

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS
MATERIAIS**

**DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR
MAGNETOELÁSTICO DE DEFORMAÇÃO**

Eduardo Stimamiglio Bastos

CAXIAS DO SUL

Fevereiro de 2018

EDUARDO STIMAMIGLIO BASTOS

DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR
MAGNETOELÁSTICO DE DEFORMAÇÃO

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de Mestre em Engenharia dos Materiais.

Orientado pelo Prof. Dr. Frank P. Missell.

CAXIAS DO SUL

Fevereiro de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

B327d Bastos, Eduardo Stimamiglio, 1990-
Desenvolvimento e caracterização de um sensor magnetoelástico de
deformação / Eduardo Stimamiglio Bastos. – 2018.
83 f. : il ; 30 cm

Apresenta bibliografia.
Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia e Ciências dos Materiais, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Frank Patrick Missell.

1. Magnetostricção. 2. Materiais. 3. Detectores. I. Missell, Frank
Patrick, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 537.634

Índice para o catálogo sistemático:

1. Magnetostricção	537.634
2. Materiais	620.1
3. Detectores	520.62

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Ana Guimarães Pereira – CRB 10/1460

EDUARDO STIMAMIGLIO BASTOS

**CONSTRUÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE UM SENSOR MAGNETOELÁSTICO
DE DEFORMAÇÃO**

Dissertação apresentada para o Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de mestre em Engenharia dos Materiais.

Orientado pelo Prof. Dr. Frank P. Missell.

Caxias do Sul, 21 de Fevereiro de 2018

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Cristina Bormio-Nunes

Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo – USP

Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauero Clarke

Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS

Prof.^a Dr.^a María Cristina Moré Farias

Universidade de Caxias do Sul – UCS

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, João José Bastos e Maria Inês Stimamiglio Bastos, e toda minha família, pelo constante apoio e incentivo na minha busca pela melhoria e realização profissional e pessoal.

À minha querida Joici Rizzo, por me inspirar a dar o melhor de mim, e pelo apoio moral e espiritual.

Ao meu orientador Prof. Dr. Frank Patrick Missell por me guiar nessa desafiadora jornada em busca de uma melhor formação.

À Prof.^a Dr.^a Cristina Bormio-Nunes por disponibilizar o material necessário para a realização desta dissertação, e pelo valioso conhecimento compartilhado.

Aos professores, Alexandre Viecelli, Eduardo Nabinger, Glaucio Carvalho, pelo apoio à pesquisa realizada, tanto com equipamentos quanto com seus conhecimentos.

Aos colegas do Laboratório de Caracterização Magnética, Alessandro Dalponte, André Luís Possan, Claudia Tormes, Felipe Giroto, Joana Pasquali, Lucas Vieira, Marcia Pozza, Marcele Triaca, Mateus Beltrami, Ricardo Baiotto, Rui Schwanke pelo companheirismo, pela ajuda oferecida e pelos momentos de descontração.

Ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais.

“What was the start of all this?
When did the cogs of fate begin to turn?
Perhaps it is impossible to grasp that answer now,
From deep within the flow of time.

But for a certainty, back then
We loved so many yet hated so much
We hurt others and were hurt ourselves.

Yet even then we ran like the wind
Whilst our laughter echoed
Under cerulean skies....”

Masato Kato - Chrono Cross

RESUMO

Materiais amorfos demonstraram possuir um comportamento magnetomecânico superior ao de qualquer outro material magnético. Isso vêm permitindo sua utilização para um crescente número de finalidades de sensoriamento. A capacidade de interrogar remotamente a frequência de ressonância de fitas de material amorfo através de campos magnéticos permite a aplicação destas como sensores em situações que não permitem acesso direto à superfície de medição. Essa qualidade pode ser útil no monitoramento de *risers* que trazem petróleo do fundo do mar até plataformas na superfície. A frequência de ressonância das fitas amorfas depende, entre outras propriedades, da intensidade do campo magnético no qual estão inseridas. Desta forma, a deformação de um substrato pode ser monitorada através do uso de um transdutor nele colado, o qual se magnetiza à medida que o substrato deforma, conseqüentemente mudando o campo magnético imposto sobre o ressonador e a sua frequência de ressonância. Neste trabalho, a construção de um sensor magnetoelástico de deformação é investigada, onde uma liga policristalina de FeAlB foi utilizada como transdutor, e fitas de materiais amorfos, de nomes comerciais Metglas 2826 MB3 e 1K501, foram utilizadas como ressonadores. A liga de Fe₈₀Al₂₀, com 2%at. de B, mostrou ter uma magnetostricção de 80 ppm, o que inspirou o seu uso como transdutor, o que possibilita a substituição das fitas amorfas utilizadas anteriormente. Uma bancada de testes, capaz de aplicar tensão mecânica a um substrato de latão, foi construída com o objetivo de testar a sensibilidade do sensor magnetoelástico à deformação. Foi observado um comportamento altamente linear da frequência de ressonância do sensor com a tensão aplicada sobre o substrato de latão, com *Gauge Factors* de 120 e 90 para os sensores que utilizaram Metglas 2028 MB3 e 1K501 como ressonadores, respectivamente. Este resultado instigou a exploração da aplicabilidade do sensor magnetoelástico em substratos ferromagnéticos. Por fim, ensaios de tração foram realizados, nos quais a deformação dos substratos de aço SAE 1010 foram monitoradas simultaneamente pelo sensor magnetoelástico e por um *Strain Gauge*. A variação de frequência de ressonância do sensor nestes ensaios apresentou uma forma mais sigmoïdal, com uma região quase linear. O monitoramento de um *riser* com este dispositivo seria factível.

ABSTRACT

Amorphous metals have been shown to have magnetomechanical properties which are superior to those of any other magnetic materials. This has allowed their usage in a growing number of sensing purposes. The capacity of remotely interrogating the resonant frequency of amorphous material stripes through magnetic fields allows their application as sensor in situations that do not allow direct contact with the measurement surface. This quality may be useful for the monitoring of risers that bring petrol from deep sea to platforms on the surface. The resonant frequency of the stripes is a function of, alongside other properties, the intensity of the magnetic field in which they are inserted. Thus, a substrate's deformation may be monitored through the use of a transducer in them affixed, which magnetizes as the substrate deforms, consequently altering the magnetic field imposed over the resonator, and its resonant frequency. In this work, the construction of a magnetoelastic strain sensor is investigated, where a polycrystalline FeAlB alloy was used as transducer, and amorphous materials, by the commercial name of Metglas 2826 MB3 and 1K501, were used as resonators. The $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}$ alloy, with 2% at. B, was shown to have an 80 ppm magnetostriction, which inspired its use as transducer, which enabled the substitution of the amorphous ribbons previously used. A testing bench, capable of applying mechanical stress to a brass substrate, was built with the goal of testing the sensibility of the magnetoelastic sensor to strain. A highly linear behavior of the sensor's resonant frequency to the applied stress on the brass substrate was observed, with Gauge Factors of 120 for the sensors that used Metglas 2826 MB3 and 1K501 as resonators, respectively. This result instigated the exploration of the magnetoelastic sensor's applicability on ferromagnetic surfaces. Finally, mechanical stress tests were conducted, in which the deformation of the SAE 1010 steel substrate were simultaneously monitored by the magnetoelastic sensor, and a Strain Gauge. The resonant frequency of the sensor in this test showed a sigmoidal form, with a nearly linear region. The monitoring of a riser with this device is feasible.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classificação dos efeitos magnetoelásticos no espaçamento interatômico médio e o módulo de elasticidade de acordo com as interações dos spins. Adaptado de O’Handley e Chou (1978)	25
Tabela 2. Descrição dos parâmetros das varreduras de campo realizadas (Fonte: O Autor).	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esquemático das diferentes camadas do riser flexível. Adaptado de GLOBAL CSS INSTITUTE (2011).....	17
Figura 2. Representação esquemática de um ciclo de histerese e do subsequente avanço dos domínios magnéticos. Adaptado de Bertotti (1998).	20
Figura 3. Magnetostricção de um monocristal. Adaptado de Cullity e Grahm (2009). .	23
Figura 4. Efeito da tensão mecânica no comportamento da magnetização M versus campo magnético aplicado H de um material (CULLITY; GRAHAM, 2009).	26
Figura 5. Magnetização de um material de magnetostricção positiva sob tensão. Adaptado de Cullity e Grahm (2009).....	28
Figura 6. a) Influência da adição de boro na magnetostricção longitudinal λ_{long} e transversal λ_{trans} de $(\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20})_{100-x}\text{B}_x$, onde $x = 0,0; 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. b) Efeito da adição de boro na microestrutura do FeAl para os mesmos valores de x. Adaptado de Bormio-Nunes et al. (2012).	30
Figura 7. Curvas de tensão versus deformação para um material magnetoelástico magneticamente saturado, fracamente magnetizado (a) e fortemente magnetizado (b). Adaptado de Cullity e Grahm (2009).	32
Figura 8. Resposta ilustrativa de uma fita magnética. Adaptado de Grimes et al. (1999).	35
Figura 9. Comportamento da frequência de ressonância e amplitude de uma fita magnetoelástica versus campo contínuo magnético contínuo aplicado. Adaptado de Grimes et al. (2012).....	36
Figura 10. Arquitetura básica de um sensor magnetoelástico de deformação. Adaptado de Suess (2011).	37
Figura 11. Alteração da frequência de ressonância com a deformação do transdutor. Adaptado de Suess (2011).	38
Figura 12. a) Componentes do sistema traçador de curvas de histerese. b) Representação esquemática da montagem do sistema traçador de curvas de histerese. (Fonte: O Autor)	43
Figura 13. Programa de coleta de dados das curvas de histerese da Globalmag. (Fonte: O Autor)	43
Figura 14. Curva ΔE obtida de um ressonador de Metglas (Fonte: O Autor).	44

Figura 15. Curva do ΔE composto obtida de um conjunto possuindo Metglas como ressonador e FeAlB como transdutor (Fonte: O Autor).	45
Figura 16. Variação de frequência do sensor com a deformação do substrato (Fonte: O Autor).	46
Figura 17. Elementos construtivos do sensor magnetoelástico de deformação (Fonte: O Autor).	48
Figura 18. Foto da bancada de ensaios de tração utilizada para os ensaios de tração no LCM (Fonte: O Autor).	48
Figura 19. Diagrama esquemático da montagem da bancada de ensaios de tração (Fonte: O Autor).....	49
Figura 20. Conjunto de bobinas utilizados para a excitação das amostras e captação de sinal (Fonte: O Autor).	50
Figura 21. Diagrama esquemático do sistema de captação de dados (Fonte: O Autor). 51	
Figura 22. Equipamentos que compõem o sistema de captação de dados (Fonte: O Autor).	52
Figura 23. Analisador de Rede E5061B (Fonte: O Autor).	52
Figura 24. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados montado com o Analisador de Rede.....	53
Figura 25. Corpo de prova de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor).	55
Figura 26. Esquema representativo dos componentes do ensaio de tração da segunda etapa. (Fonte: O Autor).....	56
Figura 27. Equipamentos utilizados durante a segunda etapa de ensaios de tração (Fonte: O Autor).....	56
Figura 28. a) Transdutor de FeAlB colado na região útil da amostra de aço SAE 1010. b) Strain Gauge colado na superfície contrária da amostra A3. (Fonte: O Autor)	57
Figura 29. Placa de aquisição de dados QuantoX da HBM (Fonte: O Autor)	58
Figura 30. Esquema representativo dos componentes do ensaio de tração da terceira etapa. (Fonte: O Autor).....	58
Figura 31. Forno tubular da Sanchis utilizado na desmagnetização dos transdutores de aço 1010 (Fonte: O Autor).	59
Figura 32. Curva do ΔE composto obtida de um conjunto possuindo Metglas como ressonador e FeAlB como transdutor (DALPONTE; BASTOS; MISSELL, 2016a). ...	60
Figura 33. Ensaio de tensão (a) e ΔE composto (b) para o sensor-Metglas (Fonte: O Autor).	62

Figura 34. Ensaio de tensão (a) e ΔE composto (b) para o sensor-1K501 (Fonte: O Autor).	63
Figura 35. Curva ΔE de uma fita de Metglas (Fonte: O Autor).	65
Figura 36. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)	66
Figura 37. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)	67
Figura 38. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas isolado, e de um ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB em um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor) ...	68
Figura 39. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas isolado, colocado sobre um transdutor de FeAlB, e sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor).....	69
Figura 40. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB e um substrato de aço SAE 1010. (Fonte: O Autor)	69
Figura 41. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB e um substrato de aço SAE 1010. (Fonte: O Autor)	70
Figura 42. Relatório do ensaio de tração das cinco amostras de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor).	71
Figura 43. Varredura de campo H para a amostra da segunda etapa. (Fonte: O Autor). 72	
Figura 44. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico do ensaio de tração do grupo 2 (Fonte: O Autor).	73
Figura 45. Varredura de campo H para a amostra da terceira etapa (Fonte: O Autor)... 74	
Figura 46. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico do ensaio de tração do grupo 3, e a deformação do substrato de aço SAE 1010 captada pelo Strain Gauge (Fonte: O Autor).....	75
Figura 47. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico versus a deformação captada pelo Strain Gauge da amostra A3 (Fonte: O Autor).....	75

NOMECLATURAS

$\alpha_M(T)$ - Expansão térmica anômala

A - Ampere

Al - Alumínio

B - Boro

B - Indução magnética

B^μ - Coeficientes magnetoelásticos para um íon

CCC - Cúbico de corpo centrado

c_μ - Tensor elástico

°C - Grau Celsius

dB - Decibéis

\vec{D}^o - Campo cristalino de um único íon

DOI - Digital Object Identifier

Dy - Disprósio

ε - Deformação

ε_{el} - Deformação elástica

ε_{me} - Deformação magnetostrictiva

E - Módulo de Young

E_H - Módulo de Young para valores abaixo do ponto de saturação

E_M - Módulo de Young para magnetização fixa

E_{me} - Energia magnetoelástica

E_s - Módulo de Young no estado de saturação magnética

E_s - Efeito mórfico

ΔE - Variação do módulo de Young

f_o - Frequência de ressonância medida pelo sensor no estado não tensionado

Δf - Variação total da frequência

Fe – Ferro

Ga - Gálio

GF - Gauge Factor

H - Campo magnético

h - Hora

H_0 - Campo de bias

H_c - Campo coercivo

H_d - Campo desmagnetizante

H_{ext} - Campo no exterior

H_i - Campo no interior

Hz - Hertz

H_a^{eff} - Campo de anisotropia efetivo do material

θ - Orientação da magnetização

I - Indução Magnética

\vec{J}_{ij} - Efeitos de interações de dois íons

K - Constante de anisotropia

k – Kilo

L - Comprimento

l - Comprimento original do material

Δl - Alteração dimensional

λ - Deformações magnetostrictiva

λ_s - Magnetostricção de saturação

μ_0 - Permeabilidade no vácuo

μ_B - Momento magnético de saturação

M - Magnetização

m - Metro

Mo - Molibdênio

M_r - Magnetização remanente

M_s - Magnetização de saturação

N - Fator Desmagnetizante

N_e - Número de espiras da bobina

n - Módulo de vibração do ressonador

n_l - Vetor normal à superfície da amostra

Ni - Níquel

ν - Coeficiente de Poisson

Oe - Oersted

ρ - Densidade

Pa - Pascal

ph - Potencial hidrogeniônico

ppm - Partes por milhão

σ - Tensão mecânica

r - raio interno da bobina

\vec{s}_i - Spin no sentido i

T - Temperatura

T - Tesla

t - Transdutor

Tb - Téribio

T_C - Temperatura de Curie

T_{ij}^{μ} - Coeficientes magnetoelásticos para dois íons

V - Volume

x - Composição

ϕ - Ângulo da deformação em relação ao eixo cristalográfico

ω_s - Interações spin-órbita

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	OBJETIVOS.....	19
2.1	Objetivo Geral.....	19
2.2	Objetivos Específicos	19
3	REFERENCIAL TEÓRICO.....	20
3.1	Histerese Magnética.....	20
3.2	Magnetostricção	22
3.2.1	Magnetostricção de monocristais	22
3.2.2	Origem Física da Magnetostricção	23
3.2.3	Efeito Villari.....	26
3.2.4	Ligas Magnetostrictivas.....	29
3.3	Efeito ΔE	31
3.4	Frequência de Ressonância	34
3.5	Sensores Magnetoelásticos	37
3.5.1	Sensor Magnetoelástico de Deformação	37
3.6	Campo Desmagnetizante	38
3.7	Efeitos de Temperatura e Pressão	40
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1	Materiais	41
4.2	Ensaio de Histerese	42
4.3	Caracterização do Sensores Magnetoelásticos.....	44
4.3.1	Gauge Factor.....	46
4.4	Preparação das Amostras com Substrato de Latão	47
4.5	Bancada de Ensaio de Tração do LCM	48
4.5.1	Sistema de Pesos.....	49

4.5.2	Sistema de Bobinas.....	49
4.5.3	Sistema de Captação de Dados.....	51
4.6	Caracterização das Curvas ΔE	53
4.7	Metodologia dos Ensaios de Tração em Substrato Ferromagnético.....	54
4.7.1	Ensaios de Tração: Primeira Etapa.....	55
4.7.2	Ensaios de Tração: Segunda Etapa.....	55
4.7.3	Ensaios de Tração: Terceira Etapa	57
4.8	Desmagnetização das amostras.....	59
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	60
5.1	Comportamento do Campo H Sobre o Ressonador	60
5.2	Resultados da Bancada de Ensaios de Tração do LCM.....	61
5.3	Caracterização da Curva ΔE	64
5.4	Ensaios de Tração com Substrato de Aço.....	70
5.4.1	Resultado da Primeira Etapa	70
5.4.2	Resultados da Segunda Etapa.....	71
5.4.3	Resultados da Terceira Etapa	73
6	CONCLUSÕES	76
7	PUBLICAÇÕES.....	78
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	79
9	REFERÊNCIAS	80

1 INTRODUÇÃO

Sensores de tensão mecânica são cruciais para o monitoramento e manutenção da integridade estrutural de componentes mecânicos. Sensores clássicos, no entanto, requerem a utilização de cabos, o que implica na necessidade de acesso direto à superfície de medição. Para possibilitar o monitoramento de componentes cujas superfícies são inacessíveis, surge a necessidade do desenvolvimento de um sensor de deformação remotamente acessado.

A Petrobras utiliza dutos de petróleo chamados *risers* flexíveis, Figura 1, os quais são compostos por múltiplas camadas, para recolher o petróleo do leito oceânico para as plataformas. Duas das principais camadas que compõem o *riser* são: a camada externa polimérica de estanqueidade, que protege as outras camadas da atmosfera marinha; e a armadura de tração, composta por uma série de fios de aço SAE 1060 entrelaçados em forma helicoidal, que proporciona resistência mecânica sem comprometer a flexibilidade do duto (TECHNIP, 2017). A camada polimérica impossibilita o monitoramento da camada de tração por métodos convencionais, o que reforça a demanda por um método de sensoriamento de deformação de acesso remoto.

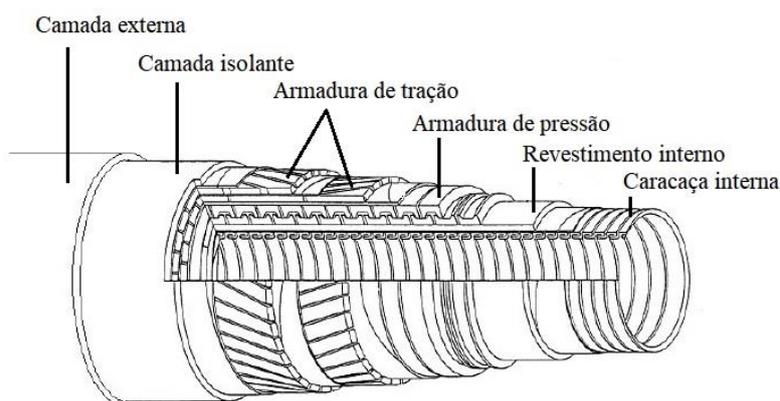


Figura 1. Diagrama esquemático das diferentes camadas do *riser* flexível. Adaptado de GLOBAL CSS INSTITUTE (2011)

Fitas metálicas amorfas vêm sendo utilizadas em uma série de aplicações de sensoriamento, tais como biosensores (HORIKAWA et al., 2015; CHAI, 2014; POSSAN

et al, 2016; MENTI et al. 2017, POZZO et al, 2017), fitas antifurto (HERZER, 2013), sensores de pressão, temperatura, viscosidade de líquidos (GRIMES, 1999), e de pH (CHAI; GRIMES, 2000). Esta ampla possibilidade de aplicações é consequência das propriedades magnetostrictivas dessas fitas amorfas, as quais causam uma alteração dimensional na fita quando exposta a um campo magnético e, inversamente, alteram sua magnetização quando sofrem deformações mecânicas elásticas. Outro efeito da magnetostrictão é uma alteração do módulo de Young da fita exposta a um campo magnético, fenômeno denominado Efeito ΔE . As fitas amorfas são, portanto, excelentes candidatos para compor sensores magnetoelásticos, os quais serão descritos em detalhe neste documento.

Suess (2011) descreveu em sua patente a montagem de um sensor magnetoelástico de tensão que poderia ter aplicação no monitoramento de *risers*. Ele não especificou, no entanto, os materiais dos quais este sensor seria composto. Há assim a necessidade de explorar os diferentes materiais (DALPONTE; BASTOS; MISSELL, 2016a) que podem servir tanto como ressonador quanto transdutor.

Esta dissertação se focará na determinação e caracterização de materiais adequados a esse fim, bem como na melhora do sistema de excitação e medição dos sensores já existentes no laboratório.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de um sensor magnetoelástico de deformação remotamente acessado utilizando uma liga metálica de ferro, alumínio e boro como transdutor e uma liga metálica amorfa como ressonador.

2.2 Objetivos Específicos

Determinação e caracterização de materiais adequados, selecionados pelas suas qualidades magnéticas e magnetostrictivas, para compor protótipos do sensor magnetoelástico de deformação.

Testar a funcionalidade do sensor em substratos ferromagnéticos para comprovar sua aplicabilidade *risers*, em situações normais de temperatura e pressão.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para melhor elucidar o funcionamento do sensor magnetoelástico, é necessária a compreensão de algumas propriedades físicas relevantes às fitas amorfas e cristalinas. Esta seção irá explicar de forma sucinta, conceitos importantes, como os ciclos de histerese magnética, a magnetostricção, frequência de ressonância e efeito ΔE .

3.1 Histerese Magnética

O estudo do fenômeno da histerese magnética é fundamental para a compreensão do comportamento dos materiais ferromagnéticos, pois a sua observação fornece informações como remanência, campo coercivo e magnetização de saturação. Este ciclo, esquematizado na Figura 2, é obtido com a aplicação de um campo magnético H cíclico em uma amostra, e com o registro da consequente mudança de indução magnética B ou magnetização M na direção do campo.

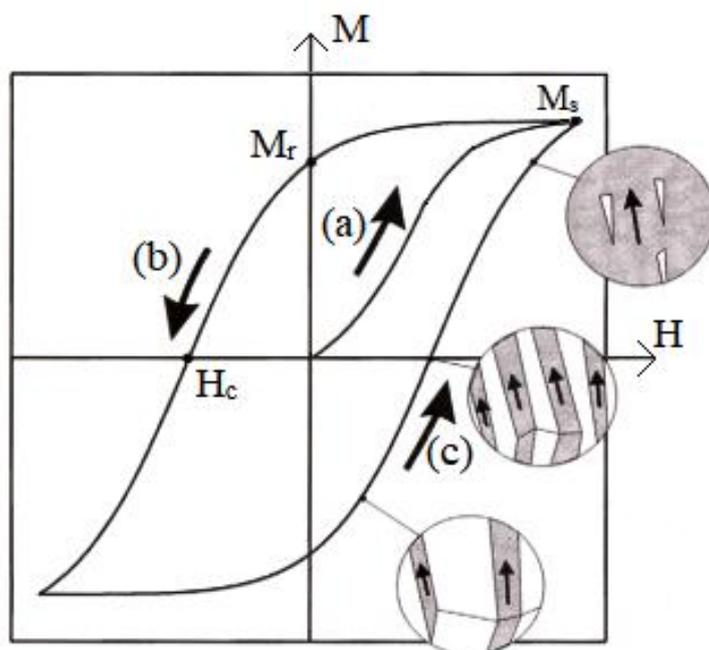


Figura 2. Representação esquemática de um ciclo de histerese e do subsequente avanço dos domínios magnéticos. Adaptado de Bertotti (1998).

H e B estão associados pela equação 1, onde μ_0 é a permeabilidade do vácuo, que tem um valor constante de $4\pi \times 10^{-7}$ Tm/A (BERTOTTI, 1998).

$$B = \mu_0(H + M) \quad (1)$$

O estado magnético de um material é definido pela sua magnetização M , a qual mede o momento magnético médio por unidade de volume. A orientação média desses momentos define a direção de magnetização do material. Adicionalmente, os materiais magnéticos são subdivididos em regiões, chamadas de domínios magnéticos, cujos momentos magnéticos se encontram alinhados em uma determinada direção.

As várias formas observadas dos ciclos de histerese são consequência direta da variedade de possíveis estruturas dos domínios magnéticos. A variação do campo magnético H com o tempo provoca um rearranjo da estrutura de domínios, principalmente através do movimento das superfícies de interface entre os domínios magnéticos, denominadas paredes de domínio. Os domínios com M apontando na direção de H são energeticamente favorecidos e tendem a se expandir, enquanto os domínios com direção de M ortogonal à H diminuem até desaparecer, como pode ser observado nos detalhes da Figura 2 (BERTOTTI, 1998).

É importante observar que o ciclo de histerese não é, em si, uma propriedade do material, mas sim o resultado de um conjunto de propriedades que se manifestam durante a sua medição. Acompanhar o avanço da curva de histerese enquanto ela se forma, ajuda a elucidar como as diferentes características do material podem ser extraídas do ciclo de histerese.

À medida que a intensidade de um campo H aplicado sobre uma amostra de material magnético inicialmente não magnetizada aumenta, a curva na Figura 2(a) é percorrida no sentido indicado. A magnetização atinge então, um valor máximo, chamado de magnetização de saturação M_s . Quando a intensidade de H é novamente reduzida a zero, o material percorre a curva (b), e retém uma magnetização remanente M_r . Se H for então aplicado no sentido inverso, a magnetização do material é reduzida a zero quando H atinge um valor denominado campo coercivo H_c . Adicionalmente, características como

inclinação e formato da curva oferecem informações como permeabilidade μ e constante de anisotropia K (BERTOTTI, 1998).

3.2 Magnetostricção

Materiais magnetostrictivos são aqueles nos quais uma alteração dimensional é observada quando imersos em um campo magnético em temperatura constante. Para distinguir essa alteração dimensional daquela originada por forças mecânicas, definidas pela variável ε , a notação λ será utilizada para referenciar deformações magnetostrictivas, conforme definida pela equação 2.

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

Onde l representa o comprimento inicial do material sem campo aplicado, e Δl , sua alteração dimensional. O valor de λ medido quando o material se encontra magneticamente saturado é denominado magnetostricção de saturação λ_s . A magnetostricção é uma medida adimensional que apresenta valores comumente na ordem de 10^{-5} para metais puros (CULLITY; GRAHAM, 2009).

O processo de magnetostricção ocorre principalmente por dois mecanismos: o deslocamento de paredes de domínios magnéticos e rotação desses domínios, sendo o último mecanismo o responsável pelas maiores alterações dimensionais (CULLITY; GRAHAM, 2009).

3.2.1 Magnetostricção de monocristais

A partir da observação da mudança dimensional de um monocristal de ferro quando magnetizado na direção cristalográfica $[100]$, é possível inferir que a sua célula unitária não é perfeitamente cúbica, mas sim tetragonal. A Figura 3 exemplifica a magnetostricção com base em quatro conjuntos de domínios, $[100]$, $[\bar{1}00]$, $[010]$ e $[0\bar{1}0]$.

As células unitárias presentes em cada domínio, representadas por linhas pontilhadas, têm seu tamanho relativo e tetragonalidade amplamente exagerados. É importante notar que na Figura 3(a), em cada domínio, o comprimento das células unitárias é maior na direção da magnetização de saturação local do que na direção perpendicular à mesma. Assim, à medida que as paredes de domínio se movem e mais regiões passam a ser ocupadas por um domínio $[100]$, como em (b), essas regiões devem expandir na direção da magnetização induzida M , paralela ao campo magnético H . Dessa forma o cristal expande do comprimento l para $l + \Delta l$. Essas considerações são verdadeiras para materiais de magnetostricção positiva, ou seja, materiais em que uma variação dimensional positiva é observada na direção do campo aplicado.

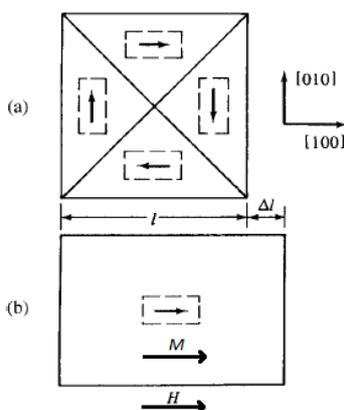


Figura 3. Magnetostricção de um monocristal. Adaptado de Cullity e Graham (2009).

Adicionalmente, é importante notar que apenas movimentos de 90° na direção de magnetização dos domínios causam alterações no comprimento do material, diferente de movimentos de 180° . Isso se deve à simetria dos domínios, que leva a uma situação geometricamente idêntica no segundo caso (CULLITY; GRAHAM, 2009).

3.2.2 Origem Física da Magnetostricção

De acordo com O'Handley e Chou (1978), spins de diferentes sítios i e j da célula unitária de um material magnético podem interagir isotropicamente entre si, dando origem a propriedades escalares tais como o momento magnético de saturação μ_B e

temperatura de Curie T_C . Eles também podem interagir de maneira não isotrópica, dando origem a propriedades como a constante de anisotropia K . Informações adicionais podem ser obtidas pela investigação das derivadas dessas interações em relação à deformação: o que acontece a μ_B , T_C e K quando o material é deformado ou, inversamente, como as propriedades elásticas do material são afetadas pelas interações magnéticas.

A estrutura cristalina de ligas metálicas amorfas não possui periodicidade de longo alcance e pode, portanto, ser macroscopicamente consideradas como materiais isotrópicos. Consequentemente, propriedades como K e sua derivada na deformação são significativamente simplificadas, de forma que estas ligas podem ter o impacto de sua composição nas suas propriedades magnéticas estudado sem a interferência de transformações de fase.

Entre os autores mais destacados neste assunto estão Lacheisierie e Callen. Pelo seu tratamento mais focado em materiais amorfos, optamos pela aproximação de Callen, via o artigo de O’Handley, para o desenvolvimento formal da origem dos efeitos magnetoelásticos. Segundo a análise realizada por Callen (apud O’HANDLEY; CHOU, 1978), a Hamiltoniana apropriada que contém termos magnéticos e elásticos pode ser expressada pela equação 3:

$$H = \vec{s}_i \cdot \vec{J}_{ij}^o \cdot \vec{s}_j + \vec{s}_i \cdot \vec{D}^o \cdot \vec{s}_i + \varepsilon_\mu \vec{s}_i \cdot \frac{\partial \vec{J}_{ij}}{\partial \varepsilon_\mu} \cdot \vec{s}_j + \varepsilon_\mu \vec{s}_i \cdot \frac{\partial \vec{D}}{\partial \varepsilon_\mu} \cdot \vec{s}_i + \frac{1}{2} c_\mu \varepsilon_\mu^2 \quad (3)$$

Onde \vec{s}_i é o spin no sentido i , c_μ é o tensor elástico, e ε_μ é a deformação. Os termos contendo \vec{J}_{ij} e \vec{D}^o descrevem os efeitos de interações de dois íons e o campo cristalino de um único íon. As derivadas pela deformação, vistas nas equações 4 e 5, definem os coeficientes magnetoelásticos para dois íons, T_{ij}^μ , e para um íon, B^μ .

$$\frac{\partial \vec{J}_{ij}}{\partial \varepsilon_\mu} \equiv -T_{ij}^\mu \quad (4)$$

$$\frac{\partial \vec{D}}{\partial \varepsilon_\mu} \equiv -B^\mu \quad (5)$$

Minimizando a energia livre com relação a ε_μ resulta na deformação de equilíbrio, vista na equação 6.

$$\varepsilon_\mu \approx \sum_{ij} T_{ij}^\mu \langle \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \rangle + \sum_{ij} T_{ij}^\mu \langle s_i^z \cdot s_j^z \rangle + \sum_i B^\mu \langle \vec{s}_i^2 \rangle + \sum_i B^\mu \langle (s_i^z)^2 \rangle \quad (6)$$

Os elementos dentro dos *brackets* indicam os valores esperados dos operadores.

A Tabela 1 classifica os efeitos magnetoelásticos na distância interatômica média e no módulo elástico em termos das funções de correlação de spin isotrópico e anisotrópico. Os efeitos isotrópicos se originam de interações de Coulomb e interações interatômicas isotrópicas, enquanto os efeitos anisotrópicos surgem principalmente das interações spin-órbita, ω_s . As variáveis das quais estes efeitos são dependentes são: temperatura T , composição x , indução magnética B a orientação do eixo longo da amostra θ , e o ângulo dos momentos magnéticos em relação ao eixo cristalográfico ϕ (O'HANDLEY; CHOU, 1978).

Tabela 1. Classificação dos efeitos magnetoelásticos no espaçamento interatômico médio e o módulo de elasticidade de acordo com as interações dos spins. Adaptado de O'Handley e Chou (1978)

	Isotrópico $\langle \vec{s}_i \cdot \vec{s}_j \rangle, \langle \vec{s}_i^2 \rangle$	Anisotrópico $\langle s_i^z \cdot s_j^z \rangle, \langle (s_i^z)^2 \rangle$
Espaçamento interatômico médio	Magnetostricção volumétrica Espontânea: $\omega_s(T)$ Forçada: $\frac{1}{V} \frac{\partial V}{\partial H}$ Expansão térmica anômala: $\alpha_M(T)$	Magnetostricção linear: $\lambda_s = \frac{1}{l} \Delta l(\theta, \phi, T)$ Deformação magnetostrictiva: $\lambda_s = \frac{1}{l} \Delta l(B, \theta, \phi, T)$
Módulo elástico	Anomalias no módulo: $B(T), B(x)$	Contribuição da Magnetostricção para E: $E_s(\theta, \phi, T)$ Efeito ΔE : $E_s(B, \theta, \phi, T)$

Uma discussão mais aprofundada das consequências das interações de spin nas propriedades macroscópicas do material foi conduzida por O'Handley e Chou (1978).

3.2.3 Efeito Villari

A existência de magnetostricção implica que uma tensão mecânica aplicada pode alterar a estrutura de domínios e criar uma nova fonte de anisotropia magnética, fenômeno denominado efeito Villari. Essa alteração pode causar mudanças consideráveis sobre propriedades magnéticas como permeabilidade e remanência. Materiais com magnetostricção positiva se alongarão na direção do campo aplicado quando magnetizados. Da mesma forma, quando tensão mecânica normal de tração é aplicada, a qual também tende a alongar o material, haverá um aumento de sua magnetização na direção da tensão aplicada (CULLITY; GRAHAM, 2009).

A Figura 4 exemplifica a curva de magnetização de um material hipotético. Observa-se que, se um campo H produz a magnetização do ponto (A) com nenhuma tensão mecânica de tração σ aplicada, a aplicação de σ_1 aumentará a magnetização para a do ponto (B), com um campo constante. A remanência terá um comportamento semelhante, aumentando de C para D com a aplicação de tensão. Quando a magnetização é nula, no entanto, o aumento da tensão não causará uma variação na magnetização do material, como mostrado pela intersecção de ambas as linhas na origem.

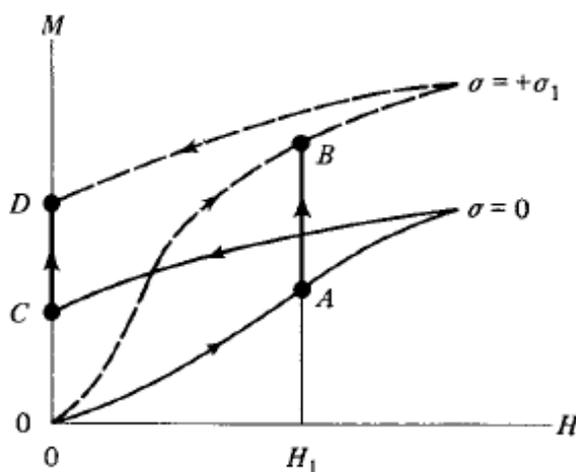


Figura 4. Efeito da tensão mecânica no comportamento da magnetização M versus campo magnético aplicado H de um material (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Para o exemplo da Figura 4 foi assumido que H , M e σ encontravam-se todos em uma única direção. No entanto, em muitas situações M e σ não são paralelos. Se torna

necessária dessa forma, uma relação entre a direção de magnetização de saturação M_s de cada domínio e a direção e magnitude da tensão σ aplicada (CULLITY; GRAHAM, 2009).

A equação 7, a qual pode alternativamente ser escrita como a equação 8, apresenta uma relação para essas duas variáveis através da energia magnetoelástica E_{me} . Esta última pode ser compreendida como o trabalho realizado pela tensão σ para alterar a direção da magnetização M do material, armazenada na forma de energia nos seus domínios magnéticos. Essa equação é comumente utilizada para determinar o efeito da tensão no comportamento magnético dos domínios. E_{me} é proporcional ao produto entre a magnetostricção de saturação λ_s e σ , ou seja, quando o ângulo θ entre σ e M é de 90° , a energia magnetoelástica é máxima, e quando o ângulo é 0° ou 180° , a energia é mínima. É importante atentar para o fato que essa equação considera a hipótese de uma magnetostricção isotrópica do material.

$$E_{me} = -\frac{3}{2}\lambda_s\sigma\cos^2(\theta) \quad (7)$$

$$E_{me} = \frac{3}{2}\lambda_s\sigma\sin^2(\theta) \quad (8)$$

Os domínios magnéticos sempre tendem se posicionar de forma a alcançarem um mínimo de E_{me} . Uma consequência deste fato é explorado pela Figura 5, que ilustra o motivo pelo qual materiais com magnetostricção positiva são facilmente magnetizados quando tracionados. No caso de o material possuir anisotropia fraca, a direção de M_s será controlada principalmente pela tensão mecânica aplicada. Essa tensão causará um movimento das paredes de domínio de forma a diminuir o volume dos domínios cuja magnetização é perpendicular ao eixo da tensão, pois estes possuem uma alta E_{me} , como visto na Figura 5b.

Em um determinado valor de σ , todos os domínios perpendiculares à tensão tratativa são eliminados, como na Figura 5c, e E_{me} chega a um valor mínimo. Nesse estado, um valor muito menor de campo é necessário para saturar a amostra, pois a transição da Figura 5c para 4d pode ser alcançada por movimentos de 180° dos domínios, que são

mais facilmente realizados que movimentos de 90° . Nessas condições, um valor infinitesimal de campo bastaria para saturar a amostra.

O exemplo da Figura 5 considera um material hipotético com uma rede cristalina perfeita. Em materiais reais, no entanto, imperfeições presentes na rede cristalina dificultam o movimento das paredes de domínio. Como consequência, tensões mecânicas maiores são necessárias para alinhar os momentos da amostra.

Naturalmente, campos maiores são necessários para magnetização do material na prática devido a falhas e inclusões que impedem o movimento de paredes de domínio, bem como a existência da anisotropia de forma no material (CULLITY; GRAHAM, 2009).

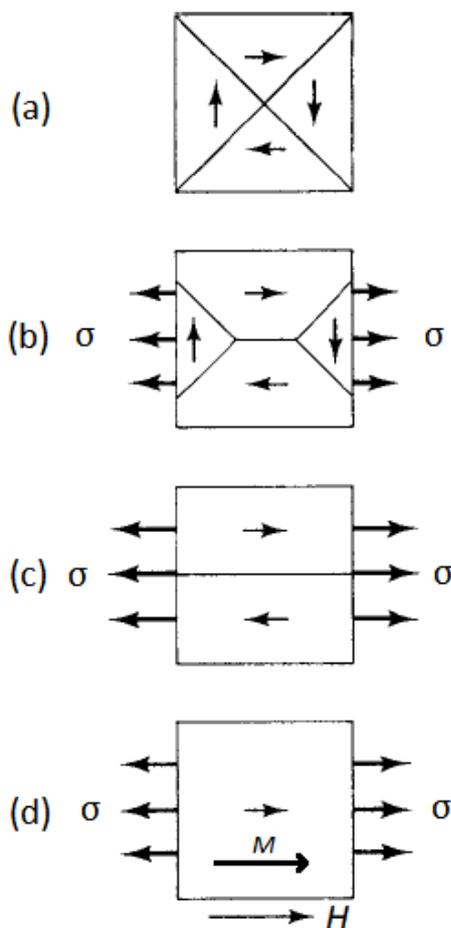


Figura 5. Magnetização de um material de magnetostricção positiva sob tensão. Adaptado de Cullity e Grahm (2009).

3.2.4 Ligas Magnetostrictivas

Os efeitos descritos nas seções anteriores são explorados pelos transdutores magnetostrictivos, capazes de converter energia elétrica em energia mecânica, e vice-versa. Materiais magnetostrictivos são também fundamentais na confecção dos sensores magnetoelásticos, como será explicado em maior detalhe nas seções subsequentes.

Atualmente, esses transdutores são frequentemente fabricados utilizando um composto de ferro e terras raras de composição aproximada de $Tb_3Dy_7Fe_{19}$. Este composto, conhecido como Terfenol-D, tem uma magnetostricção de saturação maior que 10^{-3} , e é saturado em campos de 1000 Oe, ou 79,7 kA/m (CULLITY; GRAHAM, 2009). A necessidade de terras raras, no entanto, encarece sua produção, o que trouxe interesse no desenvolvimento de ligas mais baratas com propriedades similares.

Por sua acessibilidade e baixos custos, diferentes ligas a base de ferro vêm sendo consideradas para este fim, e identificar essas ligas requer estudos da influência de elementos de liga na magnetostricção do Fe. Dentre as numerosas ligas ferrosas magnetostrictivas, duas delas apresentam valores altos de magnetostricção e boa resistência mecânica: FeAl e FeGa (~19-20% at. Al e Ga) (O'HANDLEY, 2000).

O foco na utilização da liga de FeAl, e no estudo de métodos para o aumento do sua magnetostricção, são de interesse devido ao preço do Ga ser 7,5 vezes maior do que o preço do alumínio. Além disso, alumínio é consideravelmente mais abundante que gálio (BORMIO-NUNES et al., 2012).

Um estudo dos efeitos da adição de boro na magnetostricção da liga $(Fe_{80}Al_{20})_{100-x}B_x$, para $0 \leq x \leq 2$ pode ser encontrada na Figura 6(a) (BORMIO-NUNES et al., 2012). Neles, a magnetostricção é apresentada na unidade “partes por milhão”, ou ppm, uma unidade adimensional de deformação específica equivalente a 10^{-3} mm/m, ou 10^{-4} %. A liga $Fe_{80}Al_{20}$ apresentou uma magnetostricção total de aproximadamente 40 ppm, e com a adição de até 2% de boro, λ_{total} aumentou para 78 ppm longitudinalmente ao campo magnético aplicado. Estes valores são bastante expressivos quando comparados com um monocristal de Fe, por exemplo, que possui magnetostricção de 21 ppm (CULLITY; GRAHAM, 2009).

Na Figura 6(b), microestruturas do FeAl com adições de boro nas mesmas proporções anteriormente descritas podem ser observadas. Para $x = 0$, a matriz apresenta uma mistura de Fe_3Al (FCC) e da solução sólida de fase α (CCC). Com a adição de boro, a microestrutura apresenta uma matriz dendrítica de Fe_3Al com uma fase interdendrítica de $\alpha\text{-Fe}_3\text{Al}$, e um microconstituente de Fe_2B e matriz eutético entre os grãos.

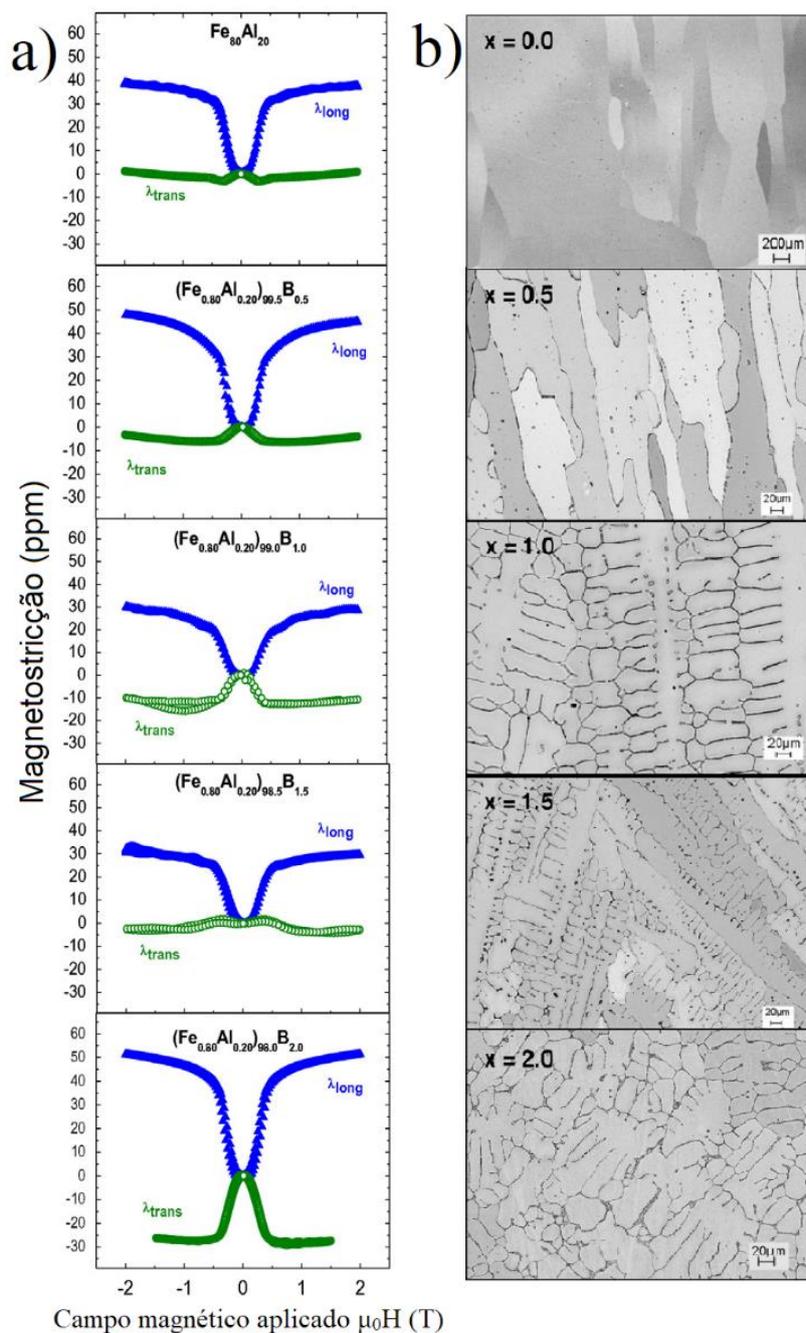


Figura 6. a) Influência da adição de boro na magnetostricção longitudinal λ_{long} e transversal λ_{trans} de $(\text{Fe}_{0.80}\text{Al}_{0.20})_{100-x}\text{B}_x$, onde $x = 0,0; 0,5; 1,0; 1,5$ e $2,0$. b) Efeito da adição de boro na microestrutura do FeAl para os mesmos valores de x . Adaptado de Bormio-Nunes et al. (2012).

Todas as fases presentes contribuem positivamente para a magnetostricção, com a fase Fe₂B apresentando uma magnetostricção menor que as outras fases, de aproximadamente 30 ppm. A presença do boro, no entanto, estabiliza a fase α -FeAl, que gera uma razão mais proporcional entre Fe₃Al e α -FeAl, e contribui para o aumento da magnetostricção total.

Para adições de boro de 2%, um aumento do parâmetro de rede foi observado para as fases Fe₃Al e α -FeAl. O aumento desta distorção tetragonal pela introdução de átomos intersticiais também teve um efeito positivo na magnetostricção do material (BORMIONUNES et al., 2012).

Em vista do baixo custo desta liga, e sua alta magnetostricção, a liga FeAlB foi selecionado para ser utilizada como transdutor no desenvolvimento dos sensores de deformação remotamente acessados.

3.3 Efeito ΔE

Há uma dependência do módulo de Young E de um material magnético com o seu estado de magnetização, sendo esta relação consequente também da magnetostricção. O módulo de Young do material aumenta em um valor ΔE quando o material muda de um estado não magnetizado para um de saturação magnética (CULLITY; GRAHAM, 2009). A atuação desse fenômeno será explorada nesta seção.

Dois tipos de deformação ocorrem quando um material magnetostrictivo é tensionado: deformação elástica ε_{el} e deformação magnetostrictiva ε_{me} . A primeira ocorre em todos os materiais, magnéticos ou não. A segunda é consequência da reorientação dos domínios provocada pela tensão aplicada, de acordo com o efeito explicado no item anterior. A deformação total do material, ε , é descrita então pela equação 9 (CULLITY; GRAHAM, 2009).

$$\varepsilon = \varepsilon_{el} + \varepsilon_{me} \quad (9)$$

A Figura 7 ilustra a diferença entre ϵ_{el} e ϵ_{me} com três curvas tensão *versus* deformação. A reta representa um material magneticamente saturado na direção da deformação, no qual apenas deformação elástica ocorre. A curva (a) representa um material com anisotropia forte, de forma que a energia necessária para alinhar seus momentos magnéticos na direção da tensão mecânica aplicada é maior do que para o material da curva (b).

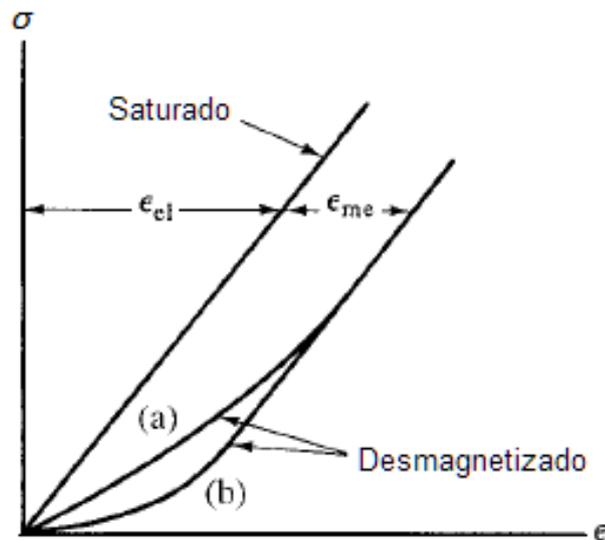


Figura 7. Curvas de tensão versus deformação para um material magnetoelástico magneticamente saturado, fracamente magnetizado (a) e fortemente magnetizado (b). Adaptado de Cullity e Graham (2009).

Na curva (b) da Figura 7, a deformação magnetoelástica máxima é alcançada em valores baixos de tensão, e a curva se torna então paralela àquela do material saturado. Já em (a), a anisotropia forte se opõe a reorientação dos domínios, fazendo com que a deformação magnetoelástica máxima seja alcançada somente em valores mais altos de tensão.

A deformação magnetostrictiva de um material com aplicação de campo perpendicular ao seu eixo fácil é descrita pela equação 10, onde λ_s é a magnetostricção de saturação do material e θ é o ângulo entre a M e a direção de ϵ .

$$\epsilon_{me} = \frac{3}{2} \lambda_s \left[\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right] \quad (10)$$

De forma que, se expandirmos as deformações elástica e magnetostrictiva na equação 8, obtemos a equação 11. Ela expressa a deformação total que uma amostra ferromagnética sofre, ε , durante o regime de elástico, levando em conta a contribuição da magnetostricção (O'HANDLEY, 2000).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_S} + \frac{3}{2} \lambda_S \left[\cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right] \quad (11)$$

Onde E_S representa o módulo de Young para magnetização fixa (sem contribuição magnética) que controla puramente a deformação elástica. A segunda parte da equação retorna a contribuição magnetoelástica para a deformação total. O cosseno do ângulo, $\cos(\theta)$, também pode ser expresso como uma fração do campo aplicado H pelo campo necessário para alcançar a anisotropia magnética, H_a^{eff} , dada pela equação 12.

$$\cos \theta = \frac{H}{H_a^{eff}} \quad (12)$$

Na equação 13, H_a^{eff} é o campo de anisotropia efetivo do material, que leva em conta a contribuição da tensão σ aplicada para girar os momentos na direção da magnetização.

$$H_a^{eff} = H_a - \frac{3\lambda_s \sigma}{M_s} \quad (13)$$

Derivando a equação 11 em relação à tensão aplicada no material, encontramos a equação 14 para o comportamento do módulo de Young:

$$\frac{1}{E_H} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial \sigma} = -\frac{3\lambda_s H^2}{(H_a^{eff})^3} \frac{\partial H_a^{eff}}{\partial \sigma} \quad (14)$$

Onde E_H representa o módulo de Young para valores abaixo do ponto de saturação. Usando equação 13 para a dependência de H_a^{eff} com a tensão σ obtemos a equação 15, que descreve a variação do módulo de Young, onde E_s é o módulo de Young no estado de saturação magnética (O'HANDLEY, 2000).

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{9\lambda_s^2 H^2}{M_s H_a^3} E_s \quad (15)$$

3.4 Frequência de Ressonância

Quando um campo magnético alternado é imposto sobre um material magnetostrictivo, este tende a vibrar na mesma frequência do campo. Quando a frequência de um campo alternado é igual à frequência de ressonância mecânica do material, a conversão de energia magnética em energia elástica é máxima, e o material entra no estado de ressonância magnetoelástica. Para uma fita fina, de comprimento L , densidade ρ e coeficiente de Poisson ν , sua frequência de ressonância é dada pela equação 16. Nesta equação, n é um número inteiro que normalmente assume o valor 1, e representa o modo de vibração fundamentais (LIANG; MORSHED; PROROK, 2007; GRIMES et al., 1999).

$$f_n = \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)}} \frac{n}{2L} \quad (16)$$

Essa função, no entanto, descreve a frequência de ressonância apenas como uma função das propriedades mecânicas do material. Para estender o modelo de forma a abranger a variação da elasticidade com o campo aplicado de acordo com o Efeito ΔE , a equação 15 pode ser inserida na 16, resultando na equação 17. Nessa equação, as contribuições mecânicas (à esquerda) e magnéticas (à direita) encontram-se devidamente separadas (GRIMES et al., 2012).

$$f_n = \frac{\pi}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)}} \left(1 + \frac{9\lambda_s^2 H^2 E}{M_S H_a^3} \right)^{-1/2} \quad (17)$$

Na frequência de ressonância, a alteração de fluxo magnético ao redor da fita também é máxima, de forma que uma bobina imersa nesse fluxo, denominada bobina sensora, ligada a um instrumento de medição, registra um pico de tensão elétrica. A Figura 8 ilustra o resultado da captação de um pico de ressonância magnetoelástica (GRIMES et al., 1999).

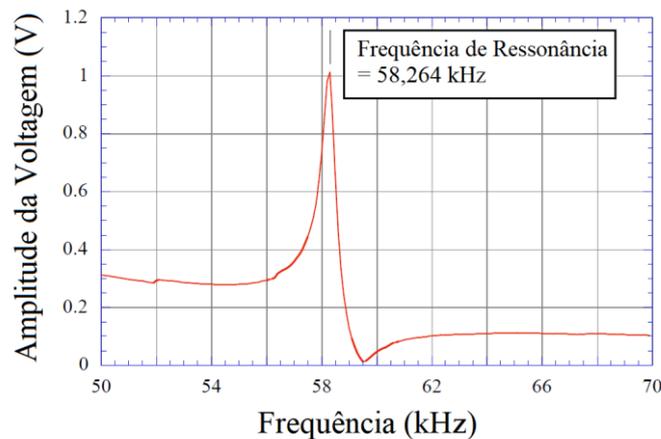


Figura 8. Resposta ilustrativa de uma fita magnética. Adaptado de Grimes et al. (1999).

Observa-se na equação 17, que a frequência de ressonância é uma função, também, do campo magnético contínuo H imposto sobre o material. Por consequência, quando

plotada em função de H , a frequência de ressonância descreve uma curva na forma de um vale, como visto na Figura 9 (GRIMES et al., 2002). Este comportamento é referido como “curva ΔE ”.

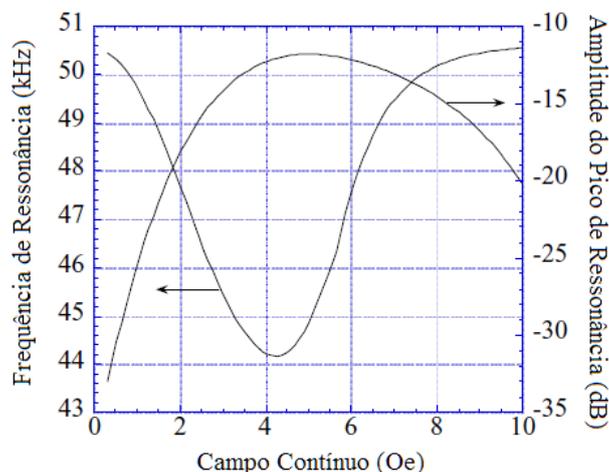


Figura 9. Comportamento da frequência de ressonância e amplitude de uma fita magnetoelástica versus campo contínuo magnético aplicado. Adaptado de Grimes et al. (2012).

As características do vale da curva ΔE são cruciais para a avaliação do funcionamento dos sensores magnetoelásticos, como será discutido em maior detalhe na seção seguinte.

O menor valor do vale ocorre no campo magnético necessário para impor anisotropia magnética no material, chamado de campo de anisotropia, sob o qual a amplitude de resposta é máxima. Após a base do vale, o material encontra-se saturado magneticamente, e sua permeabilidade passa a ser zero. Por consequência, o termo para a contribuição magnética da frequência de ressonância na equação 17 se torna 1, de forma que a frequência de ressonância volta ao valor apresentado antes do vale. Essa transição é teoricamente instantânea, mas, devido a imperfeições nos materiais que impedem um movimento completamente ordenado dos momentos magnéticos, ela se comporta como a subida gradual observada na Figura 9. Ainda assim, a inclinação do vale após o campo de anisotropia é normalmente maior do que a anterior ao campo de anisotropia, dando à curva ΔE uma característica assimétrica, como será exemplificado na seção de resultados e discussões.

Simultaneamente ao vale de frequência, a amplitude da tensão elétrica captada pela bobina sensora apresenta um valor máximo, também observado na Figura 9. Este comportamento é consequência da vibração mecânica da fita, que também alcança uma amplitude máxima na mesma faixa de campo magnético, transformando, assim, uma porção maior do fluxo magnético em energia mecânica. A escala de medição dessa amplitude se dá normalmente em uma unidade arbitrária referente ao aparelho utilizado para a medição. Por isso, o resultado é apresentado em dB, indicando uma intensidade em escala logarítmica.

3.5 Sensores Magnetoelásticos

A dependência da equação 17 para com diversas variáveis, tanto provindas das características mecânicas das fitas finas como do ambiente no qual estão inseridas, permitem a aplicação das fitas em diversos fins de sensoriamento (GRIMES et al., 1999). Entre eles: controle de secagem de materiais cerâmicos (TORMES et al., 2014); detecção de agentes bacterianos (GUNTUPALLI et al., 2011; POSSAN et al., 2016; MENTI et al., 2017); sensores quantitativos de hidrogênio (HÜBERT, 2011); monitoramento de pressão, temperatura, viscosidade de fluidos e de concentração de glicose (GRIMES et al., 1999);

3.5.1 Sensor Magnetoelástico de Deformação

Suess (2011) descreve em sua patente a arquitetura básica de um sensor magnetoelástico de deformação, esquematizado na Figura 10.

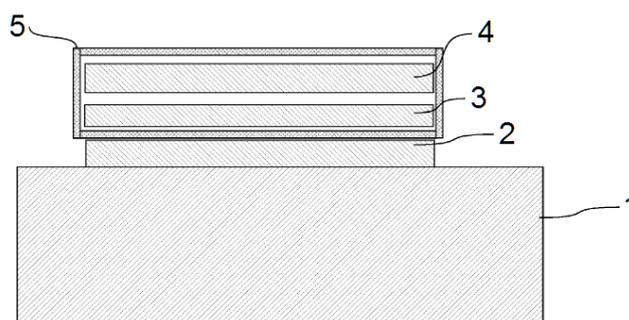


Figura 10. Arquitetura básica de um sensor magnetoelástico de deformação. Adaptado de Suess (2011).

Um transdutor magnetoelástico (2) é colado a um substrato (1). O ressonador (3) e um ímã permanente (4) são depositados sobre o transdutor, de forma que o ressonador esteja imerso tanto no campo magnético do transdutor quanto no do ímã permanente. O invólucro (5) reveste o ressonador e o ímã permanente de forma a que estes componentes mantenham sua posição, mas sem restringir as extremidades do ressonador, permitindo que ele vibre livremente.

À medida que o substrato se deforma, o transdutor colado em sua superfície também se deforma. Por consequência do efeito Villari, a magnitude do campo magnético produzido pelo transdutor é alterada, o que, por sua vez, causa uma alteração da frequência de ressonância do ressonador. Dessa forma, a variação da frequência captada pode ser associada à deformação do substrato, como apresentado na Figura 11 (SUESS, 2011). O campo constante do ímã permanente tem por objetivo definir o ponto de operação do sensor na curva ΔE .

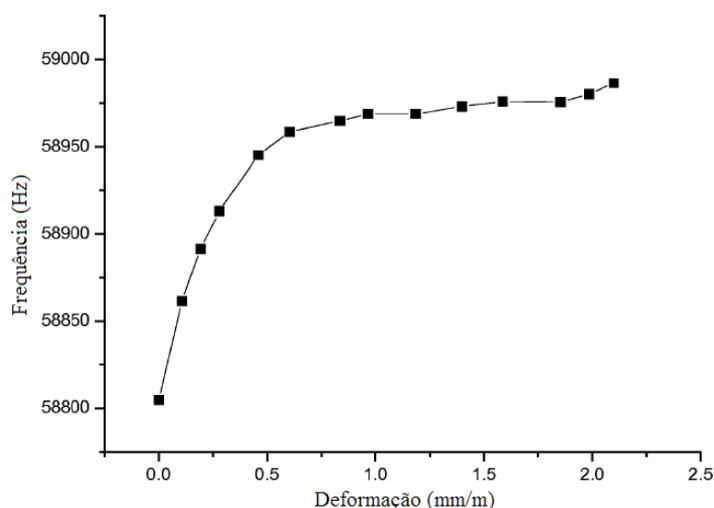


Figura 11. Alteração da frequência de ressonância com a deformação do transdutor. Adaptado de Suess (2011).

3.6 Campo Desmagnetizante

Para uma amostra de material ferromagnético magnetizada, a diferença de polaridade das extremidades da amostra cria um campo magnético em seu interior com

direção contrária à sua magnetização. Consequentemente, o campo em seu interior H_i é menor do que o campo externo H_{ext} aplicado sobre a amostra. Este campo contrário à magnetização da amostra é denominado campo desmagnetizante H_d . Considerando H_{ext} e H_i em uma mesma direção, a relação entre estas variáveis pode ser calculada pela equação 18 (O'HANDLEY, 2000).

$$H_i = H_{ext} + H_d \quad (18)$$

O campo desmagnetizante é uma função da magnetização M da amostra e de sua geometria. A sua forma geral é descrita pela equação 19, onde n é o vetor normal a superfície da amostra. Mas, para uma amostra de formato arbitrário, o campo desmagnetizante para uma determinada direção de M relativa ao eixo da amostra pode ser calculado pela equação 20, onde o vetor n_l é substituído pela constante de proporcionalidade N , denominada fator desmagnetizante, que é uma função da geometria da amostra (O'HANDLEY, 2000).

$$H_d = -M \cdot n_l \quad (19)$$

$$H_d = -N \cdot M \quad (20)$$

Para amostras homogêneas, cuja superfície é definida por uma função de segunda ordem, H_i é constante em todo seu interior, simplificando muito os cálculos de N . Sendo o elipsoide a única geometria finita definida por uma função de segunda ordem, materiais deste formato são frequentemente utilizados na investigação do comportamento de materiais magnéticos (OSBORN, 1945).

Aproximando o formato das fitas utilizadas nesta pesquisa a uma elipsoide com semi-eixos $a \gg b \geq c$, o cálculo do fator desmagnetizante pode ser realizado pela equação 21 (OSBORN, 1945).

$$N = \frac{bc}{a^2} \left[\ln \left(\frac{4a}{b+c} \right) - 1 \right] \quad (21)$$

3.7 Efeitos de Temperatura e Pressão sobre o Sensor Magnetoelástico

Como demonstrado por Grimes et al. (1999), a frequência de ressonância das fitas ressonadoras de Metglas varia linearmente com a temperatura e pressão. Isto se mostra como um desafio para a aplicação dos sensores magnetoelásticos tais como o ambiente marinho, onde há grandes amplitudes de variação térmica e de pressão. Algumas abordagens deste problema serão discutidas nesta seção.

De acordo com Mungle et al. (2002), a variação da frequência de ressonância *versus* temperatura, além de ser linear, tem a uma inclinação dependente do campo magnético contínuo aplicado sobre a fita. Esta inclinação pode ser positiva, negativa ou nula, dependendo da intensidade do campo magnético, de forma que a influência da temperatura sobre a frequência de ressonância pode ser anulada pela escolha correta do ímã permanente utilizado na montagem do sensor.

Alternativamente, a influência da temperatura sobre o resultado do sensor pode ser medida através de um ressonador de referência. Nesta solução, um segundo ressonador, pode ser adicionado à montagem do sensor magnetoelástico, sem um transdutor em sua proximidade. A frequência de ressonância deste segundo ressonador variará somente por consequência da alteração de temperatura, de forma que a variação de frequência obtida observada nele, pode ser subtraída da variação observada no sensor magnetoelástico, anulando o efeito da temperatura.

A cápsula externa que envolve o ressonador, descrita na seção 3.5.1, o isola do ambiente, impedindo que o ressonador entre em contato com qualquer outro elemento que venha a afetar sua frequência de ressonância. Esta cápsula deve ser projetada de acordo com a pressão atmosférica prevista no ambiente em que o sensor será aplicado, de forma que ela não colapse sob pressões altas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Materiais

Suess não especifica quais materiais seriam utilizados em sua patente, havendo então a necessidade de considerar diferentes ligas para a composição dos sensores. Anteriormente, fitas amorfas tratadas termo-magneticamente, foram testadas tanto como transdutores como ressonadores (DALPONTE, 2017) (DALPONTE; BASTOS; MISSELL, 2016a). Entre estas fitas, as que apresentaram os melhores resultados e continuaram a ser usadas como ressonadores nesta pesquisa, foram as fitas metálicas amorfas de nome comercial *Metglas 2826MB3* (ou apenas *Metglas*) e *1K501*. Ambas fitas possuem composição parecida, sendo da *Metglas*: $\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{45}\text{Mo}_7\text{B}_3$, e da *1K501*: $\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{43}\text{Mo}_8\text{B}_4$.

No entanto, os resultados obtidos para os testes de deformação, os quais serão descritos em maior detalhe posteriormente, utilizando fitas amorfas como transdutores, não retornaram resultados lineares. Dessa forma, outros materiais foram considerados para o futuro desenvolvimento da pesquisa.

Neste trabalho, tiras de FeAlB foram testadas como transdutores, tendo em vista sua magnetostricção de 80 ppm, a qual é muito superior à de 12 ppm das fitas amorfas usadas anteriormente. Uma amostra da liga de FeAlB, foi fornecida pela Profa. Cristina Bormio-Nunes da Escola de Engenharia de Lorena da Universidade de São Paulo (EEL – USP), que estuda esta liga pelas suas interessantes características magnetostrictivas (BORMIO-NUNES et al., 2012) (BORMIO-NUNES; DIAS; GHIVELDER, 2013) (BORMIO-NUNES et al., 2013). A amostra foi cortada em quatro tiras de 36 x 8 x 0,7 mm para a utilização como transdutores na realização dos ensaios de tensão. Os resultados obtidos são apresentados na seção “Resultados”.

Para fins de comparação, placas de aço SAE 1010 com o mesmo comprimento e largura que as placas de FeAlB, mas com espessuras de 1,3; 1 e 0,7 mm foram cortadas e preparadas. Além de servir como comparativo para a amostra de FeAlB, estas espessuras foram escolhidas para permitir averiguar o impacto da espessura do transdutor na sensibilidade do sensor.

Ligas de latão e aço foram utilizadas como substrato. O baixo módulo de elasticidade do latão, 78,5 MPa, permitiu testar sua deformação em uma bancada desenvolvida no LCM. As amostras de aço foram posteriormente utilizadas para os testes numa máquina de tração EMIC. Ambos os ensaios realizados e os equipamentos utilizados serão descritos em detalhes na seção seguinte.

Análise químicas por espectroscopia de emissão atômica foram efetuadas em um GD-Profilier 2 da Horiba, para tomar conhecimento da composição exata dos substratos. A análise revelou a presença de 31,202% de Zn, e 68,778% de Cu, 0,018% de Fe, e 0,002% S no substrato de latão. O substrato de aço apresentou os seguintes valores: 99,79% de Fe, e 0,12% de C, 0,04% S, 0,05% P, revelando ter uma composição de acordo com a norma SAE 1010.

4.2 Ensaio de Histerese

A Figura 12(a) mostra os componentes do sistema utilizado para a aquisição de curvas de histerese dos materiais avaliados. O sistema é composto de um traçador de curvas de histerese da Globalmag, referido apenas como traçador, uma bobina primária, e uma bobina secundária. A bobina secundária é inserida dentro da primária, e a amostra a ser analisada, dentro de ambas. O traçador, gera uma corrente de excitação na bobina primária, magnetizando a amostra. A variação de fluxo magnético na bobina secundária é então registrada pelo traçador de histerese, que passa a informação para um computador. A montagem deste sistema é esquematizada na Figura 12(b).

A coleta de dados pelo traçador é controlada por um programa também desenvolvido pela Globalmag, Figura 13, onde os dados recebidos são plotados em tempo real em um gráfico de indução magnética B em função do campo magnético de excitação H .

Os dados coletados são então exportados para o programa Microsoft Excel, onde os cálculos de histerese, permeabilidade magnética μ e magnetização de saturação M_s foram realizados. Os gráficos foram posteriormente refeitos no programa Origin.

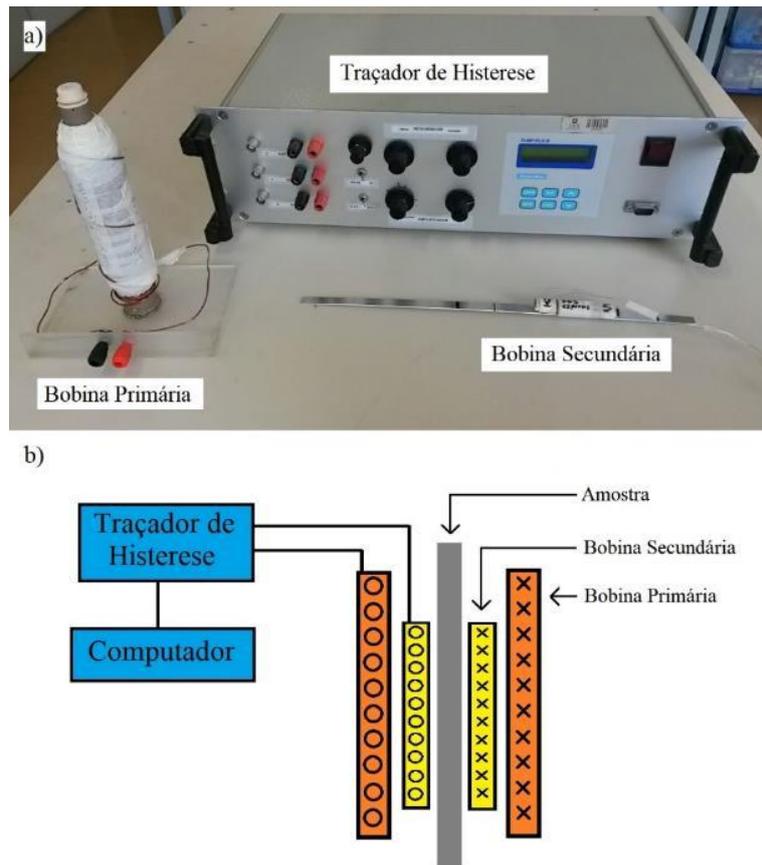


Figura 12. a) Componentes do sistema traçador de curvas de histerese. b) Representação esquemática da montagem do sistema traçador de curvas de histerese. (Fonte: O Autor)

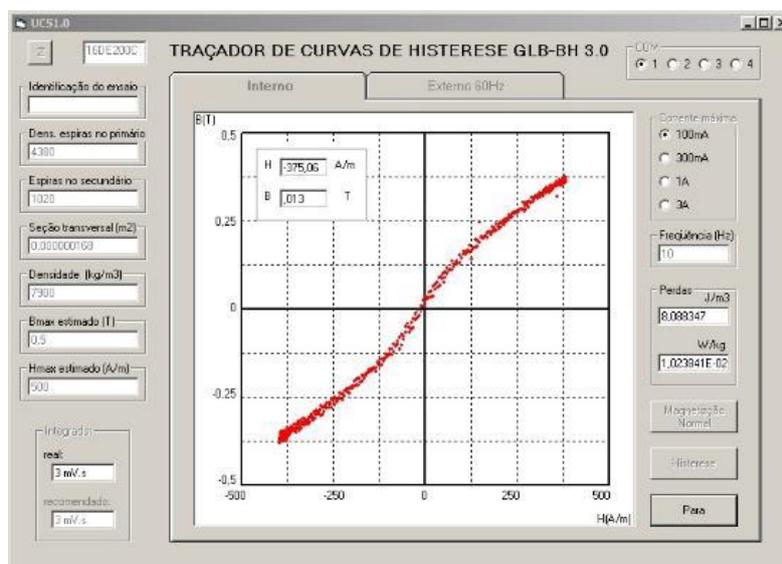


Figura 13. Programa de coleta de dados das curvas de histerese da Globalmag. (Fonte: O Autor)

4.3 Caracterização do Sensores Magnetoelásticos

O processo de caracterização de um sensor objetiva definir o comportamento da frequência de ressonância do sensor de acordo com a deformação do substrato ao qual ele está atrelado. Depois de captada a resposta do sensor, informações como linearidade e sensibilidade são quantificadas através de um fator de medida, comumente chamado de *Gauge Factor*, ou *GF*, o qual será explicado em maior detalhe nesta seção.

O primeiro passo na caracterização dos sensores se dá pela obtenção da curva ΔE do elemento ressonador por meio de uma varredura de campo magnético. Uma curva ΔE obtida para uma fita do material *Metglas* pode ser observada na Figura 14.

A presença do campo do transdutor, no entanto, altera o campo total imposto sobre o ressonador, modificando por consequência a curva ΔE . Torna-se necessário, assim, realizar a varredura de campo com ambos do transdutor e o ressonador presentes dentro das bobinas, originando o gráfico referido como “ ΔE composto”, exemplificado na Figura 15.

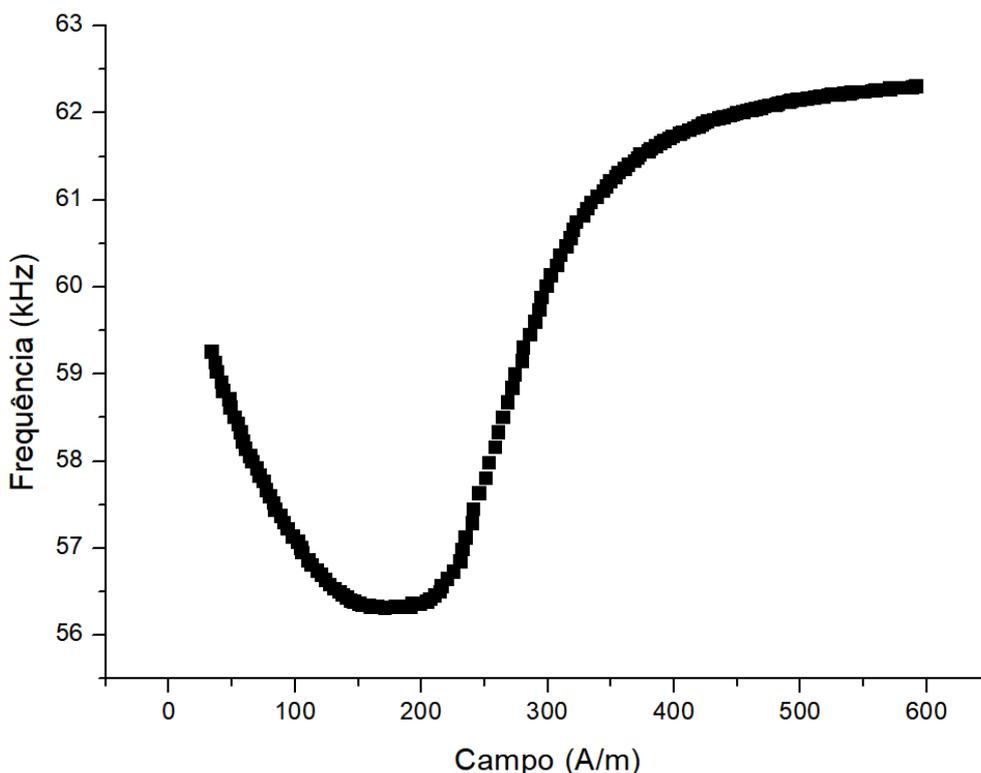


Figura 14. Curva ΔE obtida de um ressonador de Metglas (Fonte: O Autor).

O ΔE composto permite então selecionar um campo contínuo de operação do ressonador, chamado campo de bias, que será mantido durante os subsequentes ensaios de tração. Conforme explicado na seção 3.5.1, a medida que o substrato ao qual o sensor está colado se deforma, o campo imposto sobre o ressonador é alterado, de forma que a seleção de um ponto de comportamento aproximadamente linear da curva confere um comportamento linear ao sensor durante o ensaio de tração. O ponto de operação é preferencialmente selecionado após o vale, pois, como explicado no item 3.3, a inclinação nesta faixa é maior do que aquela antes do vale, conferindo assim maior sensibilidade ao sensor.

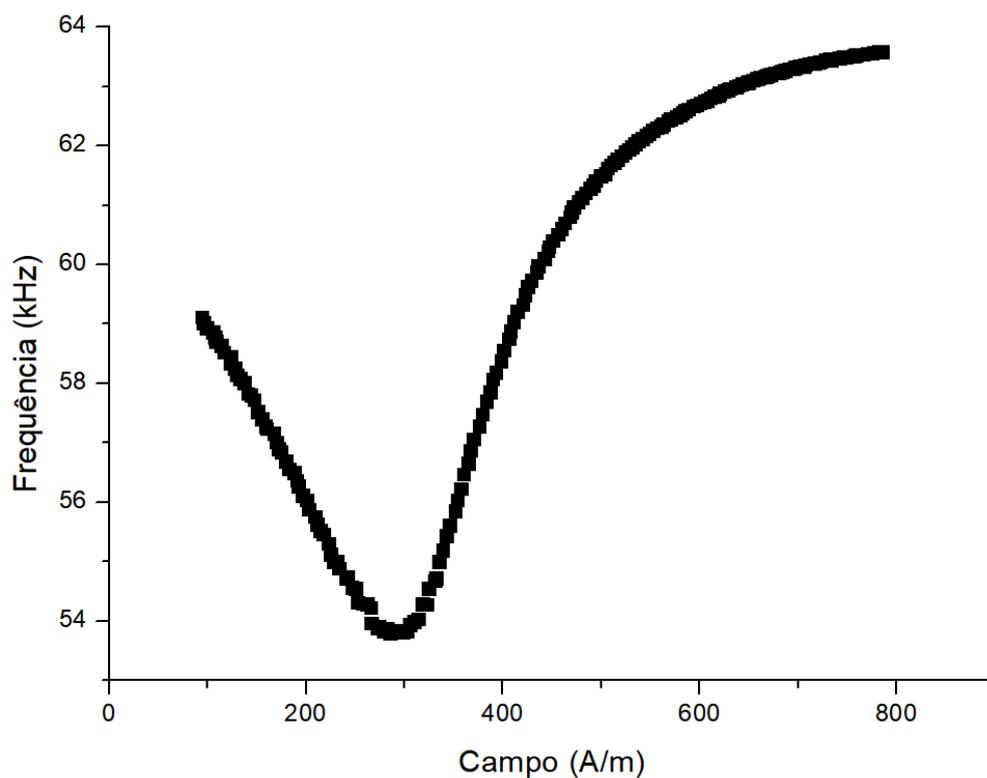


Figura 15. Curva do ΔE composto obtida de um conjunto possuindo Metglas como ressonador e FeAlB como transdutor (Fonte: O Autor).

Em seguida, o comportamento da frequência de ressonância é monitorado durante os ensaios de tração. Um exemplo de um resultado obtido para este ensaio pode ser visto na Figura 16. A inclinação negativa da curva é consequência da interação entre o campo

magnético do transdutor e o campo de bias, como será explicado em maior detalhe na seção 5.1. A sensibilidade do sensor é então quantificada através do *Gauge Factor*, explicado na seção seguinte.

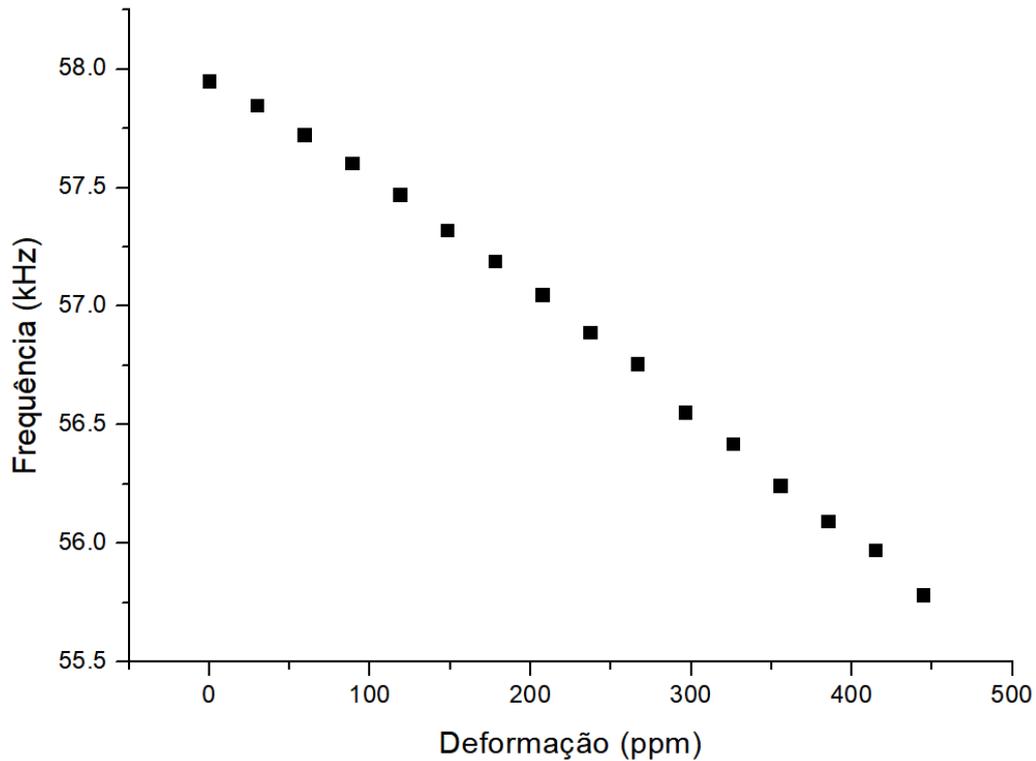


Figura 16. Variação de frequência do sensor com a deformação do substrato (Fonte: O Autor).

4.3.1 Gauge Factor

O *Gauge Factor*, GF , que pode ser utilizado para quantificar a sensibilidade do sensor, é calculado pela equação 22, onde f_0 é a frequência de ressonância medida pelo sensor no estado não tensionado, Δf é a variação total da frequência observada durante o ensaio, e ε é a deformação sofrida pelo transdutor.

$$GF = \frac{\Delta f / f_0}{\varepsilon} \quad (22)$$

No cálculo do GF , é importante certo cuidado com a escolha da deformação ε utilizada. Embora a tensão seja aplicada sobre o substrato, a presença do transdutor diminui a deformação sofrida por ambos. Adicionalmente, no caso em que as espessuras do substrato e do transdutor forem parecidas, o transdutor não pode ser considerado apenas um filme fino e ter sua deformação aproximada a do substrato.

Assumindo que o substrato e o transdutor possuem a mesma largura, a diferença entre ambas as deformações se dá pela equação 23, onde t se refere à espessura do transdutor e do substrato, e o subscrito “s” se refere ao substrato ao qual a tração é aplicada, enquanto o subscrito “t” se refere ao transdutor colado sobre ele.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_t \left[1 + 2 \left(\frac{E_t \cdot t_t}{E_s \cdot t_s} \right) \right] \quad (23)$$

É importante notar que a deformação adotada como referência para o cálculo do GF é aquela do próprio transdutor. Prevê-se que propriedades do transdutor, como sua rigidez e espessura, são desprezíveis quando comparadas às do substrato. Nessa situação, o termo dentro dos colchetes tende a um, e a deformação do transdutor pode ser assumida como sendo igual àquela do substrato.

4.4 Preparação das Amostras com Substrato de Latão

Os sensores foram testados sobre substratos de latão com largura de 7 mm e espessura de 0,8 mm. Uma tira fina de adesivo acrílico, de aproximadamente 0,5 mm de espessura, foi colocada sobre a parte central do transdutor. O ressonador foi depositado sobre a fita adesiva, de forma que apenas sua região central permanecesse colada, permitindo o livre movimento magnetostrictivo de suas extremidades. Uma montagem de um sensor, com o ressonador deslocado para facilitar a visualização, pode ser observada na Figura 17. O latão foi escolhido pelo seu baixo módulo de elasticidade (78,5 GPa), possibilitando

assim deformá-lo com o equipamento presente no laboratório. Os transdutores foram colados sobre os substratos utilizando cianoacrilato.

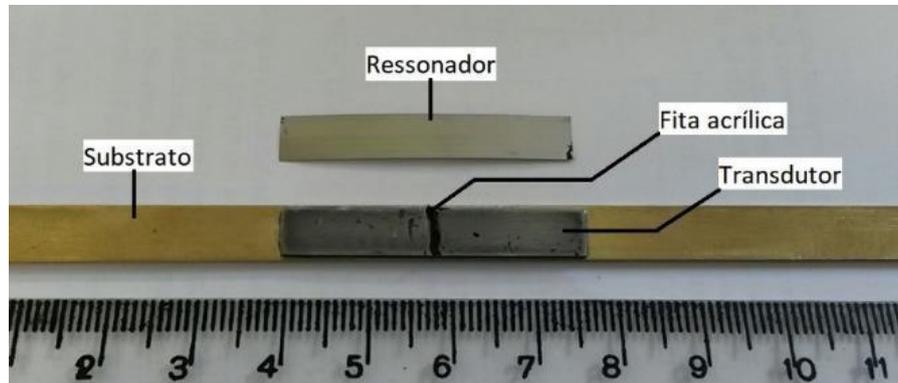


Figura 17. Elementos construtivos do sensor magnetoelástico de deformação (Fonte: O Autor).

4.5 Bancada de Ensaios de Tração do LCM

Uma bancada de ensaios de tração, que pode ser vista na Figura 18, e cujo diagrama é apresentado na Figura 19, foi montada no LCM com o objetivo de testar a capacidade dos sensores magnetoelásticos de detectarem a deformação dos substratos de latão. Nesta bancada, somente substratos de latão foram ensaiados devido a seu módulo de Young relativamente baixo (78,5 MPa), que permitiu a imposição de deformações altas com a utilização de pouco peso.



Figura 18. Foto da bancada de ensaios de tração utilizada para os ensaios de tração no LCM (Fonte: O Autor).

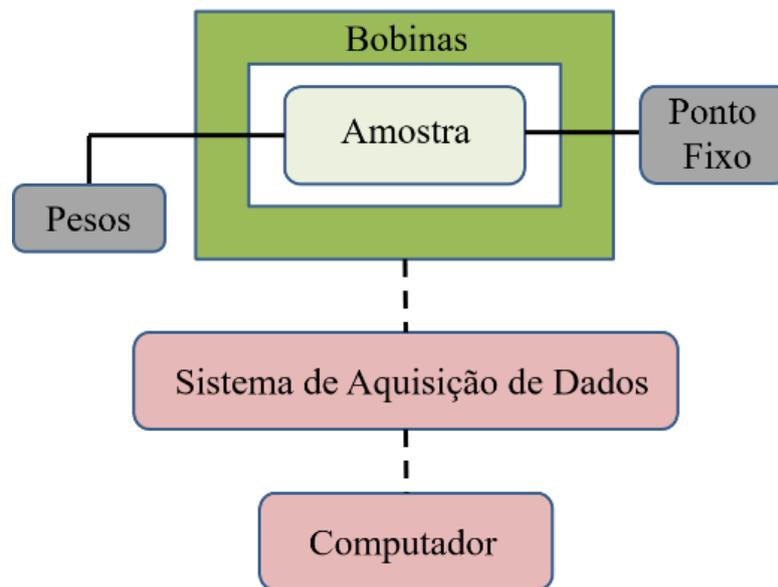


Figura 19. Diagrama esquemático da montagem da bancada de ensaios de tração (Fonte: O Autor).

Outros equipamentos foram utilizados para ensaiar amostras de aço SAE 1010, e serão descritos na seção 4.7. A bancada é constituída de três elementos principais: uma mesa com um sistema de pesos, um sistema de bobinas e um sistema de aquisição e processamento de dados.

4.5.1 Sistema de Pesos

O sistema de pesos tem por objetivo permitir a aplicação de tensão no substrato. Consiste em um conjunto de cabos de aço que conectam a amostra a ser tensionada a um suporte no qual pesos podem ser adicionados em incrementos de 1, 2 ou 10 kg.

4.5.2 Sistema de Bobinas

O sistema de bobinas, Figura 20, construído no LCM como parte de um projeto anterior (C. TORMES et al., 2014), engloba duas bobinas de Helmholtz e uma bobina

sensora. Bobinas de Helmholtz foram utilizadas, pois estas geram campos magnéticos de amplitude constante no volume de interesse em seu interior.

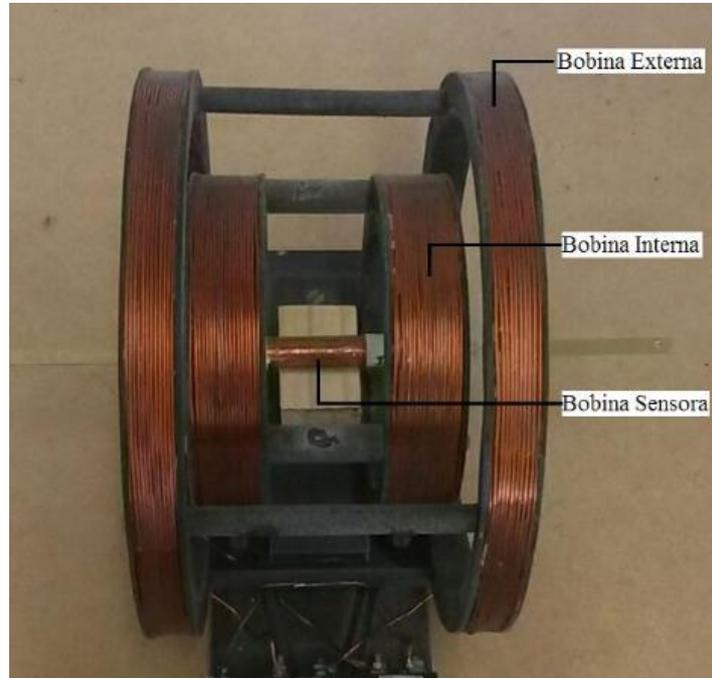


Figura 20. Conjunto de bobinas utilizados para a excitação das amostras e captação de sinal (Fonte: O Autor).

Uma das bobinas de Helmholtz (denominada bobina externa) é responsável pela geração do campo contínuo que determina o ponto de operação do ressonador, substituindo o ímã permanente da concepção original do sensor, de forma a facilitar a escolha do campo contínuo aplicado. A intensidade do campo magnético H gerado em seu interior foi calculado pela equação 24, onde N_e é o número de espiras da bobina (COEY, 2009; CULLITY e GRAHAM, 2009). O campo máximo que pode ser gerado com esta bobina foi de 1880 A/m.

$$H = \frac{8\mu_0 N_e i}{5\sqrt{5}r} \quad (24)$$

A segunda bobina de Helmholtz (denominada bobina interna) gera o campo alternado, excitando o ressonador até uma frequência de 100 kHz. A bobina sensora capta a variação de fluxo causada pela vibração do sensor.

4.5.3 Sistema de Captação de Dados

O sistema de captação de dados é esquematizado na Figura 21 e seus principais componentes podem ser observados na Figura 22.

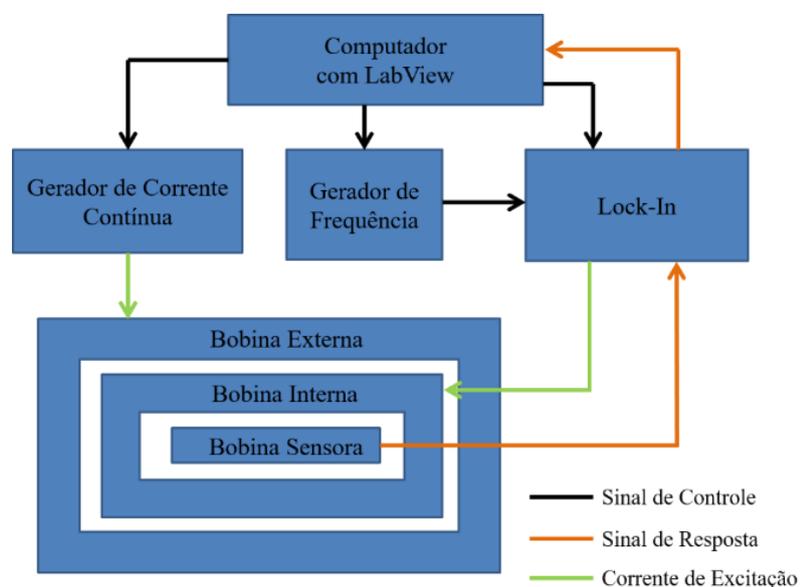


Figura 21. Diagrama esquemático do sistema de captação de dados (Fonte: O Autor).

A montagem do sistema de aquisição de dados inclui a uma série de componentes eletrônicos conectados às bobinas e a um computador: um gerador de função Stanford DS345 gera um sinal senoidal de excitação que serve de frequência de excitação para a bobina interna e como sinal de referência para um amplificador Lock-in Stanford SR830. O Lock-in recebe também o sinal proveniente da bobina sensora, compara ambos sinais, e envia um valor de resposta para o computador. Uma fonte de corrente contínua Agilent E3634A é conectada à bobina externa para a geração do campo contínuo com a amplitude

desejada. Todos os equipamentos são controlados por um programa desenvolvido no laboratório utilizando Lab View, da National Instruments.



Figura 22. Equipamentos que compõem o sistema de captação de dados (Fonte: O Autor).

Como alternativa ao sistema apresentado, um Analisador de Rede E5061B da Agilent, Figura 23, também é utilizado. O diagrama de blocos referente a esta montagem pode ser visto na Figura 24.



Figura 23. Analisador de Rede E5061B (Fonte: O Autor).

Ele é capaz tanto de gerar a frequência de excitação, como de adicionar um *offset* à corrente de saída, gerando o campo contínuo de bias. Por unificar todas as funções dos aparelhos da montagem anterior, o Analisador utiliza apenas uma bobina comum para

realizar os ensaios. Ele é conectado a um computador, e controlado por um programa desenvolvido em C++ no Code::Blocks durante um projeto anterior (BELTRAMI, 2016).

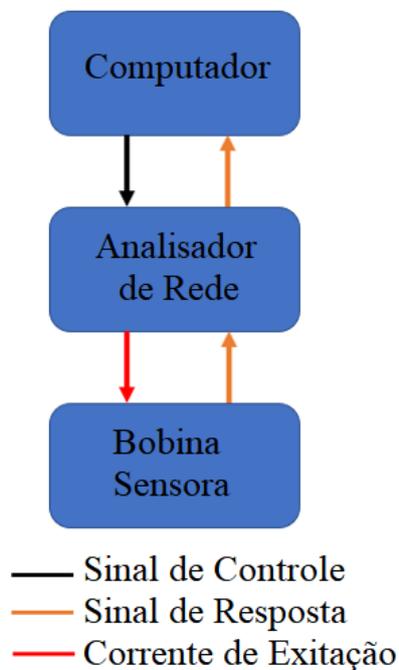


Figura 24. Diagrama de blocos do sistema de aquisição de dados montado com o Analisador de Rede

4.6 Caracterização das Curvas ΔE

A sensibilidade do sensor magnetoelástico está diretamente relacionada ao formato da curva ΔE . Dessa forma, compreender como diferentes campos magnéticos afetam as variações de frequência do ressonador é de fundamental importância para a caracterização adequada do sensor.

Com o objetivo de observar de que forma a presença de diferentes componentes ferromagnéticos próximos ao ressonador modificam sua curva ΔE , uma série de varreduras de campo magnético foi realizada sobre o ressonador em diferentes condições. As varreduras foram realizadas com valores de campo de bias H de -570 A/m a 570 A/m, efetivamente medindo a curva ΔE em ambas as direções de H . Todas varreduras utilizaram um ressonador de Metglas tratado termicamente a 315°C por 1 h sob campo magnético, referido apenas como ressonador.

Tabela 2. Descrição dos parâmetros das varreduras de campo realizadas (Fonte: O Autor).

Varredura	Posicionamento do Ressonador	Transdutor	Substrato	Sentido da Varredura
1	Livre	Nenhum	Latão	Normal
2	Livre	Nenhum	Aço SAE 1010	Normal
3	Livre	Nenhum	Aço SAE 1010	Inverso
4	Livre	FeAlB	Aço SAE 1010	Normal
5	Fixo	FeAlB	Aço SAE 1010	Normal
6	Fixo	FeAlB	Latão	Normal

Os componentes presentes dentro da bobina sensora em cada uma das varreduras, numeradas de 1 a 6, são descritos na Tabela 2. Na coluna “Posicionamento do Ressonador”, o termo “Livre” indica que o ressonador foi depositado na superfície do substrato ou ressonador sem qualquer fixação, enquanto, o termo “Fixo” indica que o ressonador foi fixado à superfície por uma fita acrílica como descrito na seção 4.4. As colunas “Transdutor” e “Substrato” informam qual material foi utilizado como o respectivo elemento construtivo do sensor. As varreduras do campo de bias foram feitas, por padrão, de valores negativos de campo H até valores positivos, descritas como sentido de varredura “Normal” na última coluna. A varredura 3, no entanto, foi realizada no sentido inverso, de 570 A/m até -570 A/m.

O substrato ferromagnético utilizado em algumas varreduras é uma amostra de aço SAE 1010, cuja composição foi confirmada através de uma análise química por espectroscopia de emissão atômica. O resultado de cada uma das medidas foi coletado pelo Analisador de Redes e os dados foram posteriormente plotados com o Origin.

4.7 Metodologia dos Ensaios de Tração em Substrato Ferromagnético

Para avaliar a aplicabilidade do sensor magnetoelástico em superfícies ferromagnéticas, uma série de corpos de prova para ensaios de tração foram usinados a partir de chapas de aço SAE 1010. Os ensaios foram divididos em três etapas, cuja montagem dos equipamentos e amostras utilizadas serão explicadas em detalhe nas seções seguintes.

4.7.1 Ensaios de Tração: Primeira Etapa

Na primeira etapa, ensaios de tração foram realizados em cinco corpos de prova, exemplificados na Figura 25. Os ensaios, realizados na máquina universal de ensaio de tração e compressão do LAMEC da UCS, com o objetivo de determinar o módulo de Young e o limite de escoamento do material, posteriormente guiaram a escolha dos parâmetros dos ensaios de tração subsequentes.

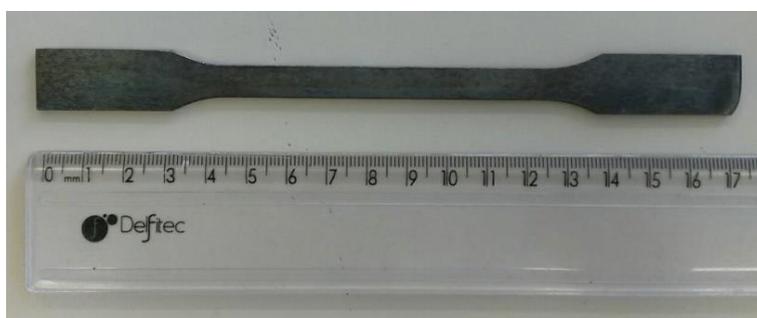


Figura 25. Corpo de prova de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor).

4.7.2 Ensaios de Tração: Segunda Etapa

Nesta etapa, uma amostra de aço com as dimensões das da etapa 1 foi desmagnetizada utilizando um forno industrial tubular com isolamento de alumina da Sanchis, em um processo que será descrito em maior detalhe na seção 4.8. Em seguida, ambos os lados da amostra foram lixados no sentido longitudinal e transversal com relação ao eixo comprido da amostra, com lixas de granulometria 150 e 220, sucessivamente, preparando a superfície para a subsequente colagem dos sensores.

O transdutor de FeAlB foi colado em uma das superfícies da amostra utilizando uma cola de cianoacrilato e, sobre este, um ressonador magnetoelástico de Metglas foi posicionado utilizando a mesma técnica descrita para as amostras de latão na seção 4.4. Esta amostra foi denominada amostra A2.

Os ensaios de tração desta etapa foram então realizados em uma máquina de tração da EMIC disponibilizada pelo LPOL da UCS. Na Figura 26, um diagrama esquemático detalha a montagem da amostra e dos componentes de medição para este experimento.

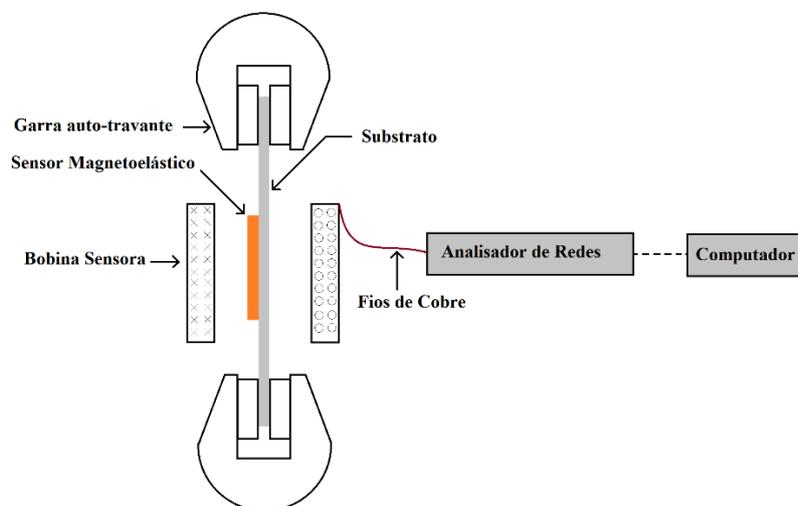


Figura 26. Esquema representativo dos componentes do ensaio de tração da segunda etapa. (Fonte: O Autor)

Após a amostra ser fixada entre as garras auto-travantes, uma varredura do campo H foi realizada, e um campo de bias foi selecionado para a operação do sensor. Durante o ensaio de tração desta etapa, a deformação da amostra foi controlada pelo avanço da máquina de tração. Uma foto dos equipamentos utilizados nesta etapa pode ser observada na Figura 27.

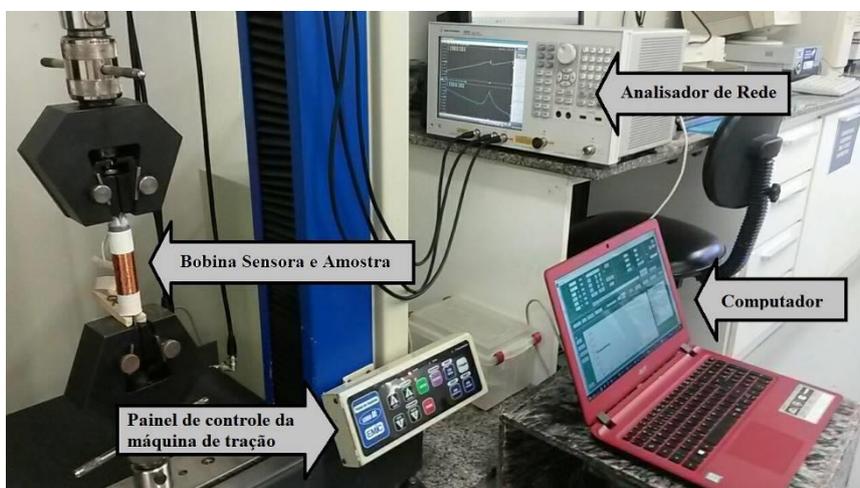


Figura 27. Equipamentos utilizados durante a segunda etapa de ensaios de tração (Fonte: O Autor).

4.7.3 Ensaios de Tração: Terceira Etapa

Uma nova amostra de aço, denominada amostra A3, similar à da etapa anterior, Figura 28, foi preparada para a terceira etapa dos ensaios de tração, no qual a deformação da amostra foi monitorada simultaneamente pelo sensor magnetoelástico e por um *Strain Gauge*, ambos colados diretamente à amostra.

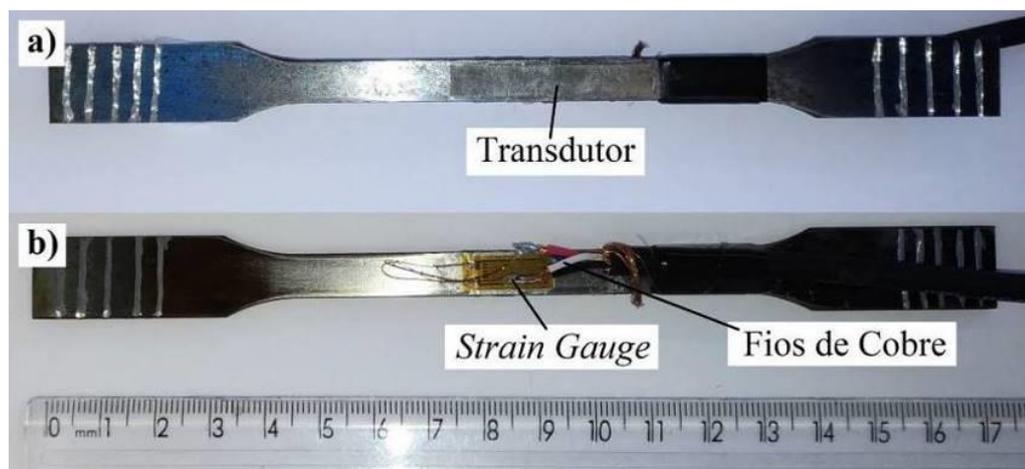


Figura 28. a) Transdutor de FeAlB colado na região útil da amostra de aço SAE 1010. b) Strain Gauge colado na superfície contrária da amostra A3. (Fonte: O Autor)

Em uma de suas superfícies foi colado um sensor magnetoelástico, assim como na amostra A2, mas utilizando a cola Loctite 496 da Henkel. Na superfície contrária, um *Strain Gauge* uniaxial de 120 Ohms, da empresa Excel Sensores Indústria Comércio e Exportação Ltda. foi colado utilizando a mesma cola.

O *Strain Gauge* foi conectado por fios de cobre a uma placa de aquisição de dados QuantumX da HBM, Figura 29, que por sua vez foi conectada a um computador com o programa de coleta e análise de dados Catman, ambos da HBM. O programa Catman, a placa de aquisição de dados e a cola Loctite foram fornecidos pelo Laboratório de Mecânica da UCS.



Figura 29. Placa de aquisição de dados QuantoX da HBM (Fonte: O Autor)

Durante a deformação da amostra, a resposta de ambos os sensores foi monitorada simultaneamente e coletada em um único computador. Os dados foram posteriormente plotados no Origin. Um esquema representativo da montagem da amostra nesta etapa pode ser encontrado na Figura 30.

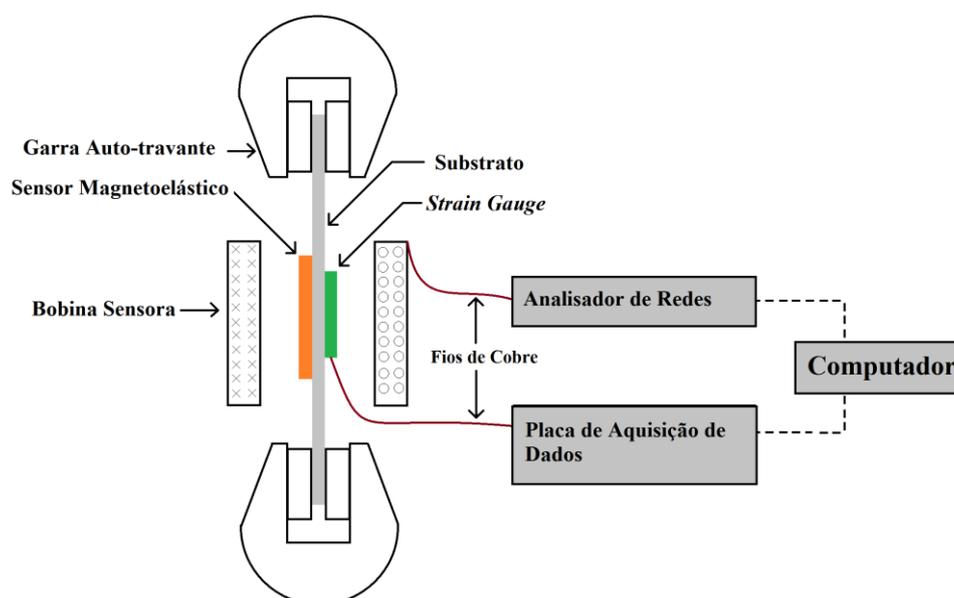


Figura 30. Esquema representativo dos componentes do ensaio de tração da terceira etapa. (Fonte: O Autor)

4.8 Desmagnetização das amostras

A existência de uma magnetização prévia dos corpos de prova de aço e dos transdutores poderia afetar o formato das curvas ΔE obtidas. Por esse motivo, um forno industrial tubular com isolamento de alumina da SANCHIS, Figura 31, foi utilizado para desmagnetizar estes materiais, aquecendo-os até suas respectivas temperaturas de Curie T_c antes de cada medida.

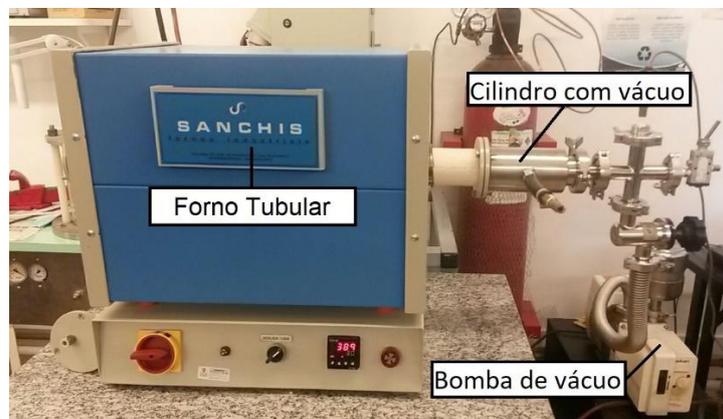


Figura 31. Forno tubular da Sanchis utilizado na desmagnetização dos transdutores de aço 1010 (Fonte: O Autor).

Para evitar a oxidação quando em altas temperaturas, os materiais foram mantidos em um vácuo de 130 Pa durante o tratamento térmico. O vácuo foi mantido através da utilização de um cilindro de aço inoxidável posto no interior do forno, o qual foi acoplado a uma bomba de vácuo Alcatel Adixen 2015SD, da Ideal Vacuum.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Comportamento do Campo H Sobre o Ressonador

Comparando as curvas de ΔE original (apenas do ressonador) e as ΔE compostas (do ressonador na proximidade do transdutor), foi observado que o campo de bias H_0 necessário para alcançar o campo de anisotropia dos ressonadores aumentou quando estes estavam sob a influência do campo do transdutor. A partir dessa observação, considerou-se que o campo do transdutor interage com o campo de bias da forma apresentada na Figura 32. A medida que o substrato (c) se deforma, o transdutor (b) tende a se magnetizar na direção do campo aplicado H_0 , gerando um campo B sobre o ressonador (a) na direção contrária, de forma a diminuir o campo total imposto sobre o ressonador.

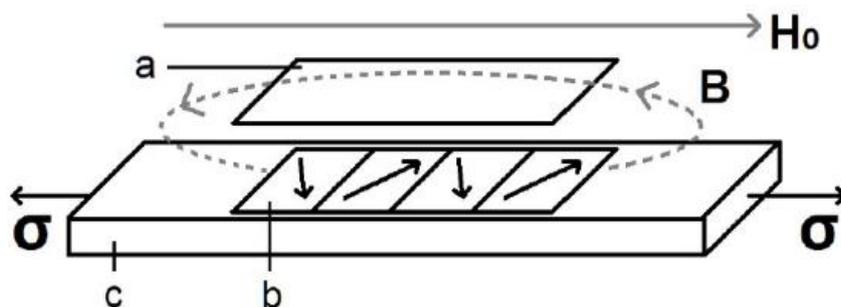


Figura 32. Curva do ΔE composto obtida de um conjunto possuindo Metglas como ressonador e FeAlB como transdutor (DALPONTE; BASTOS; MISSELL, 2016a).

Uma consequência dessa interação é que a deformação do transdutor causará nele uma magnetização mais intensa na direção de H_0 , o que implica em uma diminuição do campo resultante sobre o ressonador. Por esta razão, as variações de frequência de ressonância com o aumento da deformação, observadas nos ensaios de tração, são sempre referentes a diminuições do campo resultante.

5.2 Resultados da Bancada de Ensaio de Tração do LCM

Duas medidas de frequência de ressonância em função da tensão aplicada foram realizadas na bancada de testes. Em ambos os ensaios, foram utilizados transdutores de FeAlB e substratos de latão, e ressonadores diferentes foram utilizados. No primeiro ensaio, um ressonador de *Metglas 2826 MB3* foi fixado sobre o transdutor, enquanto o segundo ensaio foi realizado com a fita *1K501*.

Antes do início de cada ensaio, foi realizada uma varredura de campo para a aquisição da curva ΔE composta e, com base nesta, um campo H de operação para cada conjunto sensor-transdutor foi selecionado. Os resultados dos ensaios de tração de ambos os conjuntos, denominados respectivamente sensor-Metglas e sensor-1k501, podem ser encontradas nas Figuras 33(a) e 34(a). As Figuras 33(b) e 34(b) apresentam a curva ΔE composta para o respectivo conjunto.

A variação de frequência em função do campo H para ambos os sensores apresentou uma notável linearidade, em contraste com os resultados obtidos anteriormente com qualquer uma das fitas amorfas, quando utilizadas como transdutores. Adicionalmente, o comportamento linear observado pode ser estendido para todas regiões lineares da curva ΔE composta.

Linhas de tendência foram traçadas para ambos os ensaios, que correspondem às linhas contínuas em vermelho na Figura 33 e Figura 34. As funções de reta e coeficientes de linearidade obtidos no ajuste são apresentados junto a cada figura. Os limites superior e inferior da regressão linear das curvas ΔE compostas coincidem com a variação total de frequência observada durante o teste de tração.

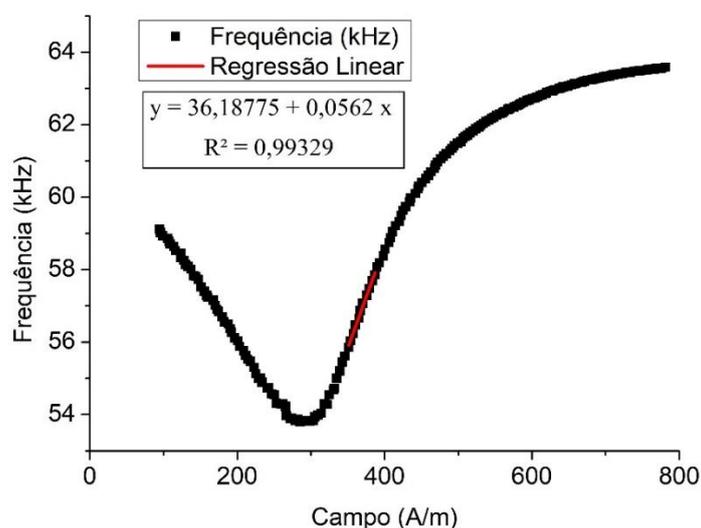
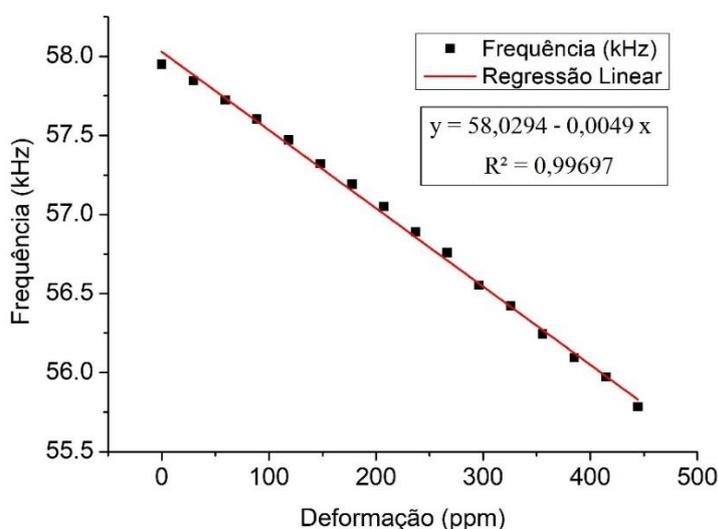


Figura 33. Ensaio de tensão (a) e ΔE composto (b) para o sensor-Metglas (Fonte: O Autor).

A presença do transdutor junto ao ressonador causou uma deformação da curva ΔE , como foi explorado na seção 5.2. O sensor-Metglas apresenta a mesma composição da descrita na varredura 6, e apresentou um ΔE semelhante. A varredura de H , no entanto, se restringiu a campos positivos. Ambos os conjuntos apresentaram um deslocamento do centro de simetria da curva ΔE , embora este efeito tenha sido muito mais pronunciado no sensor-1K501, cujo centro da curva foi deslocado para um campo de 482 A/m.

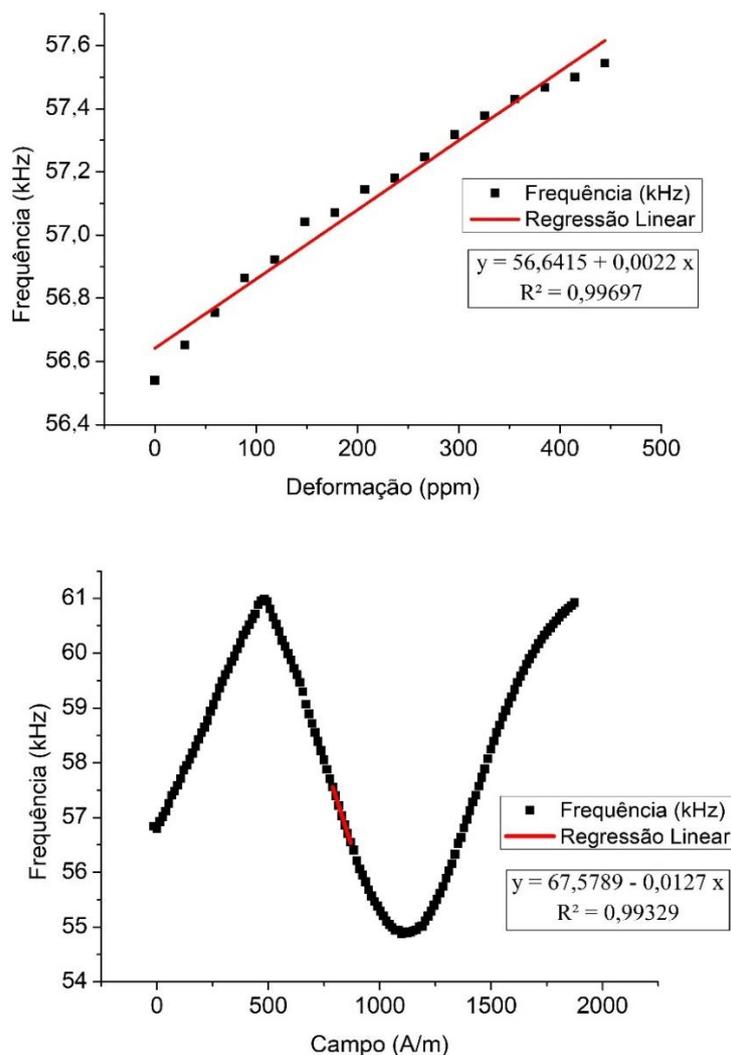


Figura 34. Ensaio de tensão (a) e ΔE composto (b) para o sensor-1K501 (Fonte: O Autor).

Para o sensor-Metglas, o campo magnético H de operação foi escolhido como sendo maior do que seu campo de anisotropia, em um ponto de inclinação positiva da curva ΔE . Como discutido na seção 5.1, a tensão aplicada sobre o transdutor tende a causar uma diminuição do campo magnético total aplicado sobre o ressonador, causando a diminuição da frequência de ressonância observada no decorrer do ensaio. Da mesma forma, o campo magnético de operação selecionado para o sensor-1K501 foi inferior ao campo de anisotropia, resultando em um aumento da frequência de ressonância com a aplicação da tensão.

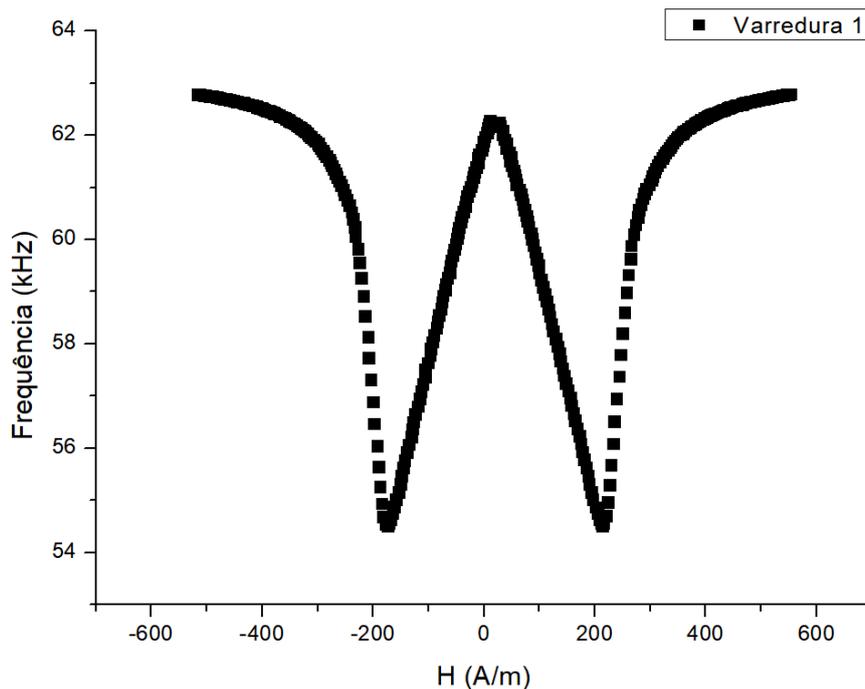
O *Gauge Factor* encontrado para sensor-Metglas foi 190, calculado com base na deformação do transdutor encontrada com a equação 23, e 120 quando considerada apenas a deformação do substrato, que deformou 300 ppm durante o ensaio. Já o sensor-

1K501 apresentou um GF de 90 com relação ao transdutor, mas apenas 60 com relação ao substrato. Para fins de comparação, o GF dos *Strain Gauges* convencionais possui valores na ordem de 3.

5.3 Caracterização da Curva ΔE

Os resultados desta secção são descritos de acordo com a numeração definida na tabela 2 da secção 4.6. A Figura 35 mostra o resultado da varredura 1, que descreve o comportamento da variação de frequência do ressonador livre da influência de qualquer campo magnético além do campo de excitação H . Como os resultados subsequentes resultam da adição de diferentes campos magnéticos sobre o ressonador, a varredura 1 é considerada como a referência com a qual julgar os outros resultados. Desta forma, alguns os resultados apresentados posteriormente nesta secção incluem os resultados da varredura 1 para fins de comparação. Adicionalmente, uma descrição das varreduras presentes nas respectivas imagem pode ser vista logo abaixo do gráfico.

Como varredura de campo H foi realizada a partir de -570 A/m, e avançou até 570 A/m, curva ΔE foi efetivamente medida em ambas as direções de campo aplicado. Como o esperado, a curva apresentou um comportamento simétrico, pois sendo os valores da Equação 17 escalares, a variação de frequência independe da direção de aplicação do campo. O ponto central em que a inclinação da curva inverte divide a curva entre as regiões com campo H de valores positivos e negativos aplicados sobre o ressonador. Este ponto é denominado centro de simetria da curva.



Varredura	Posicionamento do Ressonador	Transdutor	Substrato	Sentido da Varredura
1	Livre	Nenhum	Latão	Normal

Figura 35. Curva ΔE de uma fita de Metglas (Fonte: O Autor).

É importante atentar para o fato que o vale da curva ΔE está associado também à amplitude de vibração do ressonador. A amplitude é máxima na base do vale de frequência, e, quanto mais afastada do vale de frequência a medida é realizada, menor é a amplitude da resposta. Dessa forma, para alguns valores de H afastados do vale de ressonância, o Analisador de Rede não foi capaz de detectar a frequência de ressonância devido à baixa amplitude do sinal.

A Figura 36 mostra o resultado das varreduras 1 e 2. A presença do substrato de aço teve três efeitos relevantes sobre o formato da curva ΔE : a faixa de campo em que as variações de frequência foram captadas foi reduzida a faixa de 1068 A/m na varredura 1 para 453 A/m na varredura 2; E a amplitude da variação máxima de frequência apresentou um aumento de 8,2 kHz para 11,9 kHz; Adicionalmente, o centro de simetria da curva ΔE foi deslocado para o valor de -151 A/m.

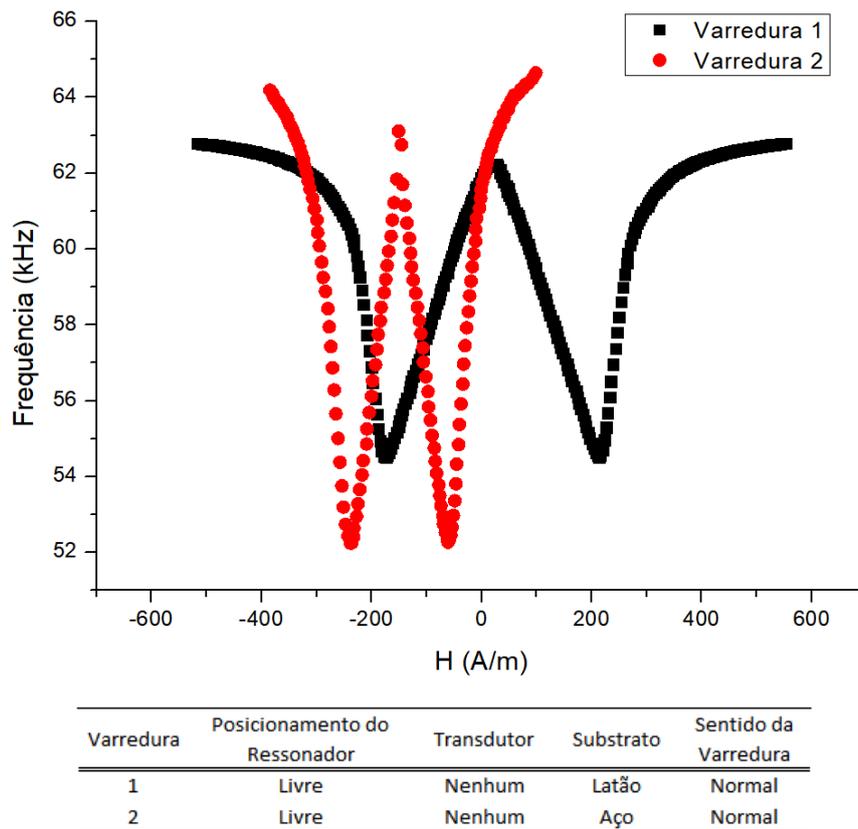
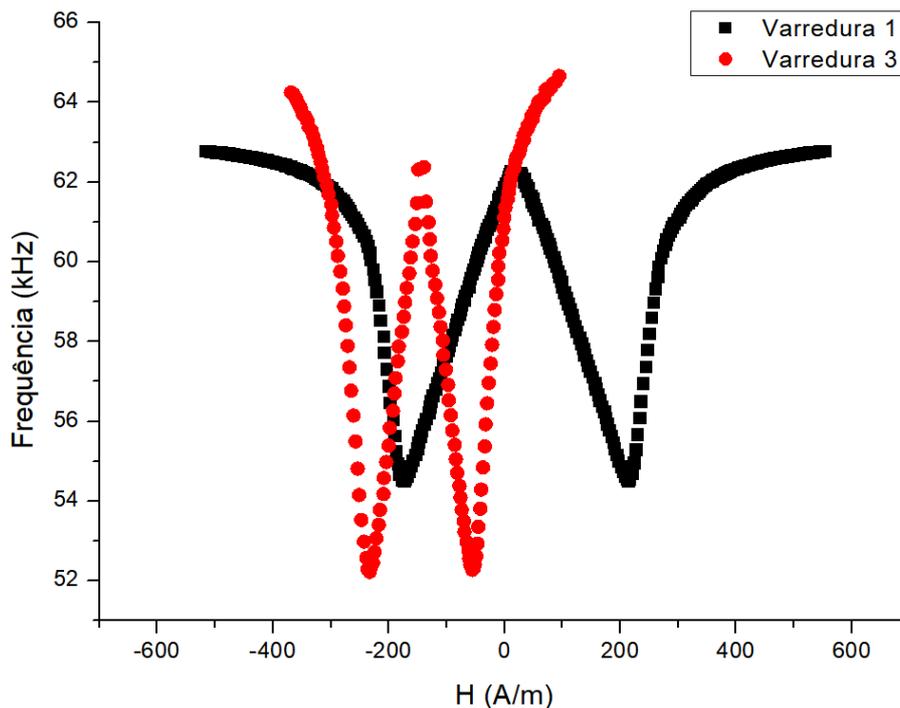


Figura 36. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)

A alteração do centro de simetria curva ΔE observada foi atribuída ao estado de magnetização inicial do substrato, pois a interação de campos entre o substrato e o ressonador ocorreu de forma análoga àquela detalhada na seção 5.1. O campo magnético originado do substrato sobre o ressonador se somou ao H , deslocando a curva ΔE como um todo. Adicionalmente, o estado de magnetização do substrato foi alterado pelo campo H , de forma que o campo total sobre o ressonador variou também de acordo com um fator proporcional a H .

A varredura 3, Figura 37, produziu resultados similares aos da varredura 2, mesmo com a aplicação de H começando em valores positivos, e avançando para valores negativos. Isto indica que o estado magnético do substrato independe do seu processo dinâmico de magnetização, mas apenas do valor pontual de H . Este resultado é importante para garantir a reprodutibilidade das medidas com o sensor magnetoelástico.

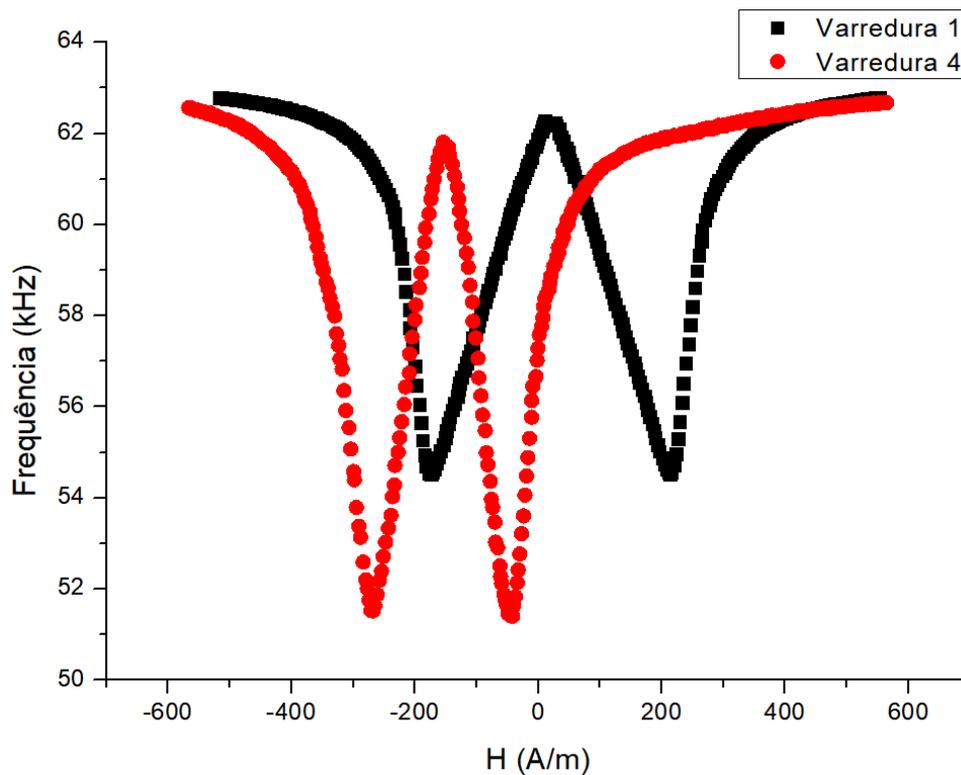


Varredura	Posicionamento do Ressonador	Transdutor	Substrato	Sentido da Varredura
1	Livre	Nenhum	Latão	Normal
3	Livre	Nenhum	Aço	Inverso

Figura 37. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)

Na varredura 4, Figura 38, o centro de simetria da curva manteve-se em -151 A/m. No entanto, uma diminuição da amplitude da curva foi observada, para um valor de $11,2$ kHz. Os valores superiores de frequência alcançados baixaram para $62,6$ kHz, comparados com os valores de $64,3$ kHz da varredura 3. Essa mudança foi atribuída a um maior distanciamento do ressonador com o substrato, devido à presença do transdutor entre ambos. Adicionalmente, a faixa de campo H em que a frequência de ressonância pode ser captada aumentou para 1130 A/m. Para fins de comparação, as três curvas descritas nos ensaios anteriores podem ser observadas na Figura 39.

A varredura 5, Figura 40, representa a situação mais próxima da aplicação final do sensor magnetoelástico, já que inclui todos os elementos que o constituem. A presença da fita acrílica amorteceu parcialmente a vibração do ressonador. Esse amortecimento é mais salientado na base do vale da curva ΔE , pois a vibração mecânica do ressonador também é maior neste ponto.



Varredura	Posicionamento do Ressonador	Transdutor	Substrato	Sentido da Varredura
1	Livre	Nenhum	Latão	Normal
4	Livre	FeAlB	Aço	Normal

Figura 38. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas isolado, e de um ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB em um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)

Adicionalmente, a curva deixou de ser simétrica, com mínimos alcançados de 53,4 kHz em -233 A/m e 54 kHz em 33 A/m. O método para cortar a fita acrílica não é automatizado, havendo a possibilidade de uma fixação imperfeita do ressonador originou esse comportamento irregular.

O último ensaio da série, varredura 6, Figura 41, apresenta uma diminuição drástica do deslocamento do centro da curva ΔE , e uma diminuição da amplitude de variação da frequência de ressonância para 8,2 kHz. Para um campo H de 400 A/m, uma variação da frequência de ressonância de 500 Hz/Am⁻¹, muito maior do que a média de 100 Hz/Am⁻¹ encontra no resto desta região linear do gráfico.

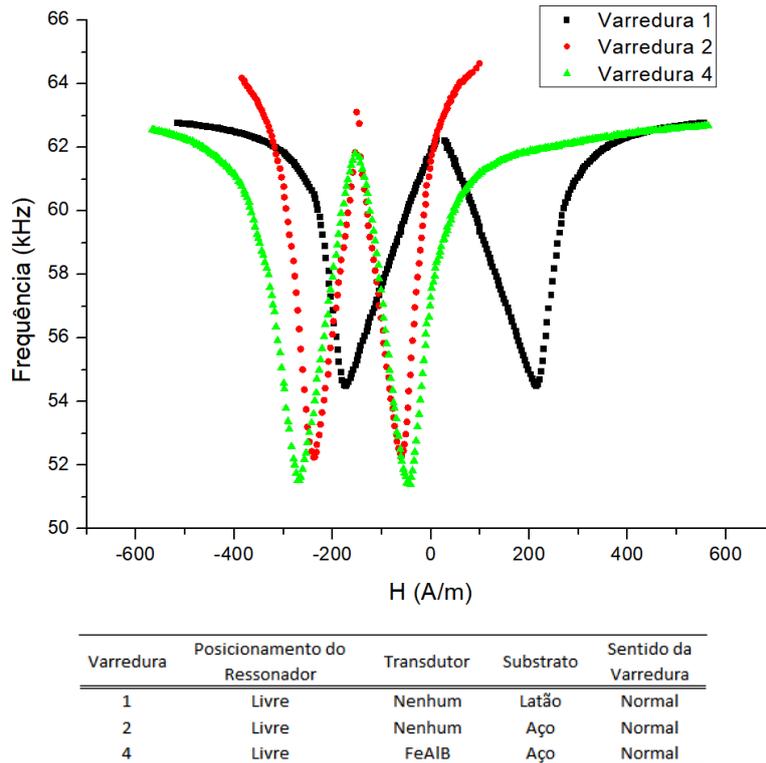


Figura 39. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas isolado, colocado sobre um transdutor de FeAlB, e sobre um substrato de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor)

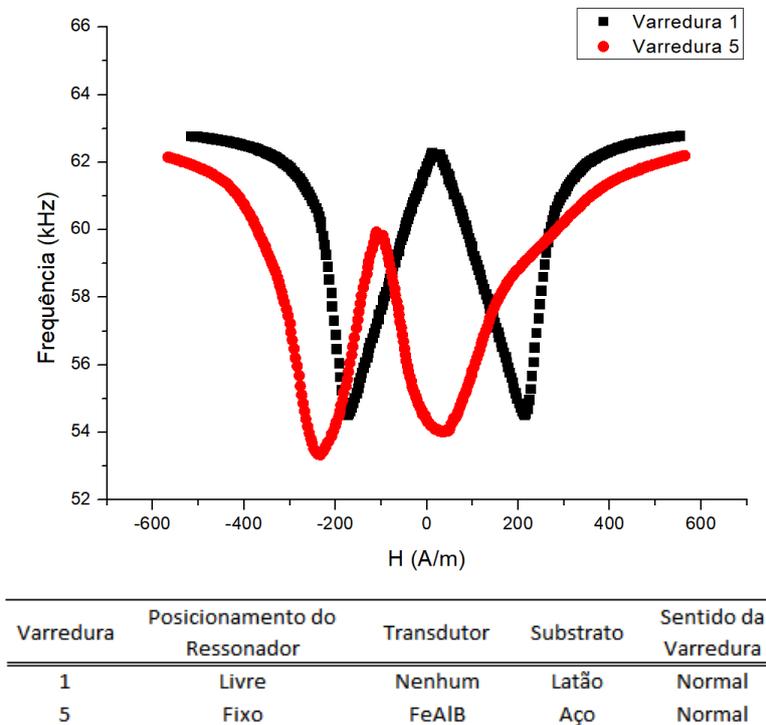


Figura 40. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB e um substrato de aço SAE 1010. (Fonte: O Autor)

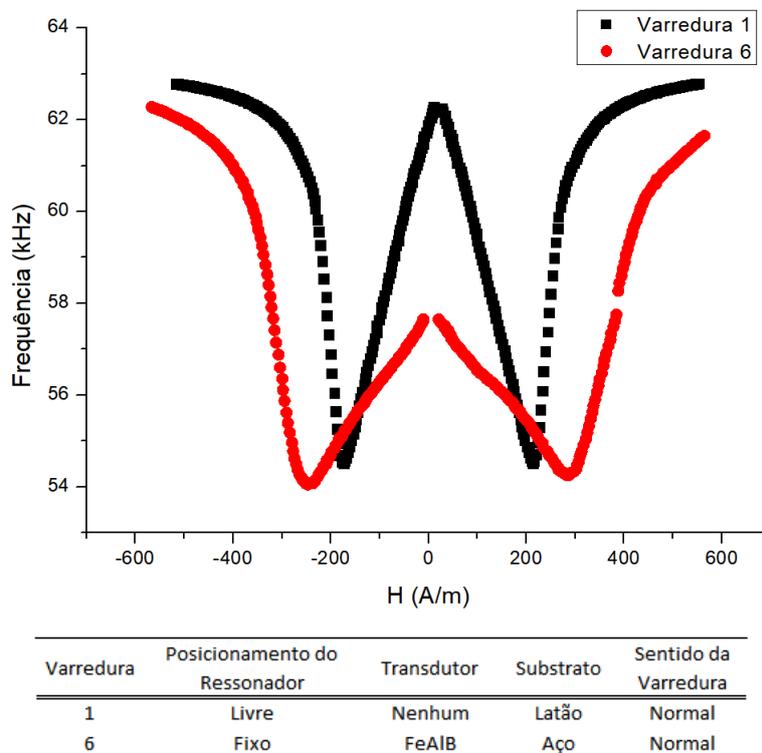


Figura 41. Curvas ΔE de um ressonador de Metglas e do mesmo ressonador colocado sobre um transdutor de FeAlB e um substrato de aço SAE 1010. (Fonte: O Autor)

5.4 Ensaios de Tração com Substrato de Aço

Os seguintes resultados se referem aos grupos de ensaios descritos na seção 4.6.

5.4.1 Resultado da Primeira Etapa

Os ensaios de tração nos corpos de prova de aço SAE 1010 resultaram num módulo de Young médio de 203,7 GPa e uma tensão de escoamento de 294,15 MPa. O relatório dos ensaios pode ser observado na Figura 42. O segundo ensaio realizado apresentou um erro na leitura do extensômetro, e teve seu resultado desconsiderado.

UCS - Laboratório de Ensaios Mecânicos
REGISTRO DE ENSAIO LAMEC - FE102 REVISÃO - 01 (DEZ/2016)

Relatório de Ensaio

Máquina: **Emic DL20000** Célula: **Trd 26** Extensômetro: - Data: **21/09/2017** Hora: **14:31:26** Trabalho n° **0225**
Programa: **Tesc versão 3.01** Método de Ensaio: **E2T_TRAÇÃO RETANGULAR (com extensômetro)**
Ident. Amostra: > Cliente: **Mestrado Eduardo Basto** Temp.(°C): **22,4** - Ident. n°: **01, 02, 03 e 04** S.S: **270397** - Folha: **01 de 01**

Corpo de Prova	Ident.-N°	Espessura (mm)	Largura (mm)	Tensão @Escoam. (MPa)	Tensão Máxima. (MPa)	Mod.Elástico. (MPa)	Compr. Final (mm)
CP 1	01	2,00	15,00	290,9	301,4	198540	0
CP 2	01	2,00	15,00	*	387,4	476495	0
CP 3	02	2,00	15,00	291,7	389,7	205963	0
CP 4	03	2,00	15,00	294,4	391,8	212589	0
CP 5	04	2,00	15,00	299,6	394,1	197858	0

Observações: **0**
@Escoam. - ponto da curva correspondente ao escoamento convencional: **0,200 %**
Comprimento Base: **25,0 mm**
Paquímetro utilizado P(): **0**

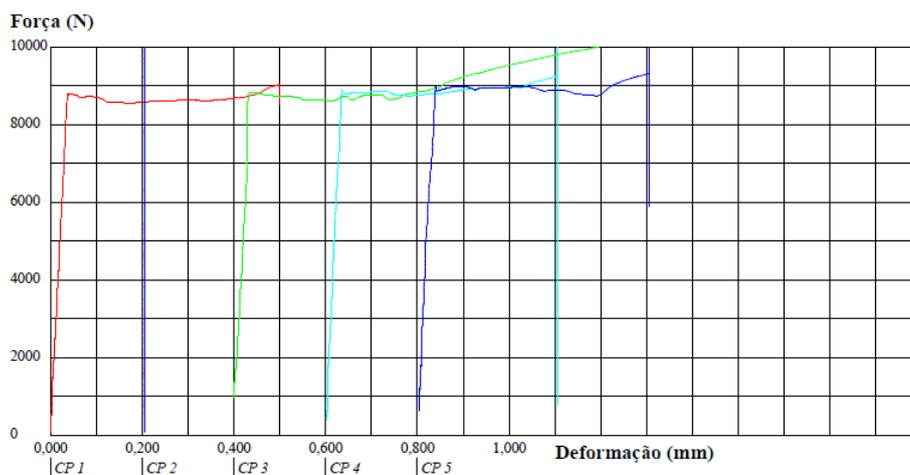


Figura 42. Relatório do ensaio de tração das cinco amostras de aço SAE 1010 (Fonte: O Autor).

5.4.2 Resultados da Segunda Etapa

Após a montagem da amostra A2 com o sensor magnetoelástico na máquina universal de ensaios de tensão e compressão, uma varredura do campo H foi realizada para possibilitar a visualização da curva ΔE do conjunto, cujo resultado é apresentado na Figura 43. Este resultado possibilitou a seleção do campo H de operação do sensor em - 131,2 A/m. Dessa forma, o sensor operou no ponto de alta inclinação da curva ΔE , indicado por um triângulo na Figura 43. A curva apresentou uma amplitude de 7,37 kHz, indicando a possibilidade de grandes variações de frequência de ressonância durante deformação da amostra. A curva foi medida em uma extensão de H de 560 A/m.

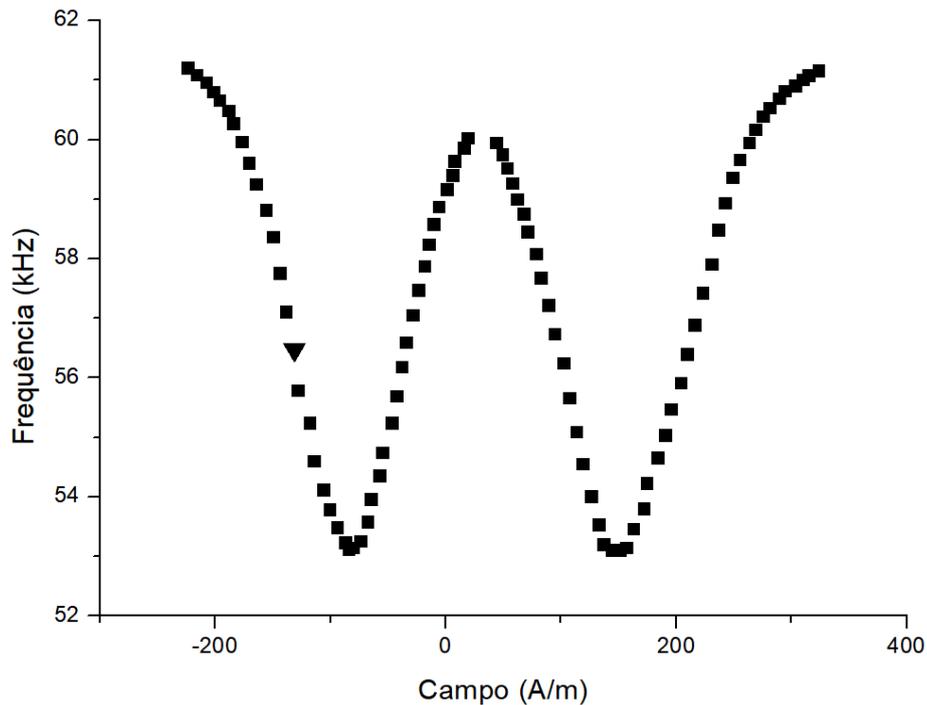


Figura 43. Varredura de campo H para a amostra da segunda etapa.
(Fonte: O Autor).

Os resultados do sensor magnetoelástico para o ensaio de tração da etapa 2 podem ser observados na Figura 44. Neste ensaio, a frequência de ressonância do sensor foi coletada pelo Analisador de Rede em intervalos de um min, durante 42 min. Como não houve uma medição direta da deformação da amostra, a deformação do substrato foi calculada através da multiplicação do tempo da medição pela taxa de avanço da máquina, e o valor obtido foi então correlacionado com a medida de frequência no respectivo tempo.

O resultado não foi linear como o obtido com o substrato de latão para o mesmo intervalo de deformação. Um comportamento linear pode ser atribuído apenas a uma determinada região central da curva, destacada pela regressão linear na Figura 44. Essa diferença foi inicialmente atribuída a uma possível inconsistência entre a deformação calculada pelo avanço da máquina de tração a deformação real da amostra. Por essa razão, na terceira etapa de ensaios, a deformação foi monitorada simultaneamente por um *Strain Gauge*. O GF do sensor magnetoelástico na região linear foi de 416 durante uma deformação de 126 ppm.

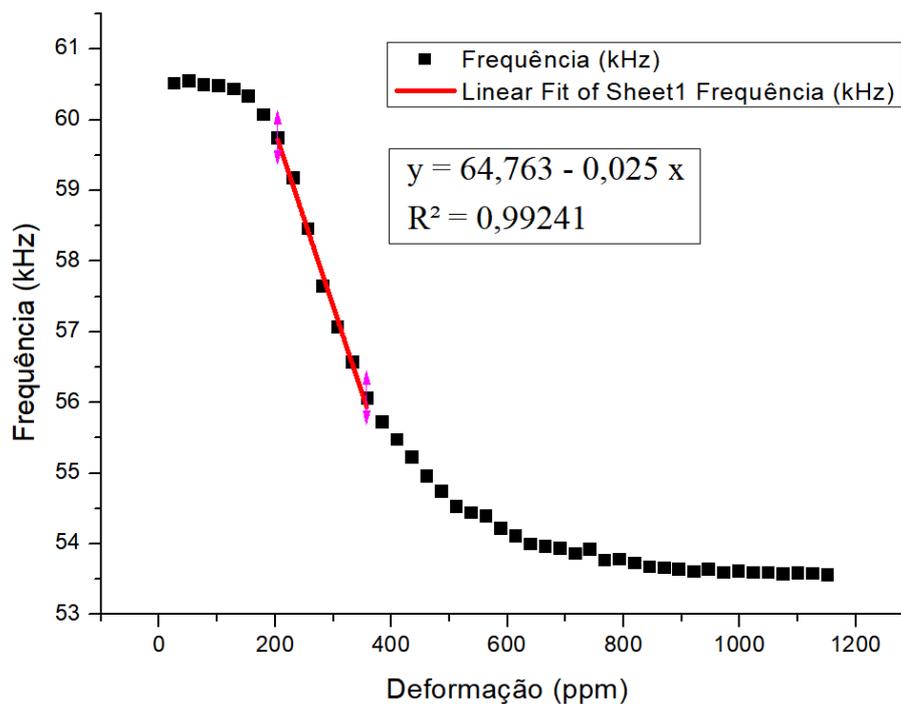


Figura 44. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico do ensaio de tração do grupo 2 (Fonte: O Autor).

5.4.3 Resultados da Terceira Etapa

Da mesma forma que a etapa anterior, uma curva ΔE , Figura 45, foi traçada com o objetivo de definir o campo magnético H de operação do sensor. A curva apresentou uma amplitude de variação de frequência de 6,49 kHz, e se estendeu por uma amplitude de H de 700 A/m. Estes dois fatores implicam numa inclinação menor da curva ΔE no campo de operação do sensor, destacado por um triângulo na Figura 45, e que resultou, também, em uma sensibilidade menor do sensor, como será demonstrado mais adiante nesta seção.

Os resultados do grupo 3 podem ser vistos na Figura 46. Os resultados do sensor magnetoelástico e do *Strain Gauge* foram coletados simultaneamente e plotados de acordo com o tempo de medição.

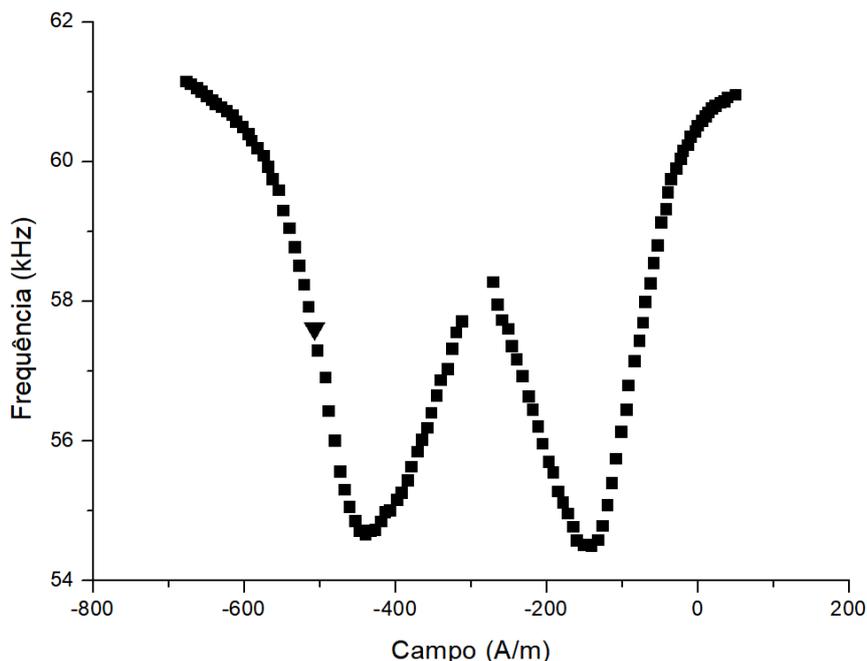


Figura 45. Varredura de campo H para a amostra da terceira etapa (Fonte: O Autor).

A resposta do *Strain Gauge* é claramente linear, confirmando que a amostra de aço estava sendo deformada de forma constante. A frequência de ressonância, no entanto, apresentou o mesmo comportamento da Figura 46, com uma grande região linear, que pode ser considerada como a região útil do sensor. Após a saturação do transdutor, ou seja, na parte inferior da curva, a frequência de ressonância apresentou um comportamento crescente, e em seguida estabilizou em um valor de 59,9 kHz.

Os dados do *Strain Gauge* e do sensor magnetoelástico foram cruzados, de forma a obter variação de frequência de ressonância *versus* a deformação real do substrato. O resultado pode ser encontrado na Figura 47. O GF calculado foi de 134 em uma região linear de 145 ppm, sendo consideravelmente menor do que o da etapa anterior. Essa diferença é principalmente por consequência da menor variação da frequência de ressonância observada durante o ensaio, oriunda de uma curva ΔE menos profunda que aquela da segunda etapa.

O sensor da amostra A3 demonstrou uma saturação em 315 ppm, enquanto o da amostra A2 saturou em uma deformação de 520 ppm, a partir da qual a inclinação da curva de ressonância caiu rapidamente.

Novamente, a diferença das duas se origina na diferença entre suas curvas ΔE . A amostra A3, no entanto, mostrou um comportamento peculiar após a saturação, onde sua frequência de ressonância voltou a diminuir. Um estudo da causa deste fenômeno requer uma série de ensaios em deformações mais elevadas.

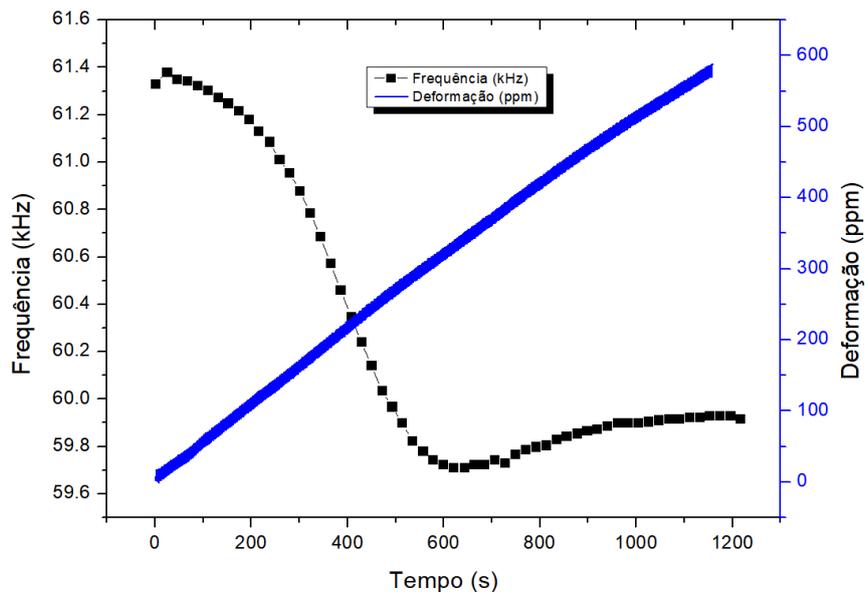


Figura 46. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico do ensaio de tração do grupo 3, e a deformação do substrato de aço SAE 1010 captada pelo Strain Gauge (Fonte: O Autor).

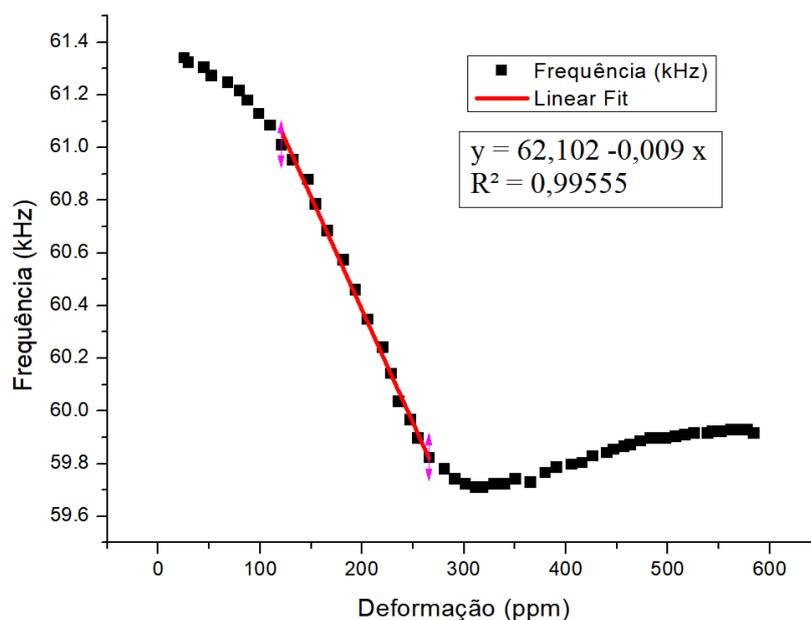


Figura 47. Variação da frequência de ressonância do sensor magnetoelástico versus a deformação captada pelo Strain Gauge da amostra A3 (Fonte: O Autor).

6 CONCLUSÕES

Uma bancada de ensaios de tração para a realização de experimentos com os sensores magnetoelásticos foi construída no laboratório. Os sensores, constituídos de transdutores de FeAlB e ressonadores de Metglas 2826 MB3 e 1K501, proveram comportamentos marcadamente lineares durante os ensaios nesta bancada. O sensor-Metglas apresentou um GF de 190, e o sensor-1K501, um GF de 90.

Os resultados com a utilização FeAlB em substrato de latão foram apresentados em na conferência INTERMAG 2017, em Dublin, o que resultou em discussões com profissionais de diferentes nacionalidades que ajudaram a guiar a continuidade da pesquisa.

Curvas ΔE do ressonador de Metglas foram traçadas em diferentes condições, objetivando explorar a influência da proximidade de materiais ferromagnéticos sobre o comportamento magnetoelástico do ressonador. A presença do substrato de Aço SAE 1010 mostrou aumentar a inclinação da curva ΔE , bem como diminuir a faixa de campo magnético H na qual a curva ocorre, e deslocar seu centro de simetria para um H de -151 A/m. Uma consequência importante deste fenômeno, é um aumento da sensibilidade do sensor, oriunda do aumento da inclinação máxima encontrada na curva ΔE . A presença do transdutor de FeAlB, por outro lado, aumentou a faixa de H em que a curva ΔE se manifestou, mas não deslocou seu centro de simetria. Fixar o ressonador com uma fita acrílica diminuiu a amplitude de variação de sua frequência de ressonância.

Com o objetivo de comprovar a aplicabilidade do sensor magnetoelástico em superfícies ferromagnéticas, os sensores constituídos de transdutores de FeAlB e ressonadores Metglas foram utilizados em ensaios de tração com substratos de aço SAE 1010. Embora os ensaios tenham se restringido à região de deformação elástica do substrato, o resultado obtido apresentou um comportamento sigmoideal, com uma região linear, a qual pode ser considerada a região útil de operação do sensor. Este comportamento foi atribuído ao processo de saturação dos momentos magnéticos do transdutor à medida que era deformado.

Para fins de comparação do comportamento do sensor magnetoelástico com aquele de um sensor convencional, um *Strain Gauge* foi atrelado ao substrato em um dos

ensaios de tração. A resposta do *Strain Gauge* apresentou o comportamento linear esperado, enquanto a do sensor magnetoelástico descreveu novamente a curva de formato sigmoideal. Este resultado confirmou que a substrato estava deformando linearmente, e forneceu uma deformação empírica com a qual comparar a resposta do sensor.

Este resultado comprovou que o sensor magnetoelástico pode ser usado em superfícies ferromagnéticas, e apresentou possuir, nestas condições, sensibilidade superior àquela encontrada nos ensaios com substratos de latão, com *Gauge Factors* de 416 e 136. Isto evidencia a aplicabilidade do sensor magnetoelástico em situações reais, nas quais é previsto o seu uso em diferentes superfícies metálicas.

A influência do estado de magnetização do substrato e do transdutor sobre o comportamento do ressonador deve ser estudada mais profundamente para uma caracterização mais detalhada e reproduzível do sensor magnetoelástico. A utilização de um software de simulação magnética pode elucidar melhor a forma como os campos magnéticos de diferentes componentes do sensor se distribuem sobre o ressonador.

7 PUBLICAÇÕES

Um número de técnicas e ensaios decorrentes da pesquisa que objetiva o desenvolvimento do sensor magnetoelástico de deformação possibilitaram a realização de diversas publicações pelo Laboratório de Caracterização Magnética da Universidade de Caxias do Sul, as quais serão brevemente descritas.

A necessidade de realização de tratamentos termomagnéticos nas fitas amorfas levou ao desenvolvimento de um forno no laboratório para este fim, o qual foi objeto de uma patente:

1. **DALPONTE, A., BASTOS, E. S., MISSELL, F. P. “Método de tratamento termomagnético em fita amorfa, uso de fita amorfa e sistema de detecção de deformação em substrato”, BR 10 2016 017237 3, Patente depositada no INPI em 25/07/2016.**

Os resultados obtidos a partir os tratamentos térmicos realizados neste forno foram então publicados no *Journal of Applied Physics*.

2. **DALPONTE, A., BASTOS E. S., MISSELL F. P. “Enhanced response from field-annealed magneto-elastic strain sensor”, *Journal of Applied Physics* 120 (2016) 064502.**

Posteriormente, os resultados com a utilização FeAlB como transdutor foram apresentados na forma de pôster durante a International Magnetism Conference - Intermag 2017 realizada em Dublin, Irlanda. Recebi uma bolsa de \$1000 da IEEE Magnetism Society para custear a minha participação na conferência em Dublin. A minha participação na Intermag 2017 também resultou em discussões com profissionais de diferentes nacionalidades que ajudaram a guiar a continuidade da pesquisa. Finalmente um artigo sobre o trabalho com FeAlB foi aceito para publicação em *IEEE Transactions on Magnetism*:

3. **BASTOS, E. S., DALPONTE, A., MISSELL, F. P., FULOP, G. O., DIAS, M. B. de S., BORMIO-NUNES C. Linear Wireless Strain Sensor using FeAlB and Amorphous Alloys. *IEEE Transactions on Magnetism*. Vol 53, p 1-4, 2017.**

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver simulações magnéticas para determinar com precisão a distribuição de campos magnéticos sobre o ressonador.

Realizar ensaios de histerese mecânica com o sensor magnetoelástico, para determinar se há remanência na sua frequência de resposta, e se seu comportamento se altera com o número de ciclos realizados.

Realizar ensaios com diferentes geometrias de transdutor, para determinar uma espessura o permita deformar uniformemente, simultaneamente permitindo que este possua volume o bastante para que seu campo magnético envolva o ressonador.

Estudar o uso de diferentes materiais como interfaces deformáveis entre o transdutor e o substrato, permitindo adaptar a relação entre a deformação de ambos, aumentando a abrangência de aplicações do sensor magnetoelástico.

9 REFERÊNCIAS

BASTOS, E. S., DALPONTE, A., MISSELL, F. P., FLUOP, G. O., DIAS, M. B. de S., BORMIO-NUNES C. Linear Wireless Strain Sensor using FeAlB and Amorphous Alloys. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol 53, p 1-4, 2017.

BELTRAMI, M. **Desenvolvimento e Construção de Sensor Magnetoelástico de pH com Eletrônica Portátil**. Dissertação – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016. 125 p.

BERTOTTI, G. **Hysteresis In Magnetism: For Physicists, Material Scientists, and Engineers**. Ed. 1. San Diego: Academic Press, 1998.

BORMIO-NUNES, C.; dos SANTOS C. T., DIAS M. B. de S., DOERR M., GRANOVSKY S., LOEWENHAUPT M. Magnetostriction of the polycrystalline Fe₈₀Al₂₀ alloy doped with boron. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 539, p. 226-232. 2012.

BORMIO-NUNES, C., DIAS, M. B., GHIVELDER, L. High magnetostriction of the polycrystalline alloy (Fe_{0.8}Al_{0.2})₉₇B₃. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 574, p. 467-471, 2013.

BORMIO-NUNES C., PADUANI, C., SANTOS, C. T., IZÁRIO, H. J., COELHO, A. A., GHIVELDER, L. Magnetostriction of Fe_{100-x}V_x Alloy for 5.2 ≤ x ≤ 40.7. **Journal of Alloys and Compounds**. Vol. 553, p. 233-238, 2013.

CHAI, Q. Y., GRIMES, A. G. A remote query magnetoelastic pH sensor. **Sensors and Actuators**. B 71 (2000) p. 112-117, jul. 2000.

CHAI, Y. Real-Time, in-situ Detection of Pathogenic Bacteria on Food Surfaces Using a Surface-Scanning Coil Detector and Phage-Based Magnetoelastic Biosensors. Maio, 2014. 137 p. Dissertação - Graduate Faculty of Auburn University. Auburn, Alabama.

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

CULLITY, C. B., GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. Ed. 2. IEEE Press: John Wiley & Sons, 2009.

DALPONTE, A. **Melhoramento de Sensores Magnetostrictivos de Tensão**. Dissertação – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2017.

DALPONTE, A., BASTOS, E. S., MISSELL, F. P. Enhanced response from field-annealed magnetoelastic strain sensor. **Journal of Applied Physics**. Vol. 120, p. 064502, 2016a.

DALPONTE, A., BASTOS, E. B., MISSELL, F. P. Método de tratamento termomagnético em fita amorfa, uso da fita amorfa e sistema de detecção de deformação em substrato. BR 102016 0172373. 25 Jul. 2016b.

GLOBAL CSS INSTITUTE. **Preliminary Feasibility Study on CO2 Carrier for Ship based CCS**. Disponível em: <<http://www.globalccsinstitute.com/publications/preliminary-feasibility-study-co2-carrier-ship-based-ccs>> Acesso em: 7 de março de 2018.

GRIMES, C. A., MUNGLE, C. S., ZENG, K., JAIN, M. H., DRESCHER, W. R., PAULOSE, M., ONG, K. G. Wireless Magnetoelastic Resonance Sensors: A Critical Review. **Sensors**. Vol. 2, p. 294-313, 2002.

GRIMES, C. A., ONG, K. G., LOISELLE, K., STOYANOV, P. G., KOUZOUNDIS, D., LIU, Y., TONG, C., TEFIKU, F. Magnetoelastic sensors for remote query environmental monitoring. **Smart Materials and Structures**. Vol. 8 p. 639–646. 1999.

GUNTUPALLI, R., LAKSHMANAN, R. S., HU, J., HUANG, T. S., BARBAREE, J. M., VODYANOY, V., CHIN, B. A. Rapid and sensitive magnetoelastic biosensors for the detection of *Salmonella typhimurium* in a mixed microbial population. **Journal of Microbiological Methods**. Vol. 70, p. 112-118, 2011.

HERZER, G. Magnetic materials for electronic article surveillance. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. Vol. 254-255, p. 598-602, 2003.

HORIKAWA, S., CHAI, Y., WICKLE, H. C., DAI, J., HU, J., SUH, S., VODYANOY, V., CHIN, B. A. Nature-Inspired magnetoelastic biosentinels for the detection of pathogenic bacteria in stagnant liquids. **SPIE**. Vol. 9488 94880C-1, 2015.

HÜBERT, T., BOON-BRETT, L., BLACK, G., BANACH, U. Hydrogen sensors – A review. **Sensors and Actuators**. Vol. B 157, p. 329-352, 2011.

LIANG, C., MORSHED, S., PROROK, B. C. Correction for longitudinal mode vibrations in thin slender beams. **Applied Physics Letters**. Vol 90, p. 221912, 2007.

MENTI, C., BELTRAMI, M., POZZA, M. D., MARTINS, S. T., HENRIQUES, J. A. P., SANTOS, A. D., MISSELL, F. P., ROESCH-ELY, M. Influence of antibody immobilization strategies on the analytical performance of a magneto-elastic immunosensor for *Staphylococcus aureus* detection. **Materials Science and Engineering C**. Vol. 76, p. 1232–1239, 2017.

MUNGLE, C., GRIMES, A. C., DRESCHEL W. R. Magnetic field tuning of the frequency-temperature response of a magnetoelastic sensor. **Sensor and Actuators**. Vol. 101, p. 149 – 149, 2002.

O'HANDLEY, R. C., **Modern Magnetic Materials: Principles and Applications**. John Wiley & Sons, 2000.

O'HANDLEY, R. C., CHOU, C. P. Magnetoelastic effects in metallic glasses. **Journal of Applied Physics**. Vol 49(3), p. 1659, 1978.

OSBORN, J. A. Demagnetizing Factors of the General Ellipsoid. **Naval Ordnance Laboratory**. Vol 67, p. 351, 1945.

POSSAN, A. L., MENTI, C., BELTRAMI, M., SANTOS, A. D., ROESCH-ELY, M., MISSELL, F. P. Effect of surface roughness on performance of magnetoelastic biosensors for the detection of *Escherichia coli*. **Materials Science and Engineering C**. Vol. 58, p. 541–547, 2016.

POZZA, M. D., POSSAN, A. L., ROESCH-ELY, M., MISSELL, F. P. Magneto-elastic biosensors: Influence of different thiols on pathogen capture efficiency. **Materials Science and Engineering C**. Vol. 75, p. 629 - 639, 2017.

SUESS, D. Wireless Sensor for Measuring Mechanical Stress. United States patent US 20110232392A1. 29 Set. 2011.

TECHNIP. **Flexible Pipe**. Disponível em < <http://www.technip.com/en/our-business/subsea/flexible-pipe> >. Acesso em 17/01/2017.

TORMES, C. D., BELTRAMI, M., CRUZ, R. C. D., MISSELL, F. P. Characterization of drying behavior of granular materials using magnetoelastic sensors. **NDT & E International**. Vol. 66, p. 67-71, 2014.