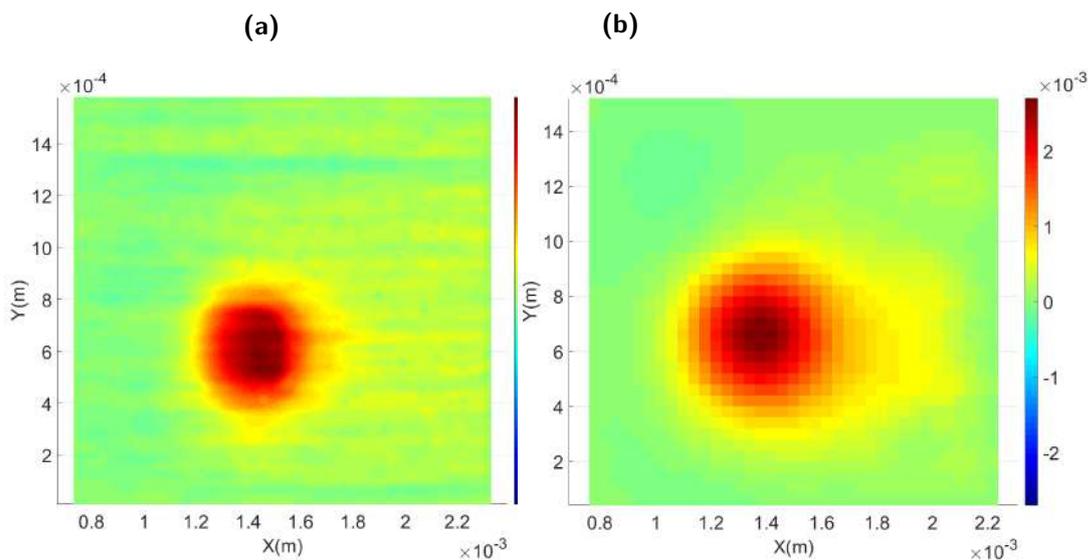
**Figura 4.31:** Mapas Tratados e Filtrados da amostra MT coletados com o sensor STJ-010.

Imagem do autor.

bem mais claros que os apresentados na Figura 4.28.a. É também possível notar um leve arrasto à direita dos picos, um efeito observado com frequência nas medidas feitas com o sensor STJ-010.

Finalmente, são apresentados na Figura 4.32, os comparativos entre o resultado experimental e o obtido pelo modelo. Vale atentar-se à distância obtida à partir do modelo, de cerca de  $229,0 \mu\text{m}$  para o mapa da Figura 4.31.a, e de  $194,8 \mu\text{m}$  para o mapa da Figura 4.31.b. Supomos que isto se deve ao posicionamento manual do sensor anterior às medições, e que como foi observado

**Figura 4.32:** Fits entre modelo e dados experimentais dos mapas da amostra MT com sensor STJ-010.

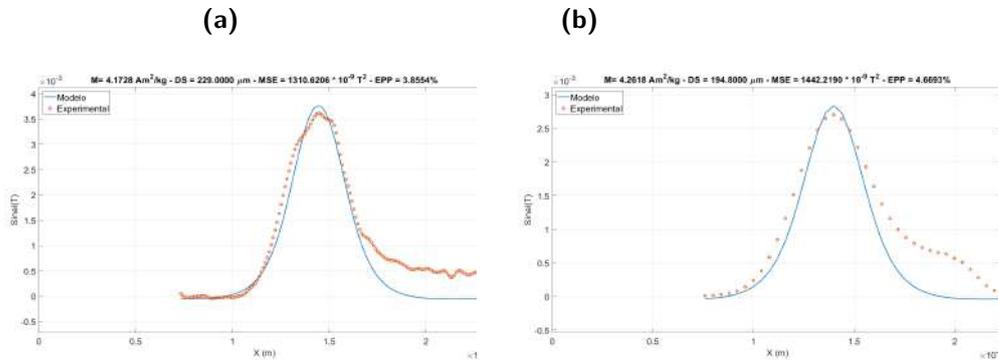


Imagem do autor.

anteriormente, quando muito próximo da amostra o sensor a "arranha", gerando um arrasto substancial nos mapas, sendo então tomadas precauções para evitar que o sensor "toque" a amostra. Além disto, foram obtidas magnetizações de  $4,17 \text{ A m}^2/\text{kg}$  e  $4,26 \text{ A m}^2/\text{kg}$ .

#### 4.2.7 Caracterização das Amostra OD e MT

Supondo que a amostra OD e MT tratam-se de magnetita, foi utilizado um estudo das curvas de magnetização da magnetita, feito com VSM, como controle. A curva obtida é apresentada na Figura 4.33.

**Figura 4.33:** Curva de magnetização obtida por VSM da magnetita utilizada, próxima à região de campo 0.

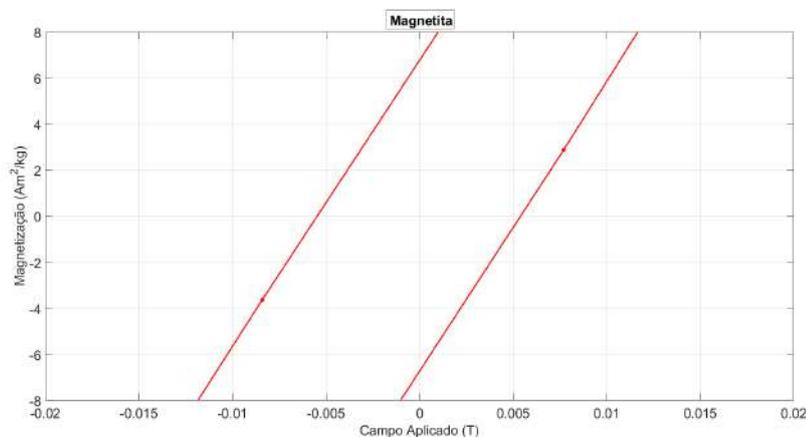


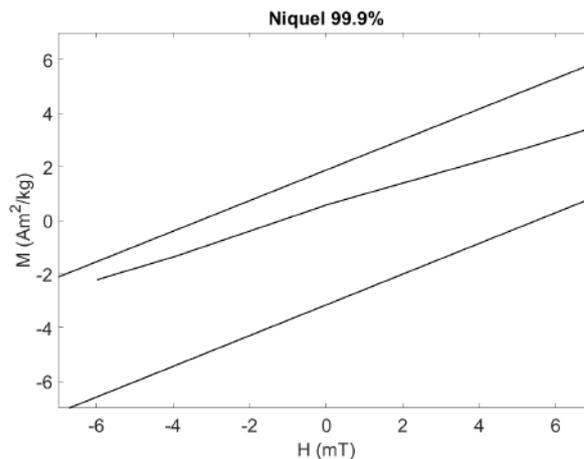
Imagem do autor

Pode ser observado que o valor médio oscila entre  $6,3 \text{ A m}^2/\text{kg}$  e  $6,8 \text{ A m}^2/\text{kg}$ . Para tanto, por razões de comparação, é útil definir o Valor de Magnetização Esperado (VE), como sendo de cerca de  $6,55 \text{ A m}^2/\text{kg}$  para a magnetita.

#### 4.2.8 Caracterização da Amostra AN

De forma equivalente, foi feito um estudo da curva de magnetização do Fio de Ni 99,9 %, utilizando um VSM. Na Figura 4.34 são apresentadas as curvas de magnetização, com posterior zoom na região de campo 0.

**Figura 4.34:** Curva de magnetização obtida por VSM do Fio de Níquel utilizado, próxima à região de campo 0.



Um fato que pode ser imediatamente notado no gráfico da Figura 4.34.b, é a falta de simetria entre a parte positiva e a negativa da curva. É estimado que as magnetizações à campo zero encontradas sejam aproximadamente  $1,9 \text{ A m}^2/\text{kg}$  e  $3,2 \text{ A m}^2/\text{kg}$ . A discrepância entre os resultados pode ter sido ocasionada por diversos fatores, como a não desmagnetização dos polos do VSM pré-medição, ou uma má calibração do equipamento. Entretanto, devido à falta de informações na literatura sobre a remanência deste tipo de amostra, tal dado será utilizado para o comparativo. Para tanto, por razões de imparcialidade, o valor de magnetização utilizado foi equivalente à média dos dois obtidos, sendo  $2,55 \text{ A m}^2/\text{kg}$ .

### 4.3 Comparativo

Na Tabela 4.1 são apresentados os Valores de Magnetização Obtida (VM), os Valores de Magnetização Esperados (VE) e os Erros Percentuais (EP) entre estes, para cada amostra utilizada.

**Tabela 4.1:** Tabela comparativa entre os valores de Magnetização esperados e obtidos para cada amostra analisada, além de seus respectivos erros.

Amostras	VM (A m <sup>2</sup> /kg)	VE (A m <sup>2</sup> /kg)	EP (%)
OD (HQ-0811)	6,40	6,55	3,3 %
<b>OD1 (STJ-010)</b>	6,40	6,55	2,2 %
<b>OD2 (STJ-010)</b>	6,41	6,55	2,1 %
MT1 (HQ-0811)	6,25	6,55	4,5 %
MT2 (HQ-0811)	6,77	6,55	3,3 %
<b>MT1 (STJ-010)</b>	5,96	6,55	9,0 %
<b>MT2 (STJ-010)</b>	5,93	6,55	9,4 %
AN (HQ-0811)	4,25	2,55	66,6 %
<b>AN1 (STJ-010)</b>	4,17	2,55	63,5 %
<b>AN2 (STJ-010)</b>	4,26	2,55	67,0 %

Para as amostras baseadas em magnetita, no caso a OD e a MT, os valores de magnetização obtidos possuem erros na faixa de 2 % a 10 %. Pode ser considerado que o equipamento foi bem sucedido na extração desta informação das amostras através dos tratamentos. Entretanto, devido à falta de uma medida exata para o VE da magnetização da AN, é válido supor que o comparativo realizado não é correto. Um ponto notável para "amparar" os valores obtidos pelo MMVH e MMVM é a similaridade entre os valores obtidos, mesmo se tratando de sistemas de sensoriamento diferentes. Quando comparados entre si, tomando o menor dos valores (mais próximo do VE) como referência, os VM diferem de cerca de 2 %.

### 4.4 Amostra de Rocha (AR)

Para a análise da AR, foi optado por dividir a amostra inteira em regiões mapeáveis, visto que as dimensões da amostra superam os alcances dos motores

de passo. Para tanto, dividimos a amostra em **Área 1 (AR1)**, **Área 2 (AR2)** e **Área 3 (AR3)**. Na Figura 4.35, são demonstradas as divisões escolhidas:

**Figura 4.35:** Áreas aproximadas analisadas na AR.



Imagem do autor.

Além disso, por medida de comparação, a AR foi também medida em outro sistema, baseado em sensores HQ-0811, como demonstra a Figura 4.36. O mapa em questão, que identificaremos como **Mapa Controle (MC)**, foi feito num equipamento cujos resultados já foram avaliados pela comunidade científica, como pode ser observado nos trabalhos [Araujo et al. 2019] e [Araujo et al. 2023].

**Figura 4.36:** Mapa Controle, obtido de equipamento auxiliar.

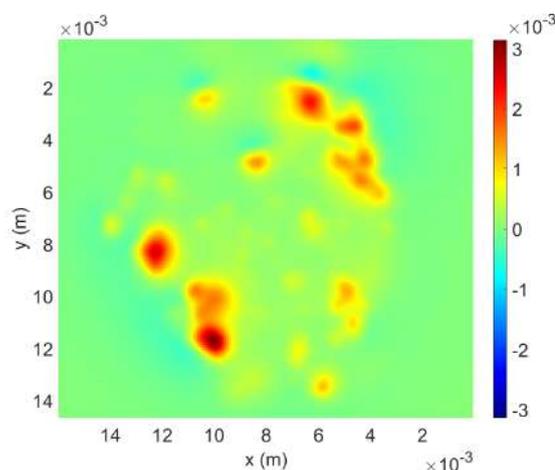


Imagem do autor.

Como mencionado anteriormente, a AR não foi submetido ao tratamento completo com extração de magnetização devido à sua complexidade estrutural, sendo os modelos os quais este trabalho dispõe ainda incapazes de se adequar aos dados observados. Entretanto, o sistema ainda é capaz de realizar o imageamento e tratamento de imagens, como será apresentado a seguir.

### 4.4.1 Amostra de Rocha (AR) com MMVH

Nas Figuras 4.37, 4.38 e 4.39 são apresentados os Mapas Tratados e de Gradiente da amostra AR, utilizando o microscópio na configuração com sensor HQ-0811. Para o tratamento em questão foram usados:

- Calibra= 0.02
- Recalibra= 0.05
- Janela= 3

**Figura 4.37:** (a) Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR1, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

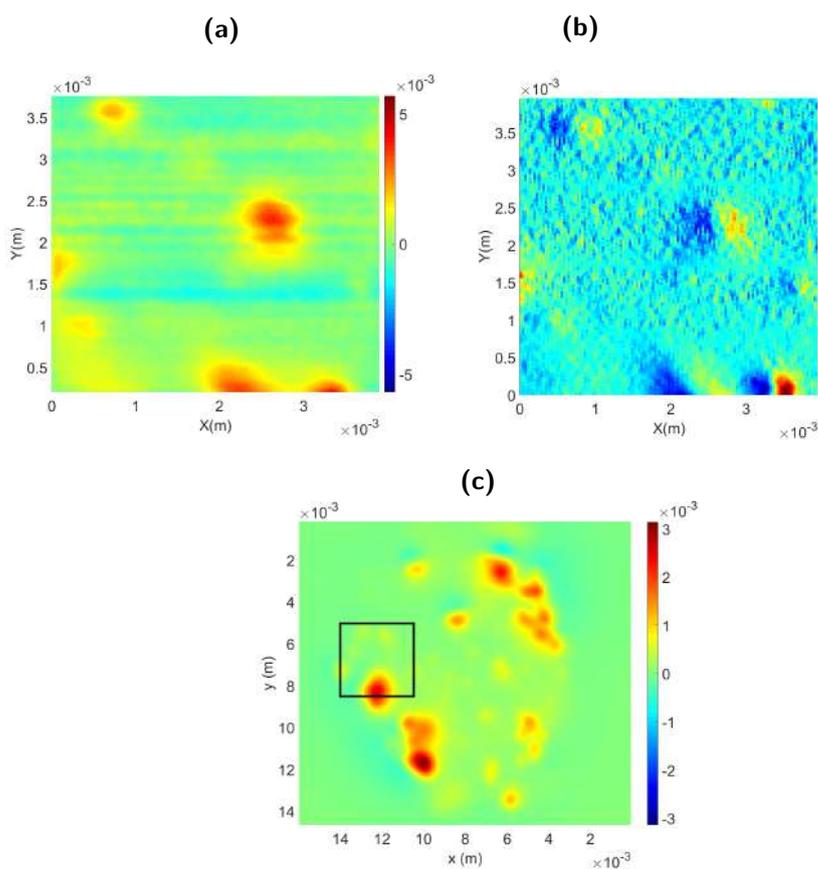


Imagem do autor.

Como pode ser observado na Figura 4.37.a e 4.37.b, o tratamento possibilitou a identificação de picos na região sensoriada, os quais podem ser comprovados

pelo Mapa de Gradientes. Além disto, na Figura 4.37.c foi destacada a região no MC que mais se assemelha ao observado na 4.37.a.

**Figura 4.38:** (a) Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR2, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

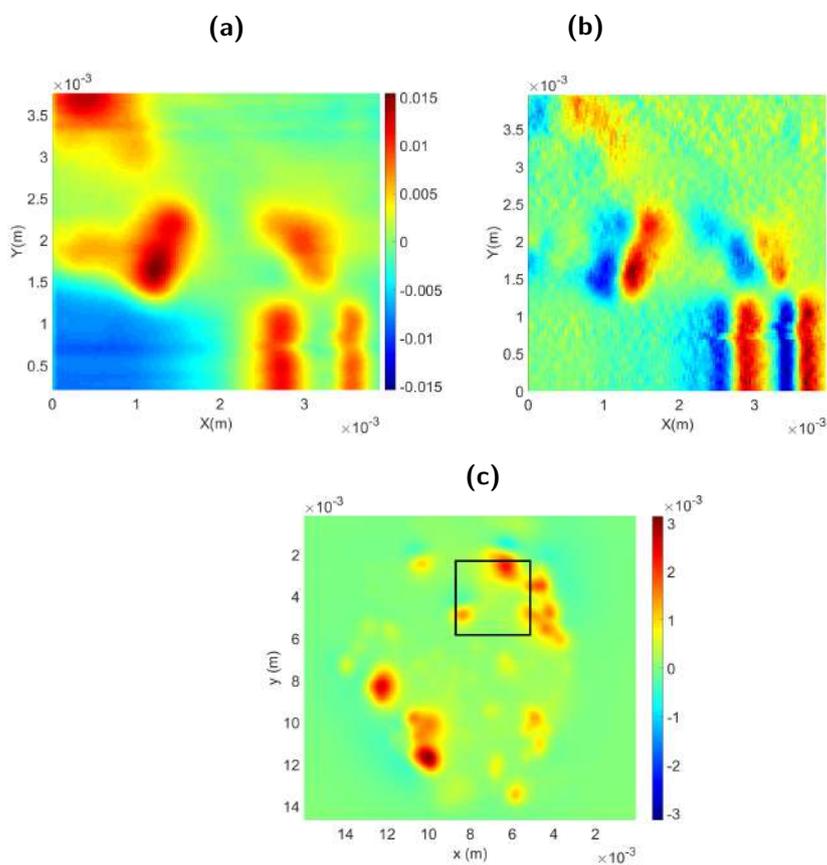


Imagem do autor.

É possível perceber a presença de 3 focos de sinal dispostos triangularmente, que podem ser percebidos também na 4.37.c. Além disto, a 4.37.a apresenta também um foco na região inferior da imagem, sendo ali localizado o ponto de máxima intensidade de campo no mapa. Presumimos que este foco seja o mesmo observado na região inferior da área destacada no MC, na Figura 4.37.c.

Analogamente, na Figura 4.38.a é apresentado o mapeamento da AR próximo à área 2, com a 4.38.b demonstrando pelos gradientes que de fato se tratam de sinais captados pelo sensor. Comparando a 4.38.c com a 4.38.a podemos notar similaridades, entretanto os dados obtidos aparentam rotacionados dos originais. Além disto, é notável que o campo captado pelo HQ-0811 no foco à esquerda do centro do mapa é anormalmente alto, com intensidade de cerca

de 15 mT, o que poderia ser argumentado pelo fato de que a amostra de rocha possui um desnível, e conseqüentemente esta região tende a ficar mais próxima, e portanto apresentar um campo mais intenso na captação.

**Figura 4.39:** (a) Mapa da AR com sensor HQ-0811, em região aproximado à AR3, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

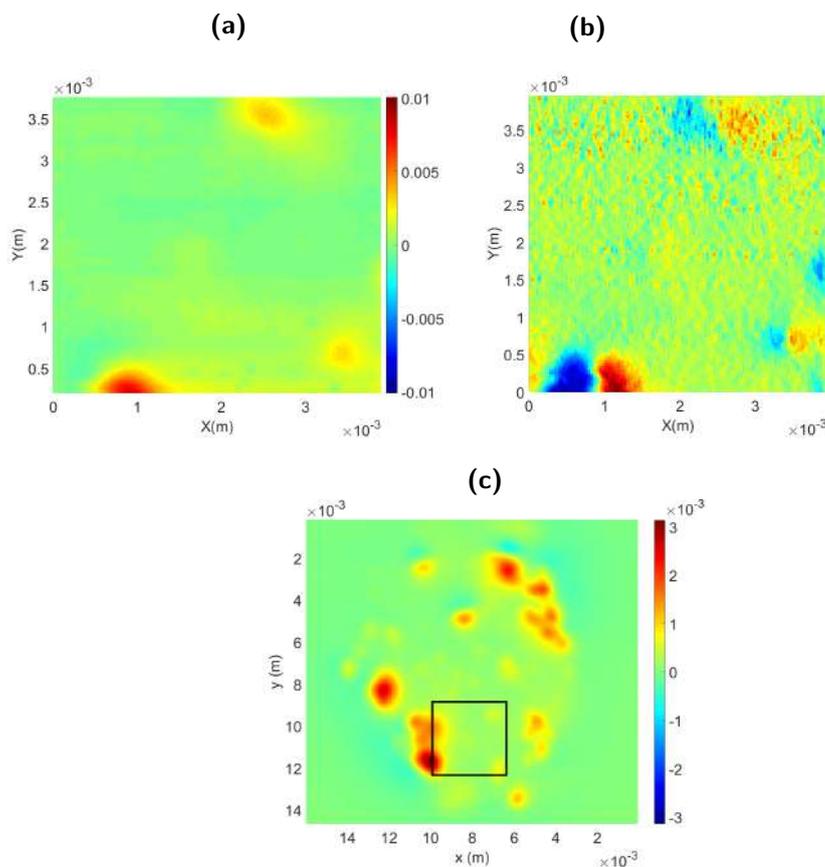


Imagem do autor.

Como pode ser observado na Figura 4.39.a, novamente existe um foco cujo campo é muito mais intenso ao que se esperaria de uma amostra deste tipo, com cerca de 10 mT e localizado na parte inferior esquerda. É suposto que a região na AR onde foi feito o mapa se assemelhe àquela destacada na Figura 4.39.c, onde pode-se notar os dois focos de menor intensidade à direita do mapa, com um foco de alta intensidade à esquerda inferior. Entretanto, é importante lembrar que a região em questão se situa num desnível negativo, e que portanto tal campo detectado deveria ser ainda menos intenso, ao contrário do que se observa.

### 4.4.2 Amostra de Rocha (AR) com MMVM

Na Figura 4.40 são apresentados os Mapa Tratado, Mapa de Gradientes e o Mapa Completo com região "equivalente" destacada.

**Figura 4.40:** (a) Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR1, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

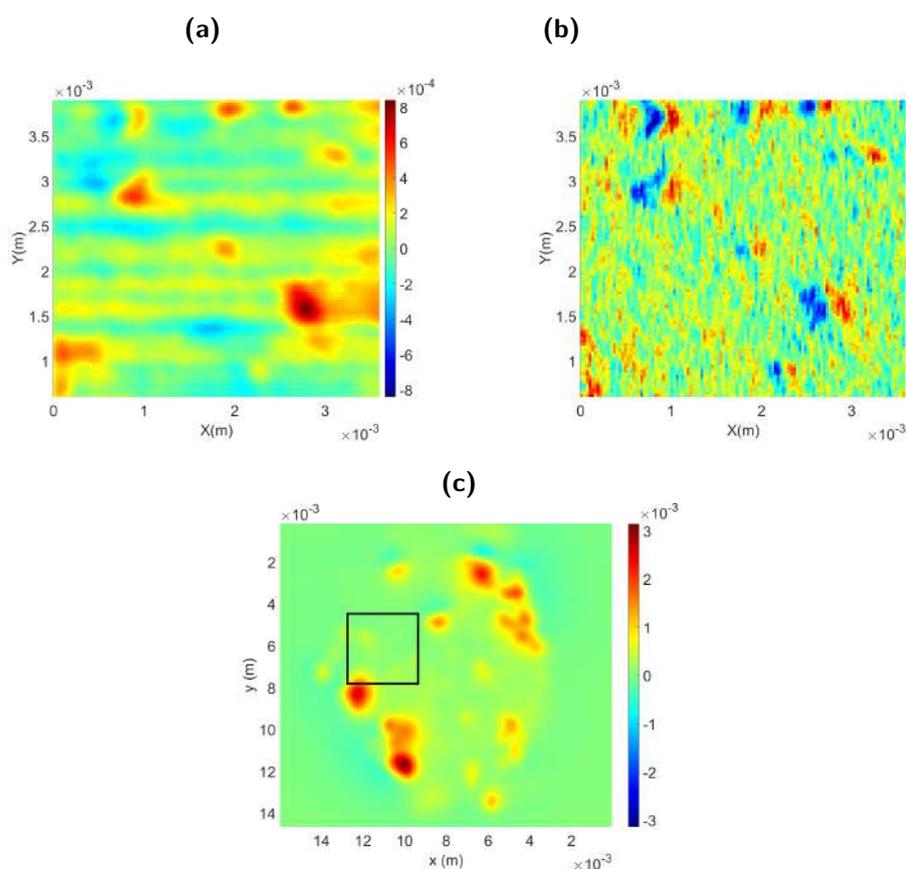


Imagem do autor.

Devido à inerente dificuldade no posicionamento do sensor, as regiões são estimadas e posteriormente comparadas por visualização. Como é possível notar nos mapas de gradientes, o STJ-010 detectou regiões de foco com sucesso, sendo possível distinguir estes focos do ruído de fundo. É válido ressaltar que a região de mapeamento possui uma abrangente área com poucos detalhes, e devido à proximidade e a não similaridade do mapa local com o mapa completo, é válido concluir que o MMVM apresentou mais detalhes do que foi previamente observado.

**Figura 4.41:** (a) Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR2, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

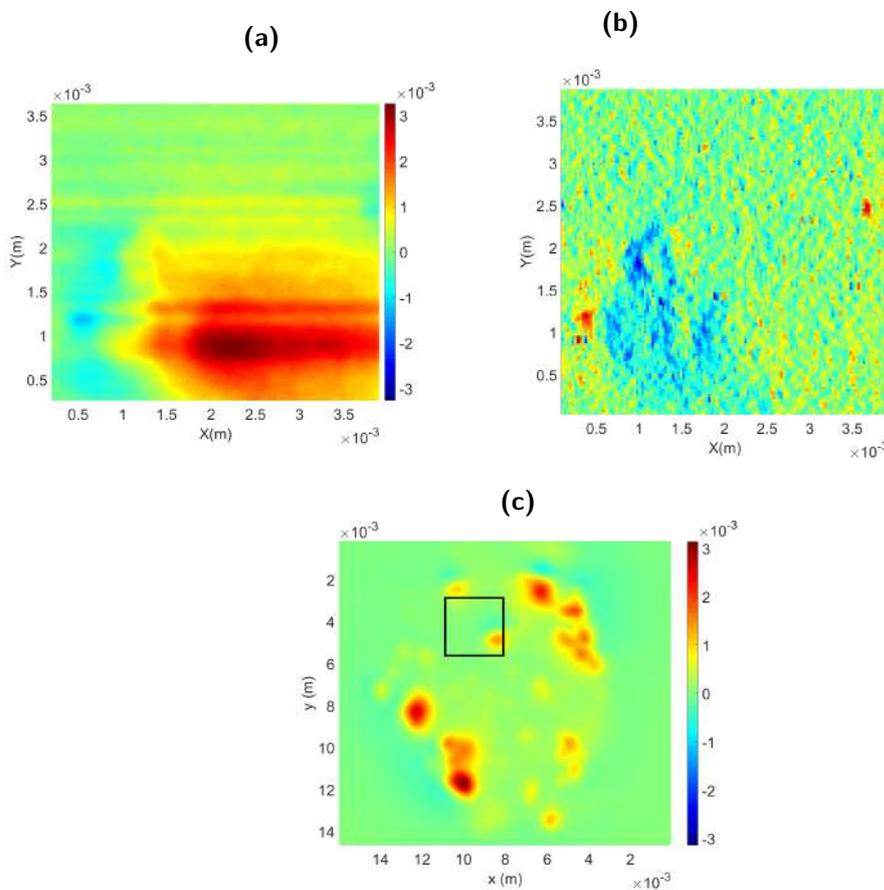


Imagem do autor.

Similarmente, na Figura 4.41.a é apresentado o mapa obtido do sensor STJ-010 da região AR2. Como pode ser notado na imagem, foi captado uma região que difere do que se espera de ruído, comprovado pela observação dos gradientes na Figura 4.41.b. Quando com a área "equivalente" no MC, a qual é mostrada na Figura 4.41.c, nota-se uma estrutura que poderia ser comparável ao observado. É válido relembrar entretanto que tal observação e comparação é uma estimativa, e pode diferir da realidade.

Na Figura 4.42.a é apresentado o Mapa Tratado da AR3, com seu devido gradiente mostrado na Figura 4.42.b. Novamente, deve-se atentar às regiões destacadas no mapa de gradientes, demonstrando que os sinais observados se diferenciam do ruído de fundo. Por fim, comparando com o MC da Figura 4.42.c, é possível notar algumas similaridades entre os detalhes. Entretanto, o mapa da Figura 4.42.a apresenta mais detalhes que os observados no MC.

**Figura 4.42:** (a) Mapa da AR com sensor STJ-010, em região aproximado à AR3, (b) com respectivo mapa de gradientes, (c) e área "equivalente" no MC.

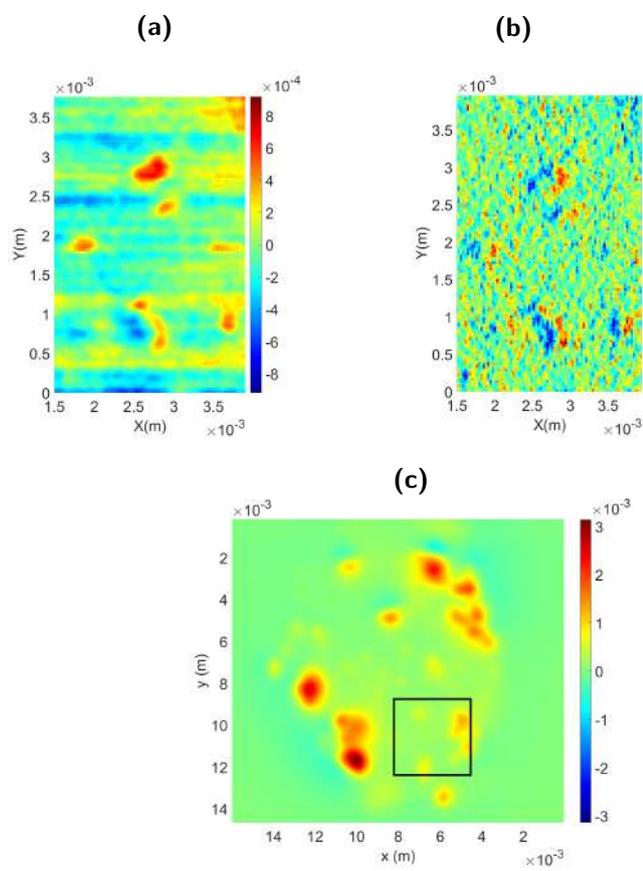


Imagem do autor.

# Capítulo 5

## Conclusões

Este trabalho foi idealizado como uma adaptação de uma estrutura previamente pertencente ao laboratório na construção de um MMV, cujo foco seria em realizar medidas de campos magnéticos de remanência com alta resolução espacial. O sistema desenvolvido apresenta uma simplicidade apreciável quando comparado às montagens anteriores, e é compatível com sensores que se adequem a seus sistemas de alimentação e aquisição, mostrando-se um aparato versátil, tendo sido testado usando um sensor de efeito Hall HQ-0811 e um sensor de magneto-resistência STJ-010.

Para uma avaliação das capacidades do equipamento, foi feita uma caracterização do equipamento, com Sinais/Ruído e Calibrações dos sensores e teste com amostras sintéticas e amostras de rocha. Para o tratamento dos dados, foi desenvolvido o programa **Mapeador** em MATLAB, o qual permitiu uma melhoria dos mapas e subsequente extração de informações magnéticas como a magnetização da amostra mapeada. Os dados foram por fim comparados com resultados obtidos em instrumentos comerciais.

### 5.1 Melhorias

Uma auto-crítica feita da montagem realizada e da metodologia de tratamento mostra-se necessária, visto que é almejado a aplicação do instrumento desenvolvido em estudos de micro paleomagnetismo. Dito isto, seguem pequenas discussões sobre prospectos de melhoria para o projeto:

- **Robustez da Estrutura Física:** Um ponto a ser melhorado se encontra no layout físico da estrutura do MMV. O braço de captação, onde se encontra o sensor do equipamento, poderia ser readaptado para o uso de

micrômetros manuais, ou até incorporado ao programa de controle em LabView. Tal alteração diminuiria o erro humano no sistema, além de permitir um melhor controle de variáveis físicas, como a **Distância do Sensor**. Outro fator seria a renovação dos motores de passo do sistema por equipamentos mais atuais, com melhores ou equiparáveis RE e alcances superiores.

- **Aumento de Compatibilidade:** Uma das capacidades do sistema, ainda pouco explorada até o momento, é a versatilidade que o mesmo possui quanto à sensores. A adaptação do mesmo à mais tipos de sensores pode se mostrar muito útil para a caracterização de amostras mais específicas.
- **Redução de Ruído Eletrônico:** Deve-se apontar que mesmo com o uso de alimentação e aquisição com técnica de *Delta-Mode*, um ponto que poderia ser melhorado no sistema seria uma diminuição dos ruídos eletrônicos, como a incorporação de um sistema fixo (o sistema atual é acoplado com conexões mecânicas), diminuição da extensão de fios, e incorporação de um estabilizador de tensão adequado.
- **Eficiência na Programação:** Uma melhoria na eficiência da programação seria capaz de conseguir tratar os resultados de forma similar com otimização dos tempos de computação. Além disto, uma melhora nos algoritmos de tratamento poderia produzir mapas mais fidedignos além de produzir resultados mais consistentes.
- **Extensão do Algoritmo para Modelagem Múltipla:** Um dos pontos que seria considerado um avanço substancial do sistema seria a incorporação ao algoritmo de métodos que permitissem, dentro dos mapas, a análise de múltiplos pontos. Tal rotina seria de extrema relevância para a análise de amostra de rocha, permitindo, com o auxílio de medições espectroscópicas das amostras, uma melhor caracterização das mesmas.
- **Incorporação ao Programa de Cálculo de Campos Totais:** Um passo seguinte no tratamento dos mapas obtidos seria incorporar no algoritmo um método de extração teórico dos campos magnéticos ortogonais ao da medição.

# Apêndice A

## Mapeador

Por razões de clareza e transparência, segue o código fonte do programa **Mapeador**, desenvolvido em MATLAB:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% ESCOLHA DO TRATAMENTO E CONFIGURAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Seta os comandos "Sim" e "Nao" para questionamento sobre os tratamentos
Sim=1;
Nao=0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ajuste de Método %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Na linha abaixo, digite 1 para usar o MÉTODO LÓGICO DE GRADIENTES (Simples porém impreciso), ou 0 para
% usar o MÉTODO DE BUSCA E REMOÇÃO DE RAMPa (Método mais robusto, incluindo
% o tratamento do primeiro método)
Metodo = 1;

% Seta o tempo entre a visualização dos passos
ModoFilme = 0;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Sensor Utilizado %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

HallSI = 1;
HallCI = 2;
STJ = 3;

% Escreva aqui o nome do sensor utilizado, por motivos de calibração
Sensor = 3;

% Em caso de máximo do mapa invertido
Inverter = Nao;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Suavizador %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% O comando seguinte seta as regras de suavização, útil para ambos os
% programas
Suaviza = Sim; % Aplica filtro durante a feitura dos processos (Altera o resultado final)
Janela = 5; % Seta o tamanho da janela móvel que realizará as médias

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Limitadores Lógicos %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Insira abaixo o valor do limite mínimo de aquisição de sinal (Entre 0 e 1).
% É aconselhável rodar o programa uma vez para procurar os valores mais
% adequados para o tratamento. Vale sempre tentar buscar valores que deixem
% as regiões de interesse visíveis, inclusive os picos.
Calibra = 0.03;

% Pós tratamento MÉTODO DE BUSCA E REMOÇÃO DE RAMPa + MÉTODO LÓGICO DE
% GRADIENTES. "1" para sim, "0" para não.
PontoProblema = Sim; % Utiliza lógica de gradientes e baseia o algoritmo nos máximos localizados pela lógica
```

```

Retratar = Sim;
Recalibra = 0.05; % Limite mínimo para guardar valores do mapa lógico
NormalizarCampo = 0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Para Campos Aplicados %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ajuste aqui o campo aplicado
if Sensor==2
    CampoAplicado = 15e-3;
else
    CampoAplicado=0;
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Ajuste de Visualização Gráfica %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Em casa de mapas não quadrados, modificar a variável "Quadrar" para um
% valor diferente de 0
Quadrar = Sim;
% Abaixo constam as variáveis que setam o ângulo de visualização dos mapas
AnguloX = 0; % Azimute
AnguloY = 90; % Elevação
s = get(0, 'ScreenSize');
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CARACTERÍSTICAS DA AMOSTRA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Parâmetros da Amostra %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Raio = 125e-6; % Raio da cavidade (m)
Altura = 400e-6; % Altura da cavidade (m)
Area = pi*Raio^2;
Volume = Area*Altura;
DistanciaSensor = -Altura ; % Distância do sensor à cavidade (m)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Características do Material %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Densidade = 8.5e3; % Densidade (kg/m^3)
Massa = Densidade*Volume; % Massa (kg)
% Primeira aposta do valor de momento magnético
MomentoMagnetico = 8e-7;
% NÃO MEXER
Permeabilidade = 1.25e-6;
Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% AQUISIÇÃO DE DADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Leitura de dados à partir do txt dividido em colunas (REQUER 3 COLUNAS!)
% O resultado final é uma matriz, com "X" linhas e "Y" colunas, com valores
% de "Z" alocados.
data = dlmread('STJ_BParnaiba_PorVoltaArea1.txt');
% Em caso de uso de outra disposição de dados, comente as linhas abaixo.
x = data(:,1);
x = -x+max(max(x));
y = data(:,2);
y = -y+max(max(y));
z = data(:,3);
% Para ler colunas fora do padrão x(1),y(2),Sinal(3), altere os valores
% abaixo
% x = data(:,3);
% x = -x+max(max(x));

```

```

% y = data(:,4);
% y = -y+max(max(y));
% z = data(:,1);
for i=2:max(y)
    if (not(y(i)== y(i-1)))
        break
    end
end
end
i=i-1;
X=[];
Y=[];
Z=[];
k=1;
while (true)
    try
        Y=[Y,y(k:k+i-1)];
        X=[X,x(k:k+i-1)];
        Z=[Z,z(k:k+i-1)];
        k=k+i;
    catch
        break
    end
end
end
% Transforma os passos para o SI (m)
X = X*1e-6;
Y =flip(Y);
Y = Y*1e-6;
% Essa linha limita os dados para tornar as janelas quadradas
if Quadrar>0
    [TamanhoZ1,TamanhoZ2] = size(Z);
    if TamanhoZ1~=TamanhoZ2
        Cubificador = abs(TamanhoZ1 - TamanhoZ2);
        X = X(Cubificador/2:end-Cubificador/2 - 1,:);
        Y = Y(Cubificador/2:end-Cubificador/2 - 1,:);
        Z = Z(Cubificador/2:end-Cubificador/2 - 1,:);
    else
        end
end
else
end
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% CALIBRAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Em caso de mapas com eixo de intensidade invertido
if Inverter == 1
    Z= -1*Z;
else
end
end
% Seguem as calibrações dependendo do sensor utilizado
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calibração Hall Sem Imã %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Sensor ==1
    Z=Z - 0.29/1.8;
else
end
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calibração Hall Com Imã %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Sensor ==2
    Z=Z/2.6;

```

```

else
end
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Calibração STJ %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if Sensor ==3
Z = (Z+3e-09)/7.6e-05;
else
end
% Retira o campo aplicado
Z = Z - CampoAplicado;
%
if NormalizarCampo>0
    Z=Z/abs(max(max(Z)));
else
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% DIFERENCIAÇÃO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% A matriz de taxas se mostra eficiente na localização de sinais em meio à
% ruído e drift.
Filtro = ones(Janela)/(Janela^2); % Cria a janela e faz as médias
ZGrad = diff(Z); % Deriva os valores obtidos, obtendo uma matriz de taxas
ZGrad = ZGrad/(max(max(ZGrad)));
ZGrad = filter2(Filtro,ZGrad); % Filtra o mapa de gradientes, diminuindo o ruído
[NX,NY] = size(Z); % Seta o número de linhas e colunas da matriz do mapa
ZABS=abs(ZGrad); % Gera uma matriz com os valores absolutos das taxas
ZLOG = ZABS; % Cria a base do mapa lógico
MediaGrad = []; % Analisa o valor médio do sinal cortado
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZABS(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
for VarreduraColuna = NY:-1:1
    if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > Calibra*max(max(ZABS))
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 1;
    else
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
        CalcMedia = ZABS(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
        MediaGrad = [MediaGrad,CalcMedia];
    end
end
end
end
MediaGrad = mean(MediaGrad);
% Limiar=MediaGrad/max(max(ZABS)); % Mostra o quão discrepante é o ruído em relação ao sinal máximo obtido
% Ao fim do algoritmo, temos uma matriz lógica de 0's e 1's, localizando as
% regiões com variação apreciável no gradiente.
ZLOGF = filter2(Filtro,ZLOG); % Filtra o mapa lógico, utilizando os pontos
% próximos dos 1's também (Útil para manter o sinal, entretanto pode
% inserir ruído nos mapas.
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% PRÉ-TRATAMENTO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Gera o mapa original, o mapa de gradientes, e o mapa lógico filtrado
clf
figure('Name','Mapa Original','NumberTitle','off');
title(['Mapa Original']);
surf(X,Y,Z,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')

```

```

ylabel('Y(m)')
xlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Original','NumberTitle','off');
title(['Mapa Original']);
surf(X,Y,Z,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
xlabel('Campo(T)')
axis equal
view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa de Gradientes','NumberTitle','off');
title(['Mapa de Gradientes']);
surf(X(2:end,:),Y(2:end,:),ZGrad,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
xlabel('Gradiente de Campo')
axis equal
view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Lógico','NumberTitle','off');
title(['Mapa Lógico']);
surf(X(2:end,:),Y(2:end,:),ZLOG,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
xlabel('Lógica Digital')
view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
caxis([-1,1])
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Lógico Suavizado','NumberTitle','off');
title(['Mapa Lógico Suavizado']);
surf(X(2:end,:),Y(2:end,:),ZLOGF,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
xlabel('Lógica Suavizada')
view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
pause(ModoFilme)
%%
if Metodo==1;
                %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
                % (PASSO 1) LÓGICA DE GRADIENTES %
                %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
OffsetI = Z(55,:); % Linha aleatória que será usada como offset para todo o mapa
ZI = Z - OffsetI; % Realiza o offset
ZBusca = ZLOGF;
figure('Name','Mapa Pré-Tratado','NumberTitle','off');

```

```

surf(X,Y,ZT,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
caxis([-max(max(ZT)), max(max(ZT))])
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
ZRuido = zeros(NX,NY);
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0 % Muda o valor para setar o limite de aquisição de dados
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
        else
            ZRuido(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna)= 0;
        end
    end
end
ZRuido = mean(mean(ZRuido));
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZT == 0 % Muda o valor para setar o limite de aquisição de dados
            ZT(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZRuido;
        else
            end
        end
    end
end
ZT(end,:)=0;
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa com Tratamento Inicial','NumberTitle','off');
surf(X,Y,ZT,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
caxis([-max(max(ZT)), max(max(ZT))])
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
% As próximas linhas diminuirão o ruído de fundo e suavizarão o mapa.
% Alteração do valor da variável "Janela" aumenta a suavização, ao custo de
% perda de sinal. Novamente, cabe ao usuário definir qual o melhor valor
% para esta.
ZFiltrado = filter2(Filtro,ZT); % Filtra e suaviza o mapa usando a janela acima
else
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% (PASSO 2) MÉTODO DE BUSCA E REMOÇÃO DE RAMPA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% O próximo algoritmo busca corrigir o drift, para tanto, ele subtrairá
% pela linha correspondente do teste. Um auxílio visual é apresentado para
% eventuais alterações caso o algoritmo não seja capaz de identificar o
% melhor tratamento
Contraste=0;
ContrasteAtual=1;
for B = 1:1:NX
    OffsetZ = Z(B,:);

```

```

MediaLocal=mean(OffsetZ);
ZT = Z - OffsetZ;
ZT(1,:)=ZT(2,:);
if Suaviza==1
ZT = filter2(Filtro,ZT);
else
end
if PontoProblema == 1
    ZBusca = ZLOGF;
    ZComp = ZT;
    for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
        ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
        for VarreduraColuna = NY:-1:1
            if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0 % Varre cada célula do mapa lógico, setando quais valores são úteis
                ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
            else
                ZComp(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
            end
        end
    end
    ZComp(end,:)=0;
    ZEscolhido = ZComp;
else
    ZEscolhido = ZT;
end
MaximoLocalZ = max(max(ZEscolhido));
PreContraste= abs(MaximoLocalZ);
if mean(ZLOGF(B:end-1,:)) > 0
else
    if PreContraste>Contraste
        Contraste = PreContraste;
        ContrasteAtual = B;
    end
end
% Este trecho mostra, linha por linha, os mapeamentos com suas devidas
% correções. Útil para identificar qual a melhor linha para ser utilizada
% no algoritmo de correção.
% As linhas abaixo escrevem no gráfico o valor máximo de campo e a linha
% utilizada para fazer o tratamento.
Caracteristicas = ['Máximo: ' num2str(max(max(ZT))) ', Linha: ' num2str(B)];
[XM,YM]=find(ZT==max(max(ZT)));
% As duas linhas a seguir garantem que, no caso do mapa ter mais de um
% máximo, o algoritmo guardará o valor do primeiro.
XM = XM(1,1);
YM = YM(1,1);
figure(1)
surf(X,Y,ZT,'EdgeColor','none')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
caxis([-max(max(ZT)), max(max(ZT))])
text(X(XM,1),Y(1,YM),(max(max(ZT)) + 0.2*max(max(ZT))),Caracteristicas,'FontSize',14,'Color','r');
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
if B==1
    pause(ModoFilme)
else
    pause(0.01)
end
end

```

```

end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MAPEAMENTO A PARTIR DOS DADOS TRATADOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Caso o offset sugerido pelo algoritmo seja ruim, basta mudar o valor após
% o parêntese na linha abaixo de "B" para "1".
OffsetZ = Z(ContrasteAtual,:);
ZT = Z - OffsetZ;
if Suaviza==1
    ZT=filter2(Filtro,ZT);
else
end
MaximoTotalAntes= max(max(ZT))
% As linhas abaixo escrevem no gráfico o valor máximo de campo e a linha
% utilizada para fazer o tratamento.
Caracteristicas = ['Máximo: ' num2str(max(max(ZT))) ', Linha: ' num2str(ContrasteAtual)];
[XM,YM]=find(ZT==max(max(ZT)));
% As duas linhas à seguir garantem que, no caso do mapa ter mais de um
% máximo, o algoritmo guardará o valor do primeiro.
XM = XM(1,1);
YM = YM(1,1);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Tratado','NumberTitle','off');
surf(X,Y,ZT,'EdgeColor','none')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
caxis([-max(max(ZT)), max(max(ZT))])
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
text(X(XM,1),Y(1,YM),(max(max(ZT)) + 0.2*max(max(ZT))),Caracteristicas,'FontSize',14,'Color','r');
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FILTRAGEM E AVALIAÇÃO LÓGICA %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% As próximas linhas diminuirão o ruído de fundo e suavizarão o mapa.
% Alteração do valor da variável "Janela" aumenta a suavização, ao custo de
% perda de sinal. Novamente, cabe ao usuário definir qual o melhor valor
% para esta.
ZFiltrado = filter2(Filtro,ZT); % Filtra e suaviza o mapa usando a janela acima
% Tentativa de melhoria do sinal (Faz se a variável Retratar no início for
% igual a "1")
if Retratar == 1
    % Recalcula o mapa lógico com uma segunda calibração (Em geral, é útil
    % que essa seja menor)
    for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
        ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZABS(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
        for VarreduraColuna = NY:-1:1
            if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > Recalibra*max(max(ZABS))
                ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 1;
            else
                ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
            end
        end
    end
end
% figure('Name','Mapa Tratado','NumberTitle','off');
% surf(X,Y,ZLOG,'EdgeColor','none')
% colorbar

```

```

% colormap jet
% xlabel('x')
% ylabel('y')
% zlabel('Sinal(T)')
% view (AnguloX,AnguloY)
ZLOGF = filter2(Filtro,ZLOG);
ZBusca = ZLOGF;
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1 % Varre as linhas do mapa, uma a uma
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZLOGF(VarreduraLinha,:); % Aloca os valores da linha para um vetor de busca
    for VarreduraColuna = NY:-1:1
        if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0 % Muda o valor para setar o limite de aquisição de dados
            ZFiltrado(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = ZFiltrado(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
        else
            CalcMedia = ZFiltrado(VarreduraLinha,VarreduraColuna);
            MediaGrad = [MediaGrad,CalcMedia];
            MediaGrad = mean(MediaGrad);
            ZFiltrado(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0 ;
        end
    end
end
ZFiltrado(end,:)=MediaGrad;
else
end
end
end
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO E COMPARATIVOS %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ZFiltrado = ZFiltrado + 1e-10*max(max(ZFiltrado));
ZFiltrado = filter2(Filtro,ZFiltrado); % Filtra e suaviza o mapa
MaxZ = max(max(ZFiltrado));
[XM,YM]=find(ZFiltrado==max(max(ZFiltrado))); % Guarda a linha e coluna do máximo
XM = XM(1,1);
YM = YM(1,1);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Tratado e Filtrado','NumberTitle','off');
surf(X,Y,ZFiltrado,'EdgeColor','none')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Campo(T)')
view (AnguloX,AnguloY)
axis equal
caxis([-max(max(ZFiltrado)), max(max(ZFiltrado))])
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
% Calcula o quanto diverge o valor do máximo no mapa original do mapa
% tratado
DivergenciaMaxeRuido = abs(abs(max(max(ZT))) - abs(max(max(ZFiltrado))))
Erro = DivergenciaMaxeRuido/abs(max(max(ZT)))
% O comando seguinte mostra os gradientes de campo ao longo do mapa.
ZGrad = diff(ZFiltrado);
ZGrad = filter2(Filtro,ZGrad);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa de Gradientes Pós-Tratamento','NumberTitle','off');
surf(X(2:end,:),Y(2:end,:),ZGrad,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Gradiente de Campo Normalizado')

```

```

view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
% Realização de um tratamento lógico comparativo
ZABS=abs(ZGrad);
ZLOG = ZABS;
for VarreduraLinha = NX-1:-1:1
    ZBusca(VarreduraLinha,:) = ZABS(VarreduraLinha,:);
for VarreduraColuna = NY:-1:1
    if ZBusca(VarreduraLinha,VarreduraColuna) > 0.15*max(max(ZABS))
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 1;
    else
        ZLOG(VarreduraLinha,VarreduraColuna) = 0;
    end
end
end
ZLOGF = filter2(Filtro,ZLOG);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Mapa Lógico Pós-Tratamento Filtrado','NumberTitle','off');
surf(X(2:end,:),Y(2:end,:),ZLOGF,'EdgeColor','none','FaceAlpha',1)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Y(m)')
zlabel('Lógica Suavizada')
view (AnguloX,90)
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
% Por fim, escolhe a linha a ser utilizada no fit, e restringe os dados à
% esta linha
MaximoTotalDepois= max(max(ZFiltrado))
LinhadeProva = ZFiltrado(:,YM);
XLinha = X(:,YM);
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% LOCALIZAÇÃO E DIMINUIÇÃO DE DESCONTINUIDADES %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Deriva a linha escolhida para tratamento para buscar por descontinuidades
% na primeira derivada
MaxZ = max(max(LinhadeProva));
LinhadeProvaDerivada = diff(LinhadeProva);
LinhadeProvaDerivada2 = diff(LinhadeProvaDerivada); % Realiza também a segunda derivada
% Normaliza as derivadas e reduz os dados por razões de congruência
LinhadeProvaDerivadaNorma = LinhadeProvaDerivada/max(LinhadeProvaDerivada);
LinhadeProvaReduzida = LinhadeProva(2:end,:);
% Escala as derivadas normalizadas aos valores obtido
for i = 1:1:NX-1
    LinhadeProvaDerivadaReescalada(i,:) = LinhadeProvaDerivadaNorma(i,:)*LinhadeProvaReduzida(i,:);
end
% Apresenta os gráficos de primeira e segunda derivada
pause(ModoFilme)
figure('Name','Linha de Maior Pico com Derivadas','NumberTitle','off');
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
subplot(3,1,1)
plot(XLinha(2:end,:),LinhadeProvaReduzida)
legend('Linha de Prova','location','northeast')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Sinal(T)')
caxis([-0.1*MaxZ, MaxZ])
subplot(3,1,2)
plot(XLinha(2:end,:),LinhadeProvaDerivadaReescalada)

```

```

legend('Derivada Primeira','location','northeast')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('1ª Derivada')
subplot(3,1,3)
plot(XLinha(3:end,:),LinhadeProvaDerivada2)
legend('Derivada Segunda','location','northeast')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('2ª Derivada')
pause(ModoFilme)
% Executa o método de detecção de descontinuidades à partir da derivada 1ª
Detector = zeros(NX,1);
for i = 2:1:NX-2
    Scaneador = LinhadeProvaDerivada(i,:);
    Gatilho = mean(LinhadeProvaDerivada(i+1,:) + LinhadeProvaDerivada(i-1,:));
    if abs(Scaneador - Gatilho)>0.8*abs(Gatilho)
        Detector(i,:) = 1;
    end
end
% Em caso positivo de descontinuidade detectada, executa a correção por
% médias locais
[XD,YD]=size(Detector);
XReajustado=X(1:XD,1:YD);
if max(Detector)>0
    pause(ModoFilme)
    % Apresenta as descontinuidades como picos
    figure('Name','Linha de Prova com Descontinuidades Detectadas','NumberTitle','off');
    plot(XLinha,LinhadeProva,XReajustado,Detector*max(LinhadeProva))
    colorbar
    colormap jet
    xlabel('X(m)')
    ylabel('Sinal(T)')
    caxis([-0.1*MaxZ, MaxZ])
    set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
    % Utiliza o mapa de detecção para substituir o valor local obtido
    LinhadeProva=smooth(XLinha,LinhadeProva,0.05,'loess');
    % Refaz as derivadas pós-correção
    LinhadeProvaDerivada = diff(LinhadeProva);
    LinhadeProvaDerivadaNorma = LinhadeProvaDerivada/max(LinhadeProvaDerivada);
    LinhadeProvaDerivada2 = diff(LinhadeProvaDerivada);
    LinhadeProvaDerivada2 = LinhadeProvaDerivada2/max(abs(LinhadeProvaDerivada2));
    Detector = zeros(NX,1);
    for i = 2:1:NX-2
        Scaneador = LinhadeProvaDerivada(i,:);
        Gatilho = mean(LinhadeProvaDerivada(i+1,:) + LinhadeProvaDerivada(i-1,:));
        if abs(Scaneador - Gatilho)>0.7*abs(Gatilho)
            Detector(i,:) = 1;
        end
    end
else
end
pause(ModoFilme)
figure('Name','Linha Escolhida','NumberTitle','off');
plot(XLinha,LinhadeProva)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Sinal(T)')

```

```

caxis([-0.1*MaxZ, MaxZ])
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
pause(ModoFilme)
figure('Name','Linha Escolhida','NumberTitle','off');
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
subplot(3,1,1)
plot(XLinha,LinhadeProva)
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('Sinal(T)')
caxis([-0.1*MaxZ, MaxZ])
subplot(3,1,2)
plot(XLinha(2:end,:),LinhadeProvaDerivada)
legend('Derivada Primeira','location','northeast')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('1ª Derivada')
subplot(3,1,3)
plot(XLinha(3:end,:),LinhadeProvaDerivada2)
legend('Derivada Segunda','location','northeast')
colorbar
colormap jet
xlabel('X(m)')
ylabel('2ª Derivada')
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO TEÓRICO (JANELA DE ANÁLISE) %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cria uma janela nos dados para análise em volta de um pico
XJanela = Raio;
XLinha = X(:,YM);
[XM,YM]=find(LinhadeProva==max(max(LinhadeProva)));
XPico = XLinha(XM,1);
Xmaxi = XPico - XJanela;
Xmini = XPico + XJanela;
[c , Xmin] = min(abs(XLinha - Xmini));
[c , Xmax] = min(abs(XLinha - Xmaxi));
% Utiliza as especificações colocadas para limitar os dados
XLinha = XLinha(Xmin:Xmax,1);
LinhadeProvaReduzida = LinhadeProva(Xmin:Xmax,1);
[NX,NY] = size(XLinha);
% Cria o vetor sobre o qual serão salvos os valores do fit usando Biot-Savart
Biot = zeros(NX,1);
DeltaZ = 0;
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% FIT À PARTIR DO MODELO TEÓRICO %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Os passos seguintes buscarão fitar os gráficos de linha obtidos à o
% modelo teórico de dipolo, por Biot-Savart
pause(ModoFilme)
Condicional = 1;
% O condicional muda de valor, entre positivo e negativo, sempre que
% detecta um aumento de erro no fit, garantindo que os valores sempre
% variem em direção ao menor erro
ErroMedioMinimo=1e15;
Condicional = 1;
ErroMedio = 1e1;
Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am2/kg)

```

```

TermoMagnetico = (Permeabilidade * MomentoMagnetico)/(4 * pi * Volume);
LinhadeProvaReduzida = LinhadeProvaReduzida/TermoMagnetico;
DeltaZ = 0.01*DistanciaSensor;
for i=1:1:5
    DistanciaSensor = DistanciaSensor - Condicional*DeltaZ;
    Biot = zeros(NX,1);
    for i=1:1:NX
        x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida)); % Centraliza o fit ao mapa
        FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
        Biot (i,1) = integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura); % Resultado em mT
    end
    ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
    if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
        MomMagmin = MomentoMagnetico;
        Magmin = Magnetizacao;
    else
        Condicional = -1* Condicional;
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
    end
end
ErroMedioMinimo=1e15;
ErroMedio = 1e5;
GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
DeltaZ = 0.01*DistanciaSensor;
while GatilhoErro>0
    DistanciaSensor = DistanciaSensor - Condicional*DeltaZ;
    Biot = zeros(NX,1);
    for i=1:1:NX
        x = (XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida))); % Centraliza o fit ao mapa
        FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
        Biot (i,1) = integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura); % Resultado em mT
    end
    figure(4)
    plot(XLinha,Biot,'-',XLinha,LinhadeProvaReduzida,'o','linewidth',2)
    title(['Distância do Sensor = ' num2str(abs(DistanciaSensor + Altura)*1e6,'%8.4f') ' \mu m --- MSE = ' num2str(ErroMedio*10e+9,'%8.4f') ' * 10^-9 T^2 ' ]);
    xlabel('X (m)');
    ylabel('Sinal(T)');
    grid on
    set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
    pause(0.001)
    % calcula o erro medio quadratico
    ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
    GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
    if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
        DistanciaMin = DistanciaSensor;
    end
end
DistanciaSensor = DistanciaMin;
LinhadeProvaReduzida = LinhadeProvaReduzida*TermoMagnetico;
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% MODELO TEÓRICO (FIT DE MOMENTO MAGNÉTICO) %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
ErroMedioMinimo=1e6;
Condicional = 1;
ErroMedio = 1e5;
DeltaMomMag = 0.0001*MomentoMagnetico;
for i=1:1:5
    MomentoMagnetico = MomentoMagnetico + Condicional*DeltaMomMag;

```

```

TermoMagnetico = (Permeabilidade * MomentoMagnetico)/(4 * pi * Volume);
Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)
Biot = zeros(NX,1);
for i=1:1:NX
    x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida));
    FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
    Biot (i,1) = TermoMagnetico * integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura); % Resultado em mT
end
ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
    ErroMedioMinimo = ErroMedio;
    MomMagmin = MomentoMagnetico;
    Magmin = Magnetizacao;
else
    Condicional = -1* Condicional;
    ErroMedioMinimo = ErroMedio;
end
end
% 0 condicional muda de valor, entre positivo e negativo, sempre que
% detecta um aumento de erro no fit, garantindo que os valores sempre
% variem em direção ao menor erro
ErroMedioMinimo=1e6;
ErroMedio = 1e5;
GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
DeltaMomMag = 0.0001*MomentoMagnetico;
while GatilhoErro>0
    MomentoMagnetico = MomentoMagnetico + Condicional*DeltaMomMag;
    TermoMagnetico = (Permeabilidade * MomentoMagnetico)/(4 * pi * Volume);
    Magnetizacao = MomentoMagnetico/Massa; % Em (Am^2/kg)
    Biot = zeros(NX,1);
    for i=1:1:NX
        x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProvaReduzida==max(LinhadeProvaReduzida));
        FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
        Biot (i,1) = TermoMagnetico * integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura); % Resultado em mT
    end
    figure(4)
    plot(XLinha,Biot,'-o',XLinha,LinhadeProvaReduzida,'o','linewidth',2)
    title(['Magnetização = ' num2str(Magnetizacao,'%8.4f') ' Am^2/kg --- Distância do Sensor = ' num2str(abs(DistanciaSensor + Altura)*1e6 ,'%8.4f') ' \mum --- M
    xlabel('X (m)');
    ylabel('Sinal(T)');
    grid on
    set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
    pause(0.001)
    % calcula o erro medio quadratico
    ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProvaReduzida).^2)/NX;
    GatilhoErro = ErroMedioMinimo - ErroMedio;
    if (ErroMedio<ErroMedioMinimo)
        ErroMedioMinimo = ErroMedio;
        MomMagmin = MomentoMagnetico;
        Magmin = Magnetizacao;
    end
end
end
Magnetizacao = Magmin;
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% COMPARAÇÃO TEÓRICA COM EXPERIMENTAL %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Cria o fit a partir dos valores encontrados que mais se aproximam dos
% dados experimentais
if AnguloX>=180
    X = flip(X);

```

```

end
XLinha = X(:,YM);
[NX,NY] = size(XLinha);
for i=1:1:NX
x = XLinha(i,1)-XLinha(LinhadeProva==max(LinhadeProva));
FitBS = @(phi,h) Raio*(Raio - x*cos(phi))./((x-Raio*cos(phi)).^2 + (Raio*sin(phi)).^2 + (DistanciaSensor-h).^2).^(3/2);
Biot (i,1) = TermoMagnetico * integral2(FitBS,0,2*pi,0,Altura); % Resultado em mT
end
% Realiza o offset necessário
% Calcula o erro médio quadratico final
ErroMedio = sum((Biot-LinhadeProva).^2)/NX;
ErroPico= 100 - max(LinhadeProva)/max(Biot)*100;
% Cria a figura com os valores encontrados
pause(ModoFilme)
figure;
plot(XLinha,Biot,XLinha,LinhadeProva,'o','linewidth',2);
legend('Modelo','Experimental','location','northwest')
title(['M= ' num2str(Magnetizacao,'%8.4f') ' Am^2/kg - DS = ' num2str(abs(DistanciaSensor + Altura)*1e6,'%8.4f') ' \num - MSE = ' num2str(ErroMedio*10e+9,'%8.4f')
xlabel('X (m)');
ylabel('Sinal(T)');
axis([0 max(XLinha) -0.2*max(LinhadeProva) 1.1*max(Biot)])
grid on
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);
ResiduosLinha = abs(LinhadeProva - Biot);
pause(ModoFilme)
figure;
plot(XLinha,Biot,'-',XLinha,LinhadeProva,'o',XLinha,ResiduosLinha,'x','linewidth',2);
title(['Mapa Residual' ]);
legend('Modelo','Experimental','Residuo','location','northwest')
xlabel('X (m)');
ylabel('Residuo(T)');
axis([0 max(XLinha) -0.2*max(LinhadeProva) 1.1*max(Biot)])
grid on
set(gcf, 'Units', 'Normalized', 'OuterPosition', [0 0 s(3) s(4)]);

```

# Referências Bibliográficas

- [AKM 2009]AKM. **HQ-0811 InAs Quantum Well Hall Element**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/536170/AKM/HQ-0811.html>>. Acesso em: 26/01/2023. 37
- [Ampère 1826]AMPÈRE, A. M. **Théorie des phénomènes électrodynamiques, uniquement déduite de l'expérience**. 1826. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=LzcVAAAAQAAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs\\_ge\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?id=LzcVAAAAQAAJ&printsec=frontcover&hl=pt-BR&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 07/12/2022. 18
- [Araujo, Bruno e Carvalho 2010]ARAUJO, J. F. D. F.; BRUNO, A. C.; CARVALHO, H. R. **Characterization of magnetic nanoparticles by a modular Hall magnetometer**. *Journal of Magnetism and Magnetic Material*, v. 322, 2010. Disponível em: <[doi:10.1016/j.jmmm.2010.04.034](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.04.034)>. 61
- [Araujo et al. 2019]ARAUJO, J. F. D. F. et al. **Characterizing Complex Mineral Structures in Thin Sections of Geological Samples with a Scanning Hall Effect Microscope**. *MDPI Sensors*, v. 19, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/s19071636>>. 83
- [Araujo et al. 2023]ARAUJO, J. F. D. F. et al. **Construction of a Hall effect scanning magnetic microscope using permanent magnets for characterization of rock samples**. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, v. 562, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.170304>>. 6, 29, 30, 31, 52, 66, 83
- [Attocube 2009]ATTOCUBE. **User Manual - Premium Line Positioners and Scanners**. [S.l.], 2009. Disponível em: <[https://mrsec.utexas.edu/sites/default/files/\\$Manual%20FlexPositioners%20%26%20Scanner\\_v2.1.1.pdf](https://mrsec.utexas.edu/sites/default/files/$Manual%20FlexPositioners%20%26%20Scanner_v2.1.1.pdf)>. Acesso em: 26/01/2023. 45, 46
- [Attocube 2009]ATTOCUBE. **User Manual Piezo Step Controller ANC150**. [S.l.], 2009. Disponível em: <<https://www.attocube.com/en>>. Acesso em: 26/01/2023. 44, 46

- [Bethe 1947]BETHE, H. A. **The Electromagnetic Shift of Energy Levels.** *American Physical Society*, v. 72, 1947. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.339>>. 20
- [Bitter 1931]BITTER, F. **On Inhomogeneities in the Magnetization of Ferromagnetic Materials.** *Physical Review Journal*, v. 38, 1931. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRev.38.1903>>. 21, 22
- [Bruno e Baker 1999]BRUNO, L. C.; BAKER, L. W. **Math and mathematicians : the history of math discoveries around the world.** [s.n.], 1999. Detroit, Mich. : U X L. Disponível em: <<https://archive.org/details/mathmathematicia00brun/page/181/mode/2up>>. Acesso em: 12/12/2022. 18
- [Chang et al. 1992]CHANG, A. M. et al. **Scanning Hall probe microscopy.** *Applied Physics Letters*, v. 19, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.108334>>. 28
- [Coulomb 1785]COULOMB, C. **Mémoires sur l'électricité et la magnétisme.** 1785. Disponível em: <<https://archive.org/details/mmoioressurllectr00coul/page/n7/mode/2up?view=theater>>. Acesso em: 07/12/2022. 16, 17
- [Ding et al. 2018]DING, B. et al. **Crystal-orientation dependence of magnetic domain structures in the skyrmionhosting magnets MnNiGa.** *APL Materials*, v. 6, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.5027800>>. 23
- [Dirac 1927]DIRAC, P. A. M. **The quantum theory of the emission and absorption of radiation.** *The Royal Society*, v. 114, 1927. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0039>>. 20
- [Dyson 1949]DYSON, F. J. **The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger, and Feynman.** *American Physical Society*, v. 75, 1949. Disponível em: <[doi:10.1016/j.jmmm.2010.04.034](https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2010.04.034)>. 20
- [Einstein 1905]EINSTEIN, A. **Zur Elektrodynamik bewegter Körper.** *Annalen der Physik*, v. 4, 1905. Disponível em: <[https://ia600708.us.archive.org/view\\_archive.php?archive=/28/](https://ia600708.us.archive.org/view_archive.php?archive=/28/)>

items/crossref-pre-1923-scholarly-works/10.1002%252Fandp.19123420414.zip&file=10.1002%252Fandp.19133460805.pdf>. 20

[Eletronic-Tutorials 2013]ELETRONIC-TUTORIALS. **Hall Effect Sensor**. 2013. Acessado em 12/01/2023. Disponível em: <<https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>>. 23

[Faraday 1832]FARADAY, M. **V. Experimental Researches in Electricity**. *The Royal Society*, v. 122, 1832. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstl.1832.0006>>. 18, 19

[Faraday 1852]FARADAY, M. **On the Physical Character of the Lines of Magnetic Force**. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, v. 3, p. 401 – 428, 1852. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14786445208647033>>. 21

[Fermi 1932]FERMI, E. **Quantum Theory of Radiation**. *American Physical Society*, v. 4, 1932. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.4.87>>. 20

[Fowler 2008]FOWLER, M. **Historical Beginnings of Theories of Electricity and Magnetism**. 2008. Acessado em 13/01/2023. Disponível em: <[http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more\\_stuff/E&M\\_Hist.html](http://galileoandeinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/E&M_Hist.html)>. 13

[Gilbert 1600]GILBERT, W. **De Magnete, Magnetisque Corporoibus, et de Magno Magnete Tellure: Physiologia noua, Plurimis & Argumentis, & Experimentis Demonstrata (in Latin)**. [s.n.], 1600. Disponível em: <<https://www.gutenberg.org/cache/epub/33810/pg33810-images.html>>. Acesso em: 07/12/2022. 15, 16

[Hale, Fuller e Rubinstein 1959]HALE, M.; FULLER, H.; RUBINSTEIN, H. **Magnetic domain observations by electron microscopy**. *Journal of Applied Physics*, v. 30, n. 5, 1959. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.1735233>>. 23

[Hall 1879]HALL, E. **On a New Action of the Magnet on Electric Currents**. *American Journal of Mathematics*, v. 2, p. 287 – 292, 1879. Disponível em: <[doi:10.2307/2369245](https://doi.org/10.2307/2369245)>. 22

- [Heaviside 1892]HEAVISIDE, O. **XI. On the forces, stresses, and fluxes of energy in the electromagnetic field.** *The Royal Society*, v. 183, 1892. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsta.1892.0011>>. 20
- [Jaklevic et al. 1964]JAKLEVIC, R. C. et al. **Quantum Interference Effects in Josephson Tunneling.** *Physical Review Letters*, v. 12, 1964. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.12.159>>. 24
- [Julliere 1975]JULLIERE, M. **Tunneling between ferromagnetic films.** *Physics Letters A*, v. 54, p. 225 – 226, 1975. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/0375-9601\(75\)90174-7](https://doi.org/10.1016/0375-9601(75)90174-7)>. 25
- [Keithley 2009]KEITHLEY. **Model 6220/6221 Reference Manual.** [S.l.], 2009. Disponível em: <[https://download.tek.com/manual/622x-901-01\(B-Jun2005\)\(Ref\).pdf](https://download.tek.com/manual/622x-901-01(B-Jun2005)(Ref).pdf)>. Acesso em: 26/01/2023. 47, 48
- [Lima et al. 2014]LIMA, E. A. et al. **Scanning magnetic tunnel junction microscope for high-resolution imaging of remanent magnetization fields.** *IOP Science*, v. 25, 2014. Disponível em: <[10.1088/0957-0233/25/10/105401](https://doi.org/10.1088/0957-0233/25/10/105401)>. 30, 34, 35, 44
- [Marcon e Ostanina 2012]MARCON, P.; OSTANINA, K. **Overview of Methods for Magnetic Susceptibility Measurement.** *Research Gate*, 2012. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/267558066\\_Overview\\_of\\_Methods\\_for\\_Magnetic\\_Susceptibility\\_Measurement](https://www.researchgate.net/publication/267558066_Overview_of_Methods_for_Magnetic_Susceptibility_Measurement)>. Acesso em: 18/01/2023. 24
- [Maricourt 1269]MARICOURT, P. **Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt, militem, de magnete.** 1269. Disponível em: <<https://archive.org/details/letterofpetrusp00pierrez/page/n27/mode/2up>>. Acesso em: 07/12/2022. 13, 14
- [Martin e Wickramasinghe 1987]MARTIN, Y.; WICKRAMASINGHE, H. K. **Magnetic imaging by “force microscopy” with 1000 Å resolution.** *Journal of Applied Physics*, v. 50, n. 20, 1987. Disponível em: <<https://doi.org/10.1063/1.97800>>. 6, 26, 27
- [Maxwell 1861]MAXWELL, J. C. **LI. On Physical Lines of Force.** *The Royal Society*, v. 21, 1861. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/14786446108643067>>. 19

- [Maxwell 1865]MAXWELL, J. C. **VIII. A Dynamical Theory of the Electro-magnetic Field.** *The Royal Society*, v. 155, 1865. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008>>. 19
- [MELEXIS s.d]MELEXIS. **What is the Hall-effect?** s.d. Disponível em: <<https://www.melexis.com/en/tech-talks/hall-effect>>. Acesso em: 18/01/2023. 22
- [MicroMagnetics 2007]MICROMAGNETICS. **SJT-010 Magnetic Microsensor with Socket Receptacle.** [S.l.], 2007. Disponível em: <[https://www.micromagnetics.com/docs/STJ-010\\_TMR\\_magnetic\\_microsensor.pdf](https://www.micromagnetics.com/docs/STJ-010_TMR_magnetic_microsensor.pdf)>. Acesso em: 28/03/2023. 38
- [Nature 1876]NATURE. **The Early History of Magnetism.** v. 13, p. 523–524, 1876. Acessado em 13/01/2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/013523a0>>. 13
- [Orsted 1820]ORSTED, H. C. **Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam.** 1820. Disponível em: <[library.si.edu/digital-library/book/experimentacirc00orst](http://library.si.edu/digital-library/book/experimentacirc00orst)>. Acesso em: 07/12/2022. 17, 18
- [Suzuki et al. 2016]SUZUKI, K. Z. et al. **Perpendicular magnetic tunnel junction with a strained Mn-based nanolayer.** *Scientific Reports*, v. 6, 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1038/srep30249>>. 25
- [Tedrow e Meservey 1972]TEDROW, P. M.; MESERVEY, R. **Spin Polarization of Electrons Tunneling from Films of Fe, Co, Ni, and Gd.** *Physical Review B*, v. 7, 1972. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/PhysRevB.7.318>>. 25
- [Thomas, Moyer e Wikswo 1992]THOMAS, I.; MOYER, T.; WIKSWO, J. **High resolution magnetic susceptibility imaging of geological thin sections: Pilot study of a pyroclastic sample from the Bishop Tuff, California, U.S.A.** *Geophysical Research Letters*, v. 19, p. 2139–2142, 1992. Disponível em: <<https://doi.org/10.1029/92GL02322>>. 27, 28
- [Thomson 1857]THOMSON, W. **XIX. On the electro-dynamic qualities of metals:—Effects of magnetization on the electric conductivity of**

**nickel and of iron.** *The Royal Society*, v. 8, 1857. Disponível em: <<https://doi.org/10.1098/rsp1.1856.0144>>. 25