

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**

**ALESSANDRO DALPONTE**

**MELHORAMENTO DE SENSORES MAGNETOSTRICTIVOS DE DEFORMAÇÃO**

**CAXIAS DO SUL  
2017**

**ALESSANDRO DALPONTE**

**MELHORAMENTO DE SENSORES MAGNETOSTRICTIVOS DE DEFORMAÇÃO**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador Prof. Dr. Frank Patrick Missell

**CAXIAS DO SUL  
2017**

D149m Dalponte, Alessandro

Melhoramento de sensores magnetostrictivos de deformação /  
Alessandro Dalponte. – 2017.

100 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa  
de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais, 2017.

Orientação: Frank Patrick Missell.

1. Sensores magnetostrictivos. 2. Tratamentos termomagnéticos. 3.  
Fitas magnéticas amorfas. 4. Frequência de ressonância. 5.

Sensoriamento remoto. I. Missell, Frank Patrick, orient. II. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UCS com os dados  
fornecidos pelo(a) autor(a).

**ALESSANDRO DALPONTE**

**MELHORAMENTO DE SENSORES MAGNETOSTRICTIVOS DE DEFORMAÇÃO**

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência dos Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando obtenção de grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais.

Orientador Prof. Dr. Frank Patrick Missell

Caxias do Sul, 21 de Fevereiro de 2017.

**Banca Examinadora:**

Prof. Dr. Frank Patrick Missell (Orientador)  
Universidade de Caxias do Sul – (UCS)

Prof. Dr. Rubem Luis Sommer  
Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – (CBPF)

Prof. Dr. Cláudio Antônio Perottoni  
Universidade de Caxias do Sul – (UCS)

Prof. Dr. Carlos Alejandro Figueroa  
Universidade de Caxias do Sul – (UCS)

“Dude, suckin’ at something is the first step towards being sorta good at something.”

**Jake the Dog – Adventure Time**

## RESUMO

Fitas magnéticas amorfas vêm demonstrando uma ampla variedade de aplicações sensoriais devido às suas propriedades magnéticas. A capacidade de serem interrogadas remotamente permite sua aplicação em locais onde limitações físicas impedem o uso de sensores com conexões cabeadas. A capacidade de adquirirem uma anisotropia magnética transversal através de tratamentos térmicos, sob campo magnético e/ou tensão, é o que torna esses materiais atraentes para a aplicação em sensores magnetostrictivos de deformação com acesso remoto. Os materiais avaliados neste trabalho, Metglas 2826MB3, Yeke 1k501, Yeke 1k501a, Vitrovac 7600, Vitroperm 800 e as fitas de EAS Tags, apresentavam curvas de magnetização características de materiais que não possuem uma anisotropia magnética transversal. Isto serviu de motivação para a realização de tratamentos termomagnéticos. Os tratamentos foram realizados sob campo magnético transversal de aproximadamente 500 Oe e nas temperaturas de 235, 275, 315 e 350°C por tempos de 15, 30 e 60 minutos, com um forno construído em laboratório. Isto resultou em melhorias consideráveis na forma de suas curvas  $\Delta E$ , tornando-as mais assimétricas e aumentando as variações de frequência que estes materiais podem apresentar. Os tratamentos resultaram também em curvas  $M-H$  lineares, susceptibilidade magnética constante até a saturação. Foi construída uma bancada para aplicação de tensões de até 30 MPa nas amostras. A maior assimetria das curvas  $\Delta E$  para o par ressonador e transdutor (partes componentes do sensor de deformação) permitiu maior resposta de variação de frequência de ressonância do sensor durante testes de tração. No melhor dos casos, uma variação de frequência superior a 5 kHz foi detectada para deformações de aproximadamente 260 ppm, ao se utilizar um par ressonador e transdutor de Metglas 2826MB3 tratados termomagneticamente. Medindo-se as curvas  $\Delta E$  de uma fita de Metglas 2826MB3, tratada, sobre substratos de aço 1010, material magneticamente mole, observou-se que as mesmas ainda estavam presentes. Porém, apresentam sua forma alterada devido à interação com aço. Simulações realizadas com o software FEMM, auxiliaram na compreensão de fenômenos ocorridos nos testes de deformação e na interação entre a fita e os substratos magnéticos moles.

## ABSTRACT

Magnetic amorphous ribbons have a great variety of sensorial applications due to their magnetic properties. The possibility of being remotely queried allows their application in cases where sensors with wired connections present a physical limitation. The capability of acquiring a transverse magnetic anisotropy through thermal treatments, under applied magnetic field and/or stress, is what makes these materials attractive for application in magnetostrictive strain-gauges. The materials studied in this work, Metglas 2826MB3, Yeke 1k501, Yeke 1k501a, Vitrovac 7600, Vitroperm 800 and a commercial EAS Tags, presented magnetization curves with characteristics of materials with reduced transverse magnetic anisotropy. This was the motivation to carry out thermomagnetic treatments. The treatments were carried out under a magnetic field of approximately 500 Oe, using temperatures of 235, 275, 315 and 350°C, for periods of 15, 30 and 60 minutes, in a home-made oven. The treatments resulted in considerable improvements on the shape of the  $\Delta E$  curves, making them more asymmetric and increasing the frequency variations that these materials can present. The treatments also resulted in linear  $M-H$  curves, with constant magnetic susceptibility until saturation. A system for the application of stresses up to 30 MPa on the samples was built.  $\Delta E$  curves with greater asymmetry for the pair resonator transducer (components of the strain-gauge) allowed a greater resonance frequency variation response of the sensor during strain tests. In the best case, a frequency variation above 5 kHz was detected for deformations of approximately 260 ppm, when the pair resonator transducer made of thermomagnetically treated Metglas 2826MB3 was used. The measurements of the  $\Delta E$  curves of a treated Metglas 2826MB3 ribbon, placed over 1010 steel substrates, soft magnetic material, showed that they were still detectable. However, their form was altered due to the magnetic interaction with the steel. Simulations made using the software FEMM, helped to understand the observed phenomena during the strain tests and the interaction between the ribbon and the soft magnetic substrates.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição mássica aproximada das ligas utilizadas.....	47
Tabela 2. Campos de anisotropia e variações máximas de frequência para fitas tratadas. ....	71
Tabela 3. Constantes de anisotropia $K_a$ para as fitas tratadas. ....	74
Tabela 4. Valores aproximados de variações de frequência de ressonância e deformações.....	82
Tabela 5. Gauge Factor para os pares ressonador e transdutor.....	83

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação dos momentos magnéticos dentro de um material ferromagnético. Adaptado de [34].	24
Figura 2. Magnetização de um material ferromagnético através da intensificação de um campo $H$ , a) material desmagnetizado, b) movimentação inicial de paredes, c) finalização da movimentação de paredes, d) rotação dos momentos magnéticos dos domínios restantes. Adaptado de [34].	24
Figura 3. Curva de histerese de um material ferromagnético. Adaptado de [34].	25
Figura 4. Curva de magnetização de um material ferromagnético. Adaptado de [34].	26
Figura 5. Eixos magnéticos fácil e difícil para uma fita metálica amorfa com anisotropia transversal ao seu eixo longo. Os momentos magnéticos ficam direcionados paralelamente à direção do eixo magnético fácil. Adaptado de [40].	28
Figura 6. Representação da densidade de energia, $K$ , através da área tracejada. Curva de magnetização com forma típica para material que apresenta apenas rotação dos seus momentos magnéticos. Adaptado de [14,15,34].	29
Figura 7. Rotação de momentos magnéticos com a aplicação de campo magnético. a) Momentos perpendiculares ao eixo longo do material; b) Rotação de momentos magnéticos com a intensificação de campo; c) Saturação dos momentos magnéticos quando o campo de anisotropia é aplicado. Adaptado de [14,16].	31
Figura 8. Comportamento dos momentos magnéticos e suas regiões de domínio em função da aplicação de tensões e campos magnéticos. Lado 1) magnetostricção positiva e lado 2) negativa. Adaptado de [34].	34
Figura 9. Efeito de esforços de tensão sobre a curva de magnetização de um material com magnetostricção positiva. A linha contínua representa o material no estado não tensionado. Adaptado de [15,35].	35
Figura 10. Frequência de ressonância $f_R$ . Impedância do sistema de detecção ( $Z$ ) versus frequência de excitação ( $f$ ). Adaptado de [16].	37
Figura 11. Deformação versus tensão em um material magnetostrictivo, no regime elástico. Adaptado de [15].	37

Figura 12. Variação do módulo de elasticidade para a) modelo teórico de um material com anisotropia magnética transversal e b) dados experimentais. Adaptado de [46]. .....	39
Figura 13. Esquema representativo das bobinas num sistema de detecção. 1) Bobinas para campo de bias; 2) bobinas para campo de excitação; 3) bobina pick-up. Adaptado de [1]. .....	41
Figura 14. Variação da frequência de ressonância e amplitude de vibração em função de campo magnético para uma fita Metglas 2826MB3. Adaptado de [1]. .....	41
Figura 15. Arquitetura de um sensor magnetostrictivo de deformação. 1) Transdutor; 2) Ressonador; 3) Ímã para atribuir um ponto de operação; 4) Substrato a ser avaliado; 5) Envelope protetivo. Adaptado de [25]. .....	42
Figura 16. Influência de tratamento térmico em uma fita Metglas 2826 MB, 4 cm, a 200°C, sob campo transversal de 1300 Oe durante 2 horas. Adaptado de [44]. .....	44
Figura 17. Curvas M-H para Metglas 2826 AC como recebido de fábrica e após annealing de 2 horas, a 325 °C sob campo transversal com diferentes taxas de resfriamento. Adaptado de [37]. .....	45
Figura 18. A) Esquema representativo e B) fotografia do sistema de aquisição das curvas $\Delta E$ . 1) Bobinas de Helmholtz para campo DC; 2) Bobinas de Helmholtz para campo AC; 3) Bobina pick-up; 4) Gerador de função; 5) Amplificador sintonizado lock-in; 6) Fonte de corrente DC; 7) Computador para aquisição de dados. .....	48
Figura 19. Curva de frequência $\Delta E$ para fita Yeke 1k501a tratada a 315°C por 30 minutos. .....	49
Figura 20. A) Diagrama geral e B) fotografia do sistema para aquisição de curvas de histerese e magnetização. 1) Traçador de histerese; 2) Bobina excitadora; 3) Bobina pick-up. .....	50
Figura 21. Curva de magnetização para uma fita Metglas 2826MB3, de fábrica. .....	51
Figura 22. A) Esquema representativo e B) fotografia do forno para tratamento termomagnético das fitas amorfas. 1) Suporte pra ímãs de neodímio; 2) Tubo de quartzo para aplicação de vácuo; 3) Suporte para cruzeta; 4) Base para regulagem de altura do ímãs. .....	52
Figura 23. A) Esquema representativo e B) foto do sistema para tração de substratos de latão para teste dos transdutores e ressonadores. 1) Amostra de latão; 2) Bobina ou conjunto de bobinas para aplicação de campo e detecção de ressonância; 3) Âncora para a aplicação de pesos. .....	54

Figura 24. Teste de deformação com extensômetro. ....	55
Figura 25. A) Esquema representativo, adaptado de [52] e B) foto da tira de latão para teste de tração. 1) Tira de latão para tração; 2) Transdutor colado sobre a tira de latão; 3) Ressonador posicionado sobre o transdutor. ....	56
Figura 26. Foto do analisador de redes da Agilent Technologies. ....	57
Figura 27. Interface de usuário do software FEMM, versão 4.2. Simulação de linhas de campo magnético geradas por bobinas de Helmholtz com amostra de Metglas 2826 MB3 centralizada. ....	57
Figura 28. Curva da frequência de ressonância de uma fita Metglas 2826MB3 não tratada. ....	59
Figura 29. Modelo teórico da curva da frequência de ressonância reduzida para material amorfo magnetostrictivo com anisotropia magnética transversal. ....	59
Figura 30. Curvas da frequência de ressonância para uma fita Metglas 2826MB3 não tratada e tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	60
Figura 31. Curvas de magnetização para Metglas 2826MB3 não tratada e tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	61
Figura 32. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	62
Figura 33. Variação da frequência de ressonância em função do campo para uma fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	63
Figura 34. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Metglas 2826MB3 tratadas a 315°C, durante diferentes tempos, com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	64
Figura 35. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Yeke 1k501 tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	65
Figura 36. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Yeke 1k501a tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	65
Figura 37. Curvas de magnetização para fita Yeke 1k501 antes e após tratamento a 350°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. ....	66

Figura 38. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Vitrovac 7600 tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.....	67
Figura 39. Curvas de magnetização para fita Vitrovac 7600 antes e após tratamento a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.....	67
Figura 40. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para uma fita de EAS tag tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.....	68
Figura 41. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para uma fita de Vitroperm 800 tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.....	69
Figura 42. Pico de frequência de ressonância para fita Yeke 1k501 não tratada. Campo de bias de ~7,06 Oe.....	70
Figura 43. Pico de frequência de ressonância para fita Yeke 1k501 após tratamento a 275°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. Campo de bias de ~7,06 Oe.....	71
Figura 44. Temperatura em função do tempo de resfriamento.....	72
Figura 45. Taxas de resfriamento em função da temperatura.....	73
Figura 46. Esquema representativo da interação entre 3) ressonador e 2) transdutor durante um processo de deformação de um 1) substrato. Adaptado de [52].....	76
Figura 47. Teste de deformação para o transdutor Yeke 1k501 tratado a 350°C por 30 minutos. Ressonadores Yeke 1k501, Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.....	77
Figura 48. Teste de deformação para o transdutor Yeke 1k501a tratado a 350°C por 30 minutos. Ressonadores Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.....	78
Figura 49. Teste de deformação para o transdutor Metglas 2826MB3 tratado a 315°C por 60 minutos. Ressonadores Yeke 1k501, Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.....	79
Figura 50. Teste de deformação para o transdutor Metglas 2826MB3 tratado a 315°C por 60 minutos. Adaptado de [52].....	80
Figura 51. Curvas de magnetização para fita Metglas 2826MB3, antes e após colagem, tratada a 315°C por 30 minutos.....	81

Figura 52. Variação da frequência de ressonância em função do campo magnético, para fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, sobre três substratos magneticamente moles (desmagnetizados) de diferentes dimensões. ....	84
Figura 53. Variação da frequência de ressonância em função do campo magnético, para fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, sobre três substratos magneticamente moles de diferentes dimensões. ....	85
Figura 54. Simulação de densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 sobre transdutor idêntico ao ressonador. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe. ....	87
Figura 55. Simulação de densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 sobre transdutor magnetizado. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe. ....	87
Figura 56. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 1 de aço 1010. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe. ....	88
Figura 57. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 2 de aço 1010. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe. ....	88
Figura 58. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 3 de aço 1010. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe. ....	89
Figura 59. Artigo publicado e desenvolvido através do trabalho de mestrado. ....	90

## NOMENCLATURAS

Al – Alumínio

A – Ampère

Amp – Amplificador

AC – Corrente Alternada

A – Seção transversal

B – Boro

B.n – Densidade de fluxo magnético normal

B<sub>s</sub> – Indução de saturação

B – Indução magnética

Co – Cobalto

Cu – Cobre

°C – Graus Celsius

DC – Corrente contínua

$\Delta l$  – Variação dimensional

$\Delta f$  – Variação de frequência de ressonância

$\Delta E$  – Variação no módulo de Young

E – Energia

e – Deformação

E – Módulo de Young

EAS Tag – Electronic Article Surveillance Tag

EDS – Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

E<sub>M</sub> – Módulo de Young à magnetização constante

$E_H$  – Módulo de Young para material não saturado magneticamente

$\epsilon_M$  – Deformação magnetostrictiva

$\epsilon$  – Deformação puramente mecânica

$\epsilon_{tot}$  – Deformação total

Fe- Ferro

$f$  – Frequência de excitação

$f_0$  – Frequência de ressonância inicial

$f_R$  – Frequência de ressonância

$g$  – Gravidade

GF – Gauge Factor

GPa – Gigapascal

$H$  – Campo aplicado

$H_A$  – Campo de anisotropia

$H_A^{eff}$  – Campo de anisotropia efetivo

$H_s$  – Campo de saturação

$H_{trat}$  – Campo magnético transversal para tratamento

Hz – Hertz

J – Joule

$K_a$  – Constante de anisotropia

kg – Quilograma

kHz- Quilohertz

kW – Quilowatts

$L$  – Comprimento direção avaliada

$l$  – Deformação

$\lambda$  – Magnetostricção

$\lambda_s$  – Magnetostricção de saturação

M – Magnetização

$M_s$  – Magnetização de saturação

m – Magnetização relativa

m – Massa

m – Metro

min – Minutos

mm – milímetro

Mo – Molibdênio

MPa – Megapascal

mV – Milivolt

$\mu_0$  – Permeabilidade do espaço livre

$\mu_r$  – Permeabilidade relativa

Nb – Nióbio

Ni – Níquel

$\nu$  – Módulo de Poisson

Oe – Oersted

$\theta$  – Ângulo teta

Pa – Pascal

ppm – Parte por milhão

$\rho$  – Massa específica

Ref – Referência

Res – Resposta

s – Segundo

Si – Silício

$\sigma$  – Tensão aplicada

T – Temperatura

t – Tempo

T – Tesla

Unid. Arb. – Unidades Arbitrárias

$u_a$  – Energia por unidade de volume

V – Volt

wt% - Porcentagem mássica

X – Susceptibilidade magnética

Z – Impedância

## SUMÁRIO

<b>1 Introdução</b> .....	<b>19</b>
<b>2 Objetivos</b> .....	<b>21</b>
2.1 Objetivos gerais .....	21
2.2 Objetivos específicos .....	21
<b>3 Referencial teórico</b> .....	<b>22</b>
3.1 Sensor magnetostrictivo de deformação e ligas amorfas .....	22
3.2 Momentos magnéticos.....	23
3.2.1 Curvas de histerese e magnetização .....	25
3.3 Anisotropia magnética e modelo magnetostrictivo (fitas metálicas amorfas)...	27
3.3.1 Anisotropia magnética.....	27
3.3.2 Magnetostricção para fitas metálicas amorfas .....	30
3.4 Frequência de ressonância e efeito $\Delta E$ .....	35
3.4.1 Frequência de Ressonância Magnética .....	35
3.4.2 Efeito $\Delta E$ e sua influência na frequência de ressonância magnética .....	37
3.5 Arquitetura de um sensor de deformação magnetostrictivo.....	42
3.6 Tratamentos térmicos .....	43
<b>4 Materiais e métodos</b> .....	<b>47</b>
<b>5 Resultados e discussões</b> .....	<b>58</b>
5.1 Composição das ligas.....	58
5.2 Tratamentos térmicos .....	58
5.3 Cálculo das constantes de anisotropia .....	73
5.4 Teste de deformação.....	75
5.5 Curvas $\Delta E$ com substrato magnético.....	83
5.6 Simulações .....	85

5.7 Trabalhos publicados pelo grupo.....	89
<b>6 Conclusões .....</b>	<b>91</b>
<b>7 Sugestões para trabalhos futuros .....</b>	<b>93</b>
<b>8 Agradecimentos .....</b>	<b>94</b>
<b>9 Referências .....</b>	<b>95</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Em trabalhos e artigos publicados previamente pelo grupo do Laboratório de Caracterização Magnética (LCM) da Universidade de Caxias do Sul, sensores magnetostrictivos empregando fitas metálicas amorfas foram utilizados para mensurar remotamente a taxa de secagem de materiais cerâmicos, e também, para detectar e quantificar bactérias nocivas à saúde humana [1-9]. Tendo em vista o potencial destes materiais para diversas aplicações sensoriais [10], o melhoramento de sensores de deformação magnetostrictivos se tornou o foco de estudo deste trabalho.

Sensores de deformação, como extensômetros (strain-gauges) e sensores de fibra óptica baseados em redes de Bragg, são amplamente utilizados na análise e monitoramento de deformações em substratos para a prevenção de catástrofes geradas por esforços mecânicos. Em *risers*, dutos flexíveis utilizados para transportar petróleo do leito oceânico à plataforma petrolífera [11], esforços de fadiga ocorrem devido à movimentação da plataforma, ocasionada pelas ondas. Empresas como a Petrobras, possuem milhares de quilômetros de *risers* instalados e em operação, tendo cada *riser*, em média, 4 quilômetros de comprimento. O monitoramento constante desse tipo de duto se faz necessário para que sua vida útil seja prolongada e catástrofes, que podem levar ao vazamento de petróleo e outros subprodutos gerados nos procedimentos de extração, possam ser evitadas.

Os *risers* são dutos flexíveis constituídos por múltiplas camadas metálicas e poliméricas, que lhes conferem resistência mecânica e resistência à corrosão [11]. A utilização de sensores de deformação que necessitam de conexões com cabos, como os mencionados anteriormente, podem ser prejudiciais para o bom funcionamento destes dutos. O ponto de acesso destes sensores ao componente estrutural interno dos dutos, o qual se deseja avaliar, pode se tornar uma porta de entrada para agentes corrosivos presentes na atmosfera marinha, deteriorando as propriedades mecânicas dos dutos com o passar do tempo.

Um sensor magnetostrictivo de deformação pode ser uma alternativa favorável para o monitoramento desses dutos. Estes sensores são constituídos por fitas metálicas amorfas que, devido às suas propriedades magnéticas, podem ser interrogadas remotamente através de pulsos magnéticos ou campos alternados

[12,13]. As fitas magnetostrictivas apresentam variação dimensional quando sob a presença de campos magnéticos, e são capazes de alterar seu estado de magnetização quando deformadas. Durante estes processos, o seu módulo de elasticidade varia, fenômeno conhecido como efeito  $\Delta E$ , responsável pelo funcionamento desses sensores [14,15,16].

A magnetostricção é uma propriedade fundamental de magnetos que descreve a variação de suas dimensões físicas em função do seu estado de magnetização [17]. A existência de magnetostricção permite a utilização de materiais magnéticos, e especialmente fitas amorfas, em diferentes tipos de sensoriamento, como temperatura, pressão, e viscosidade, por exemplo. O sensor abordado neste trabalho é uma possível solução para mensurar deformações em qualquer sistema que, por alguma limitação física, impeça a instalação de sensores com conexões cabeadas [18,19,20].

As curvas de magnetização para as fitas avaliadas neste trabalho apresentaram um comportamento característico de materiais que não possuem anisotropia magnética transversal ao eixo longo e que podem apresentar tensões internas provenientes do processo de fabricação. Isto motivou a realização de tratamentos termomagnéticos, através dos quais pode-se melhorar a performance das fitas magnéticas amorfas quando utilizadas no sensor. Estes tratamentos são bem conhecidos pela comunidade de magnetismo. No presente caso, os tratamentos a serem discutidos consistem em induzir uma anisotropia magnética transversal nas fitas, através de campo magnético e calor, ampliando o efeito magnetostrictivo dos materiais [21-24].

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVOS GERAIS

Melhorar o desempenho de sensores de deformação magnetostrictivos com acesso remoto através de tratamentos termomagnéticos em fitas metálicas amorfas com diferentes composições.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterizar algumas ligas metálicas amorfas para uso em diferentes funções no sensor de deformação, de acordo com sua arquitetura;

Construir um forno para a realização de tratamentos termomagnéticos;

Analisar e comparar as propriedades magnéticas de fitas metálicas amorfas com diferentes composições antes e após os tratamentos termomagnéticos;

Construir bancada para testes de tração;

Avaliar o desempenho do sensor de deformação sobre material não magnético;

Avaliar as diferenças na resposta das fitas magnetostrictivas quando interrogadas sobre material magnético e material não magnético.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Para uma boa compreensão do funcionamento dos sensores magnetostrictivos de deformação, como sua arquitetura e melhoramento de suas propriedades através de tratamentos termomagnéticos, é necessário explorar os fenômenos magnéticos que regem as propriedades dos materiais utilizados em sua fabricação e alguns conceitos físicos. Este trabalho trata exclusivamente de fitas metálicas amorfas ferromagnéticas, e todos os modelos fenomenológicos aqui apresentados são aplicados a esta classe de materiais.

#### 3.1 SENSOR MAGNETOSTRICTIVO DE DEFORMAÇÃO E LIGAS AMORFAS

Um sensor magnetostrictivo (também chamado de magnetoelástico) de deformação foi proposto por Suess [25]. Estes sensores são baseados nos mesmos princípios de funcionamento dos sensores antifurto, onde a frequência de ressonância de fitas metálicas amorfas é detectada continuamente. Suess, em suas patentes, idealiza a arquitetura do sensor, porém não sugere os materiais ideais para o seu melhor funcionamento [25,26].

O funcionamento deste sensor pode ser explicado de acordo com o efeito  $\Delta E$ , responsável por alterar a frequência de ressonância das fitas metálicas amorfas em função de seus estados magnéticos. Este efeito é tratado de forma mais detalhada posteriormente [14,15,20].

Ligas amorfas apresentam propriedades diferenciadas de outros materiais magnéticos moles, como, por exemplo, baixa perda magnética, alta permeabilidade, e curvas  $B-H$  com características dependentes do design escolhido e dos tratamentos térmicos realizados. Estas características permitem a aplicação dessas ligas em sensores com diversas finalidades, com a capacidade de interrogação remota, na qual não há necessidade de conexões cabeadas para a comunicação entre o sistema de detecção e o sensor [19,27].

A ausência de estrutura cristalina de longo alcance dessas ligas faz com que não apresentem contornos de grão, resultando em alta resistência mecânica, ideal para a produção de ressonadores e transdutores utilizados na arquitetura dos

sensores magnetostrictivos de deformação. Devido a isto, o sensor apresenta desempenho melhorado, podendo detectar maiores deformações [10,28].

Uma linha de metais amorfos amplamente utilizada na fabricação de sensores magnetostrictivos, são as ligas da empresa Metglas®. Estas ligas possuem diferentes composições, sendo nomeadas de acordo. A liga Metglas 2826 MB, composição  $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$ , é utilizada na fabricação de sensores antifurto, devido ao seu baixo custo e à capacidade de converter eficientemente a energia mecânica em magnética e vice-versa [10,29,30].

Outros materiais amorfos, como as fitas metálicas das empresas Vacuumschmelze® (Alemanha) e Beijing Yeke Co., Ltd. (China), também apresentam potencial para sua utilização em sensores magnetostrictivos de deformação. As fitas chinesas também possuem aplicação em sensores antifurto, enquanto as alemãs em uma diversidade maior de utilizações, envolvendo o monitoramento e controle de componentes eletrônicos [31,32].

### 3.2 MOMENTOS MAGNÉTICOS

Os momentos magnéticos dos materiais determinam o estado magnético no qual estes se encontram; sendo gerados através dos momentos magnéticos de spin e orbital dos elétrons [33]. Em um sistema isolado, o estado magnético resultante de um dado material depende das interações entre esses momentos, que por sua vez são dependentes da forma geométrica do material, de sua composição e da presença ou ausência de estrutura cristalina. Um conjunto de átomos com seus momentos magnéticos orientados em uma mesma direção compõem uma região conhecida como domínio magnético. As regiões de domínios magnéticos são usualmente representadas por vetores dentro do material, e são separadas pelas paredes de domínios, como representado esquematicamente na figura abaixo [33,34].

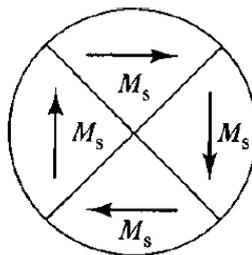


Figura 1. Representação dos momentos magnéticos dentro de um material ferromagnético. Adaptado de [34].

$M_s$  representa a magnetização de saturação, dentro de cada domínio, possuindo o valor máximo de magnetização que o material pode apresentar. Na figura acima, o momento magnético resultante do material ferromagnético é igual a zero, pois todos os momentos magnéticos se cancelam.

Ao aplicarmos um campo magnético sobre este material, podemos fazer com que se magnetize na direção do campo aplicado, sendo que a magnitude dessa magnetização dependerá da intensidade deste campo. Primeiramente, ocorrerá a movimentação das paredes de domínio, seguido pela rotação dos momentos magnéticos das regiões de domínio restantes, magnetizando completamente o material na direção do campo. Este estado é conhecido como saturação magnética, Figura 2 [14,33,34,35].

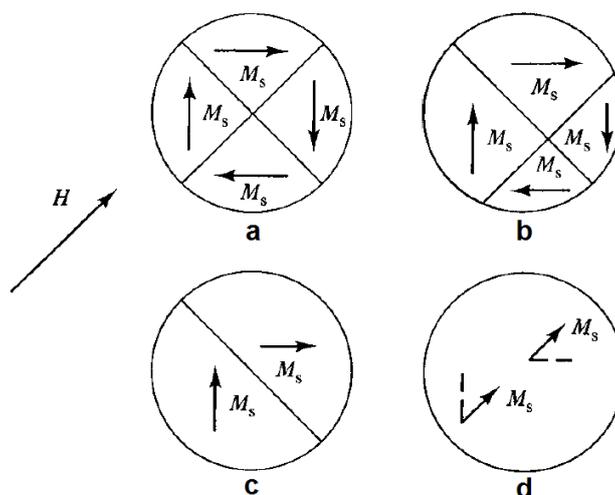


Figura 2. Magnetização de um material ferromagnético através da intensificação de um campo  $H$ , a) material desmagnetizado, b) movimentação inicial de paredes, c) finalização da movimentação de paredes, d) rotação dos momentos magnéticos dos domínios restantes. Adaptado de [34].

O vetor  $H$  é um campo magnético, com direção definida, que se intensifica e magnetiza o material completamente.

### 3.2.1 Curvas de histerese e magnetização

As curvas de histerese e magnetização são utilizadas para obter-se informações sobre propriedades magnéticas que caracterizam o material, como coercividade, remanência, magnetização de saturação, entre outras. Estas características são definidas através do comportamento dos momentos magnéticos e seus domínios [34,35,36].

Na Figura 3, é possível observar algumas características importantes da curva de histerese de um material ferromagnético.

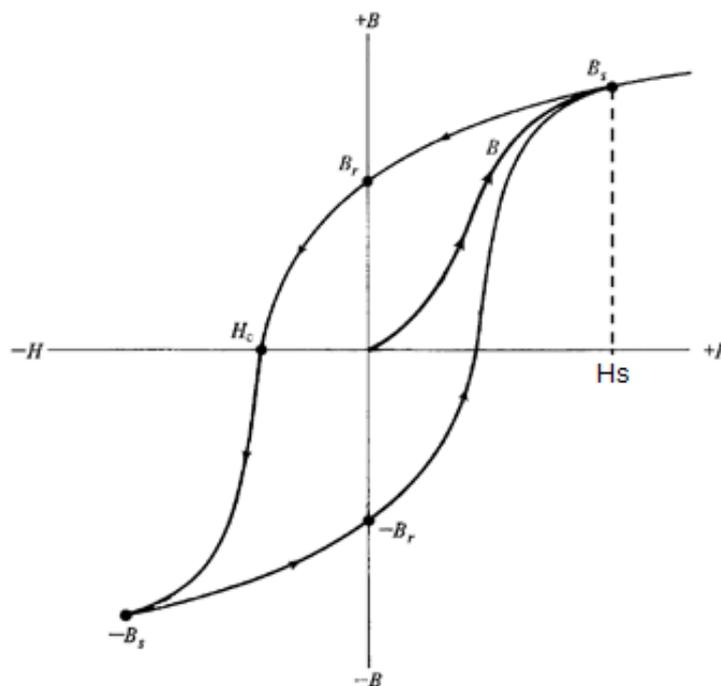


Figura 3. Curva de histerese de um material ferromagnético. Adaptado de [34].

Onde  $B$  é a indução magnética e  $H$  o campo magnético aplicado:

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

$B$  = Indução magnética ou densidade de fluxo magnético [T];

$\mu_0$  = Permeabilidade do espaço livre =  $4\pi \times 10^{-7}$  [T · (A · m<sup>-1</sup>)<sup>-1</sup>];

$H$  = Campo magnético aplicado [A · m<sup>-1</sup>];

$M$  = Magnetização [A · m<sup>-1</sup>].

À medida que o campo magnético aplicado se intensifica, os momentos magnéticos do material se direcionam paralelamente a este campo, aumentando a magnetização  $M$ . O campo de saturação  $H_s$  fornece a energia necessária para que o sistema chegue no ponto de saturação magnética em  $B_s$ , indução de saturação.

A remanência  $B_r$  é a parte da magnetização induzida que o material consegue reter após o campo  $H$  retornar ao valor zero. O campo coercivo  $H_c$  é o campo necessário para que a indução do material volte ao valor zero (neste caso, isto não indica que o material será desmagnetizado) [34,36].

A Figura 4 apresenta uma curva de magnetização de um material ferromagnético.

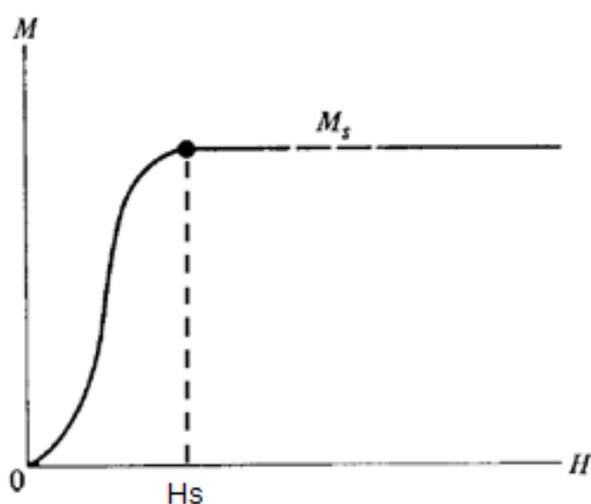


Figura 4. Curva de magnetização de um material ferromagnético. Adaptado de [34].

Esta curva apresenta diretamente a influência do campo magnético  $H$  sobre a magnetização  $M$ , componente magnética de  $B$  referente ao material. Assim como observado para a curva de histerese, o material atinge a saturação em  $M_s$ , quando o campo aplicado apresenta um valor igual ou superior a  $H_s$ . O campo magnético de saturação  $H_s$  é igual ao campo de anisotropia  $H_A$  somente quando o campo é aplicado perpendicular ao eixo fácil.

Uma propriedade importante é a susceptibilidade magnética de um material. Esta propriedade é a taxa na qual a magnetização do material varia em função de um campo aplicado. A inclinação da curva de magnetização é definida através da equação 2 [14,34,36].

$$\chi = \frac{\partial M}{\partial H} \quad (2)$$

$\chi =$  Susceptibilidade magnética [adimensional].

Como as características destas curvas são dependentes do estado magnético do material, na sequência, este tipo de análise fornecerá informações relevantes sobre os resultados de tratamentos termomagnéticos realizados nas fitas amorfas utilizadas nos sensores de deformação magnetostrictivos [14,35,37,38,39].

### 3.3 ANISOTROPIA MAGNÉTICA E MODELO MAGNETOSTRICTIVO (FITAS METÁLICAS AMORFAS)

#### 3.3.1 Anisotropia magnética

Anisotropia magnética significa que as propriedades magnéticas do material dependem da direção na qual são avaliadas. Este fator afeta diretamente a forma das curvas de histerese e magnetização [21,33,34].

Os materiais magnéticos cristalinos possuem direções cristalográficas sobre as quais os momentos magnéticos apresentam uma menor energia, e tendem a ficar

posicionados paralelamente a estas. Estas direções são conhecidas como eixos magnéticos fáceis. Os materiais magnéticos amorfos, como os utilizados neste trabalho, também podem apresentar estes eixos mesmo sem a presença de uma estrutura cristalina, Figura 5 [40]. Isto se dá através de tratamentos termomagnéticos (tema abordado posteriormente) [15,21,37].

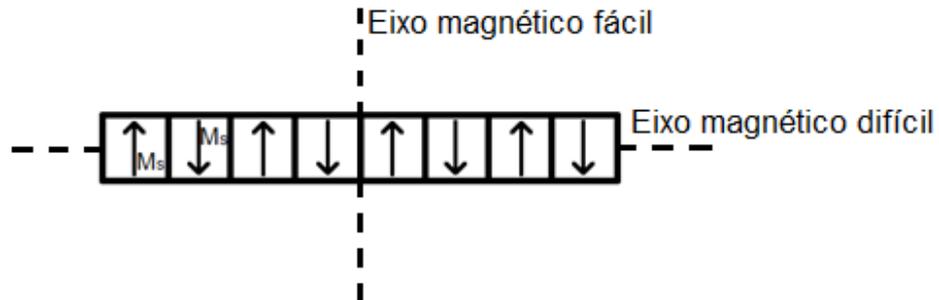


Figura 5. Eixos magnéticos fácil e difícil para uma fita metálica amorfa com anisotropia transversal ao seu eixo longo. Os momentos magnéticos ficam direcionados paralelamente à direção do eixo magnético fácil. Adaptado de [40].

O campo de anisotropia  $H_A$  fornece a energia necessária para magnetizar um material até que o mesmo atinja o seu estado de saturação magnética, direcionando os momentos magnéticos na direção do eixo difícil. A energia por unidade de volume necessária para que ocorra a saturação magnética em uma direção particular, também é conhecida como a constante de anisotropia  $K_a$ , equação geral 3 e 4 [15,33,41].

$$u_a = \mu_0 \int_0^{M_s} H(M) dM = \mu_0 \frac{M_s H_A}{2} \quad (3)$$

$$K_a = \mu_0 \frac{M_s H_A}{2} \quad (4)$$

$u_a =$  Energia por unidade de volume [ $J \cdot m^{-3}$ ];

$K_a =$  Constante de anisotropia [ $J \cdot m^{-3}$ ].

$K_a$ , mais precisamente, representa a densidade de energia proveniente da anisotropia magnética em um material. De forma prática, podemos encontrar o valor de  $K_a$  através da área entre a curva  $M-H$  e o eixo  $M$  do gráfico de magnetização, como exemplificado na Figura 6. Esta constante possui dependência sobre a direção na qual o material é magnetizado. Quanto menor o valor de  $K_a$  menor é a quantidade de energia necessária para que ocorra a magnetização do material [14,15,36,41].

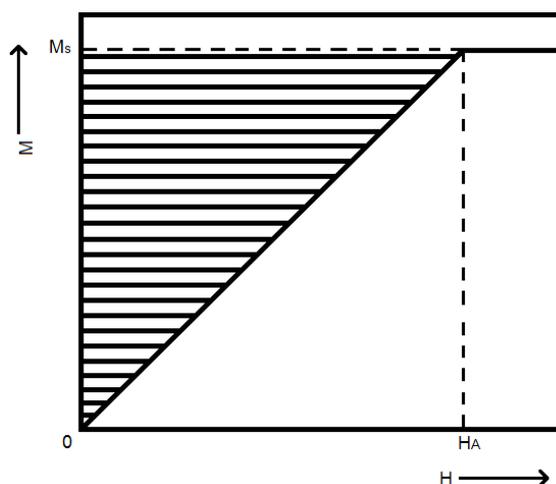


Figura 6. Representação da densidade de energia,  $K$ , através da área tracejada. Curva de magnetização com forma típica para material que apresenta apenas rotação dos seus momentos magnéticos. Adaptado de [14,15,34].

A curva de magnetização apresentada na Figura 6 é característica de um material que apresenta apenas rotação de seus momentos magnéticos, sem que ocorra o deslocamento de paredes. Em termos de anisotropia, este material apresenta anisotropia magnética transversal ao eixo de magnetização avaliado (momentos magnéticos perpendiculares) [14,22,35].

Desta forma é possível estimar o valor de  $K_a$  para este sistema com precisão, através da equação 4, pois sua susceptibilidade magnética é constante até a saturação, onde se torna zero [14,15,35].

Já, para materiais que apresentam deslocamento de suas paredes de domínio durante o processo de magnetização, Figura 2, as curvas características de histerese e magnetização não são lineares até o ponto da saturação magnética. A forma das

curvas dependerá dos ângulos das paredes de domínio entre si e entre o eixo de magnetização.

A anisotropia magnética de um material acaba por determinar o quanto de energia é necessário para que ocorra a magnetização do mesmo. Também indica qual é o processo de magnetização predominante no sistema, rotação de momentos ou movimentação de paredes [33,35,36].

Para os materiais magnetostrictivos utilizados no sensor de deformação proposto neste trabalho, a obtenção de uma anisotropia magnética transversal, sem a presença de paredes que possam se deslocar, é um parâmetro importante para o seu bom funcionamento [14,24,34,35,40]. Para uma melhor abordagem deste tópico, uma parte da discussão do mesmo é realizada juntamente à seção 3.3.2.

### 3.3.2 Magnetostricção para fitas metálicas amorfas

O fenômeno da magnetostricção é a capacidade que um material apresenta de alterar suas dimensões quando submetido à campos magnéticos, fenômeno também conhecido como magnetostricção de Joule. A deformação unidimensional de um material magnetostrictivo isotrópico pode ser definida através das equações 5 e 6 [15,17,33,34,40].

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad (5)$$

$$\lambda(\theta) = \frac{3}{2} \lambda_s \left[ \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right] \quad (6)$$

$\lambda$  = Magnetostricção (deformação) [adimensional];

$\Delta l$  = Variação dimensional [m];

$l$  = Dimensão inicial [m];

$\lambda_s$  = Magnetostricção de saturação (deformação)[adimensional];

$\theta = \text{Ângulo entre a magnetização e a direção de medição da magnetostricção.}$

A equação 5 representa um conceito mais geral da deformação magnetostricção, enquanto a equação 6 (proveniente da simplificação do modelo da magnetostricção de um cristal para o caso de um material amorfo [15, 34]) representa a magnetostricção em função do ângulo entre o momento magnético e a direção de medição da magnetostricção. A magnetostricção de saturação  $\lambda_s$  se refere à deformação máxima ocorrida no material, na direção avaliada, devido ao efeito magnetostricção.

A magnetostricção ocorre devido a um acoplamento entre os momentos magnéticos do material e a sua estrutura atômica. Isto faz com que a energia fornecida para a rotação dos momentos magnéticos ocasione uma alteração dimensional de acordo com a orientação destes momentos. A Figura 7 apresenta o comportamento magnetostricção, de uma fita amorfa com anisotropia magnética transversal ao seu eixo longo, quando magnetizado até atingir a saturação magnética [17,33,34,40,41].

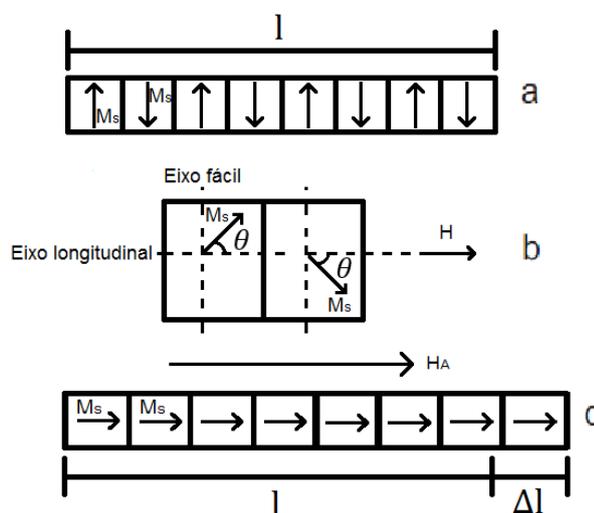


Figura 7. Rotação de momentos magnéticos com a aplicação de campo magnético. a) Momentos perpendiculares ao eixo longo do material; b) Rotação de momentos magnéticos com a intensificação de campo; c) Saturação dos momentos magnéticos quando o campo de anisotropia é aplicado. Adaptado de [14,16].

A orientação dos momentos magnéticos contribui para uma deformação paralela às suas direções. Para materiais magnetostrictivos com anisotropia transversal, Figura 7 a, o estado magnético pode ser definido através do balanço entre as energias de anisotropia magnética do material e a energia fornecida pelo campo magnético aplicado sobre o mesmo.

$$E = K_a \sin^2 \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) - \mu_0 M_s H \cos \theta \quad (7)$$

$\theta = \hat{\text{Ângulo entre os momentos magnéticos e o campo magnético.}}$

Quando a variação da energia em função do ângulo  $\theta$  possui valor nulo, o material atinge o equilíbrio com seus momentos magnéticos em direção definida.

$$\frac{\partial E}{\partial \theta} = 0 = -2K_a \cos \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) \sin \left( \frac{\pi}{2} - \theta \right) + \mu_0 M_s H \sin \theta \quad (8)$$

Colocando em evidência o termo  $\sin \theta$  desta equação, é possível observar que existem duas soluções possíveis para este sistema.

$$\sin \theta [-2K_a \cos \theta + \mu_0 M_s H] = 0 \quad (9)$$

A primeira solução é quando  $\sin \theta$  apresenta valor nulo, estado que representa a saturação magnética do material, indicando que os momentos estão em equilíbrio com o campo aplicado ao longo do eixo. A outra solução é quando o termo entre colchetes apresenta valor nulo, obtendo assim:

$$2K_a \cos \theta = \mu_0 M_s H \xrightarrow{\text{Substituindo-se } K_a} \cos \theta = \frac{H}{H_A} \quad (10)$$

Por definição, a magnetização  $M$  de um material é definida como uma componente de  $M_s$  na direção do campo magnético de medida.

$$M = M_s \cos \theta \quad (11)$$

Então, obtém-se uma relação direta entre os campos e os momentos magnéticos.

$$\cos \theta = \frac{H}{H_A} = \frac{M}{M_s} \quad (12)$$

Quando o campo magnetizante possui uma intensidade igual ou superior a  $H_A$ , a deformação ocorrida atinge o valor de  $\lambda_s$ . Também é importante ressaltar que, o maior valor de  $\lambda$  que um material pode apresentar, ocorre quando o mesmo possui anisotropia magnética transversal, como apresentado na Figura 7, pois neste estado seus momentos possuem a maior capacidade rotacional possível quanto ao eixo de magnetização [14,15,34,40].

Materiais magnetostrictivos também possuem a capacidade de se magnetizar através de uma deformação imposta em sua estrutura. Quando sob tensão, o acoplamento entre momentos magnéticos e estrutura atômica gera uma modificação da anisotropia magnetoelástica, alterando a susceptibilidade magnética inicial do material, fenômeno conhecido como efeito Villari [33].

O alinhamento dos momentos magnéticos em direções paralelas à campos aplicados e tensões trativas é chamado de magnetostricção positiva, enquanto o alinhamento transversal, de magnetostricção negativa.

Na Figura 8 é possível observar o comportamento dos momentos magnéticos e suas regiões de domínio para um material com magnetostricção positiva, enquanto é tracionado e comprimido [15,34,35].

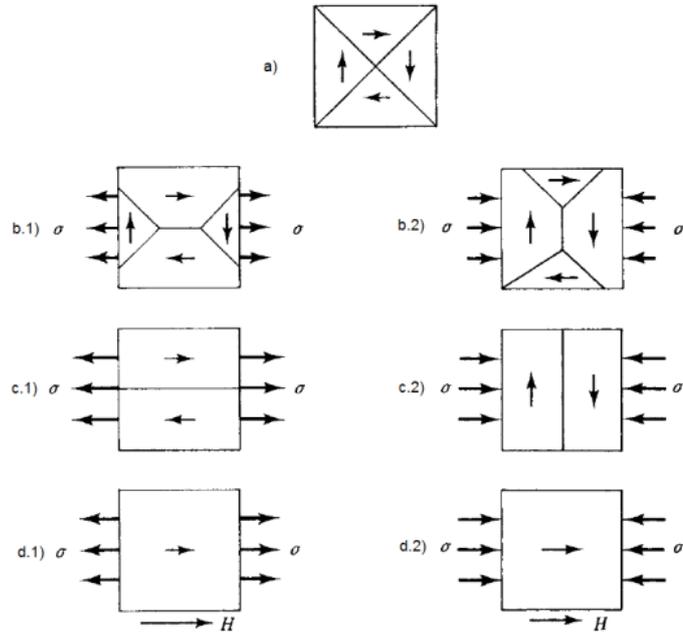


Figura 8. Comportamento dos momentos magnéticos e suas regiões de domínio em função da aplicação de tensões e campos magnéticos. Lado 1) magnetostricção positiva e lado 2) negativa. Adaptado de [34].

A partir da equação 12, pode-se definir a relação entre o estado magnético e o campo aplicado para um material magnetostrictivo com anisotropia transversal como sendo:

$$M = M_s \frac{H}{H_A^{eff}} \quad (13)$$

Onde  $H_A^{eff}$  é o campo de anisotropia efetivo do material. Este campo tem por objetivo considerar a componente da magnetização induzida por tensões aplicadas sobre o material. Ou seja, é o campo magnético que deve ser aplicado sobre o material para que este atinja a saturação magnética quando sob tensão [15,40].

$$H_A^{eff} = H_A - \frac{3\lambda_s \sigma}{M_s} \quad (14)$$

$\sigma =$  Tensão aplicada [Pa].

A equação 14 explica como o campo de anisotropia é afetado pela componente de tensão. Em materiais com magnetostricção positiva, tensões de tração diminuem o seu campo de anisotropia efetivo. Em outras palavras, isto faz com que os campos necessários para que o material sature magneticamente sejam menos elevados.

A Figura 9 apresenta o comportamento de curvas de magnetização para um material com anisotropia transversal, como na Figura 7 a, sob diferentes estados de tensão. [14,15,35].

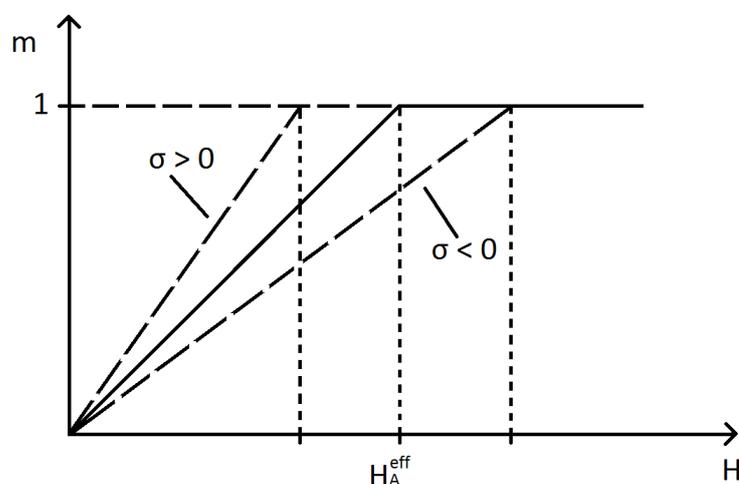


Figura 9. Efeito de esforços de tensão sobre a curva de magnetização de um material com magnetostricção positiva. A linha contínua representa o material no estado não tensionado. Adaptado de [15,35].

Onde  $m$  representa a razão entre o estado de magnetização do material e a sua magnetização de saturação,  $m = M/M_s$ .

### 3.4 FREQUÊNCIA DE RESSONÂNCIA E EFEITO $\Delta E$

#### 3.4.1 Frequência de Ressonância Magnética

Materiais apresentam movimentos vibracionais naturais que podem ser estimulados por forças externas. Um material entra em estado de ressonância quando o estímulo externo possui a mesma frequência que a sua de vibração natural. No caso

das fitas magnéticas amorfas, esse estímulo pode ser gerado através de campos magnéticos. A equação 15 descreve o modelo mais apropriado de frequência de ressonância natural de uma fita magnética amorfa, como descrito por Liang *et al.* Neste modelo é considerada a vibração mecânica longitudinal, sentido longo de uma fita magnética amorfa [10,42].

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E}{\rho(1 - \nu)}} \quad (15)$$

$E =$  Módulo de Young [Pa];

$\rho =$  Massa específica [ $kg \cdot m^{-3}$ ];

$\nu =$  Módulo de Poisson [adimensional];

$L =$  Comprimento da fita na direção avaliada [m].

Os termos da equação acima mostram que a frequência de ressonância de uma fita magnética amorfa pode variar de acordo com a geometria ou alguma propriedade relacionada ao material que a compõe. A variação da frequência de ressonância em função do módulo de elasticidade do material é um parâmetro essencial no funcionamento dos sensores magnetostrictivos de deformação, tema abordado na seção 3.4.2 [16,42,43,44].

A Figura 10 apresenta a forma de um pico de ressonância magnética. O pico de ressonância é detectado devido a uma variação de impedância  $Z$  no sistema de detecção. Quando a frequência de excitação aplicada sobre o material se iguala a sua frequência de ressonância, sua amplitude de vibração aumenta e faz com que a variação de fluxo magnético no sistema também aumente. Por consequência, ocorre uma variação na impedância do sistema de detecção [1,16,45].

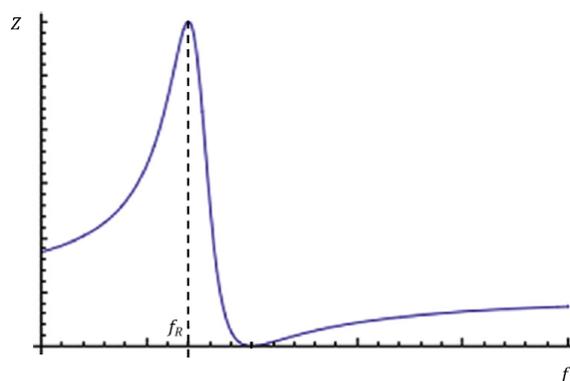


Figura 10. Frequência de ressonância  $f_R$ . Impedância do sistema de detecção (Z) versus frequência de excitação (f). Adaptado de [16].

### 3.4.2 Efeito $\Delta E$ e sua influência na frequência de ressonância magnética

Uma propriedade apresentada por materiais magnetostrictivos é o efeito  $\Delta E$ , que consiste na variação do módulo de elasticidade do material em função do estado magnético no qual se encontra.

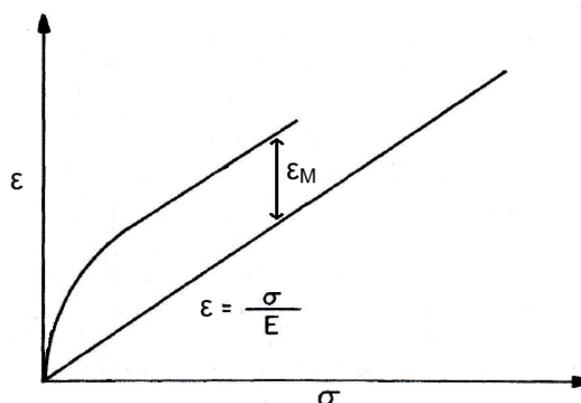


Figura 11. Deformação versus tensão em um material magnetostrictivo, no regime elástico. Adaptado de [15].

Na figura acima, a deformação do material magnetostrictivo possui duas componentes, uma puramente mecânica,  $\epsilon$ , e outra proveniente do efeito magnetostrictivo,  $\epsilon_M$ . Esta última representa o acréscimo ocorrido à deformação devido à magnetostricção de Joule e/ou efeito Villari. A deformação total para um material amorfo magnetostrictivo pode ser definida através da equação 16 [14,15,16].

$$\varepsilon_{tot} = \frac{\sigma}{E_M} + \frac{3}{2}\lambda_s \left[ \cos^2 \theta - \frac{1}{3} \right] \quad (16)$$

$\varepsilon_{tot}$  = Deformação total [adimensional];

$E_M$  = Módulo de elasticidade à magnetização constante [Pa].

O primeiro termo da equação 16 representa a deformação puramente mecânica; o segundo termo representa a deformação ocasionada pela rotação dos momentos magnéticos do material. É possível observar através da Figura 11 que a curva correspondente ao material magnetostrictivo não apresenta caráter linear, até que o mesmo atinja a saturação magnética, correspondente à magnetostricção de saturação. Isto é ocasionado devido a uma variação do módulo de elasticidade do material durante o processo de magnetização.

Ao se derivar a equação 16 em função da tensão, para um material com anisotropia magnética transversal ao eixo de aplicação de campo, o módulo de elasticidade pode ser calculado [15,40].

$$\frac{1}{E_H} = \frac{\partial \varepsilon_{tot}}{\partial \sigma} = \frac{1}{E_M} - \frac{3\lambda_s H^2}{(H_A^{eff})^3} \frac{\partial H_A^{eff}}{\partial \sigma} \quad (17)$$

$E_H$  = Módulo de Young para material não saturado magneticamente [Pa].

O valor de  $E_H$ , para um material com magnetostricção positiva, é menor que seu valor de  $E_M$ . A variação no módulo de elasticidade do material é definida pela equação 18.

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{E_M - E_H}{E_M} = \frac{9\lambda_s^2 H^2}{\mu_0 M_s H_A^3} E_H \quad (18)$$

$\Delta E = \text{Variação no módulo de elasticidade do material [Pa]}$ .

Esta variação de módulo de elasticidade ocorre em uma escala pequena, não sendo possível detectá-la através de um ensaio mecânico de tração comum. Para melhor observá-la, analisa-se a frequência de ressonância magnética do material em função de campos aplicados. A Figura 12 apresenta curvas características da variação do módulo elástico para um material com magnetostricção positiva [46].

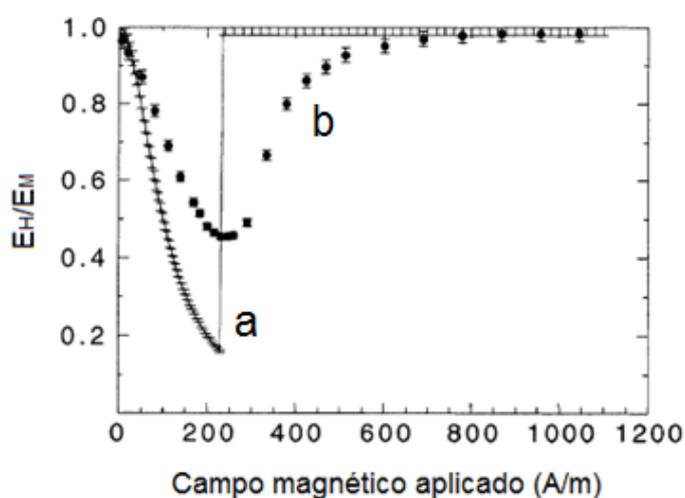


Figura 12. Variação do módulo de elasticidade para a) modelo teórico de um material com anisotropia magnética transversal e b) dados experimentais. Adaptado de [46].

O modelo teórico para um material com anisotropia magnética transversal, apresentado na Figura 12, também é conhecido como modelo rotacional simples. Neste, considera-se apenas a rotação dos momentos magnéticos na direção sob a qual o campo é aplicado [14,15,16,46,47].

Segundo Squire, fazendo-se correções neste modelo, ao considerar as distribuições de momentos magnéticos e a movimentação das paredes de domínio, é possível aproximar seu comportamento ao da curva experimental. Porém, o modelo rotacional simples é ideal para a utilização no sensor magnetostrictivo de deformação abordado nesse trabalho [24,35,46].

Com a adição da componente magnética ao módulo de elasticidade, a frequência de ressonância de uma fita metálica amorfa magnetostrictiva pode agora ser calculada pela equação 19.

$$f(H) = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{E_M}{\rho(1-\nu)}} \left( 1 + \frac{E_M 9 \lambda_s^2 M^2}{M_s^4} \chi \right)^{-1/2}, \quad \chi e M > 0 \quad (19)$$

O primeiro termo desta equação (termo fora dos parênteses) representa a frequência de ressonância puramente mecânica à magnetização constante, como visto através da equação 15. A variação no módulo de elasticidade do material, durante um processo de magnetização, é dada em função de duas características principais, a magnetização  $M$  e a susceptibilidade magnética  $\chi$ .

Em primeiro momento, antes do processo de magnetização ter iniciado, o valor de  $M$  para o material é zero, fazendo com que a componente magnética não tenha influência sobre sua frequência de ressonância. A partir de um ponto no qual o campo aplicado sobre o material possui intensidade igual ou superior a  $H_A^{eff}$ , o material não apresenta mais susceptibilidade magnética, fazendo com que a componente magnética também apresente valor nulo.

Desta forma, como apresentado na Figura 12 a, é possível compreender a volta do módulo de elasticidade ao seu valor inicial de forma abrupta. Já, na Figura 12 b, o material apresenta uma distribuição de momentos magnéticos mais complexa, e o valor de susceptibilidade deste material não se comporta de maneira a corresponder uma magnetização completamente linear. Estas variações nos valores de susceptibilidade e magnetização fazem com que o módulo de elasticidade do material, em valores próximos ao campo de anisotropia, não retorne imediatamente ao seu valor inicial [35,46,47].

Para se obter uma curva de frequência de ressonância em função do campo magnético, pode-se utilizar um sistema de bobinas de Helmholtz. As bobinas de Helmholtz são pares de bobinas que apresentam uma distância entre si de valor igual ao do raio de suas circunferências. Esta configuração permite que o campo magnético gerado na região central, entre as bobinas, seja homogêneo.

Este sistema contém um par de bobinas para a aplicação de campo contínuo (campo de bias ou campo DC), um par de bobinas para a geração de campo alternado (campo de excitação ou campo AC) e uma bobina de detecção (pick-up), dentro da qual o material a ser avaliado é posicionado, Figura 13 [1,10,12].

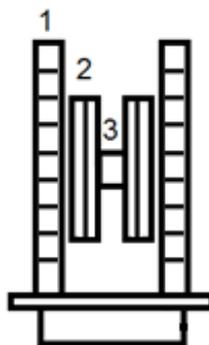


Figura 13. Esquema representativo das bobinas num sistema de detecção. 1) Bobinas para campo de bias; 2) bobinas para campo de excitação; 3) bobina pick-up. Adaptado de [1].

Uma curva característica de frequência de ressonância em função de campo é apresentada na Figura 14.

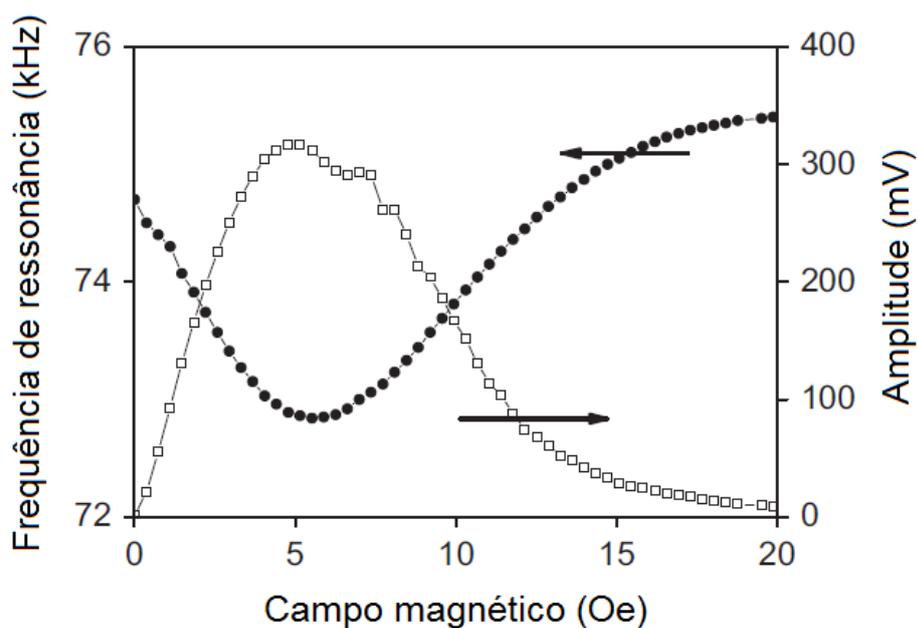


Figura 14. Variação da frequência de ressonância e amplitude de vibração em função de campo magnético para uma fita Metglas 2826MB3. Adaptado de [1].

Pode-se observar que juntamente com a variação de frequência de ressonância, a amplitude do sinal gerado pela fita amorfa também varia. A amplitude máxima do sinal de resposta é dada quando a frequência de ressonância se encontra próxima ao seu mínimo, ou seja, próxima ao campo de anisotropia [1,46].

### 3.5 ARQUITETURA DE UM SENSOR DE DEFORMAÇÃO MAGNETOSTRICTIVO

Os sensores magnetostrictivos de deformação, propostos por Suess, podem ser interrogados remotamente através dos fenômenos discutidos anteriormente. Estes sensores são compostos basicamente por três partes:

- Uma fita metálica amorfa com função de transdutor;
- Uma fita metálica amorfa com função de ressonador;
- Um ímã para atribuir ao sistema um ponto de operação.

A Figura 15 apresenta a arquitetura do sensor abordado neste trabalho.

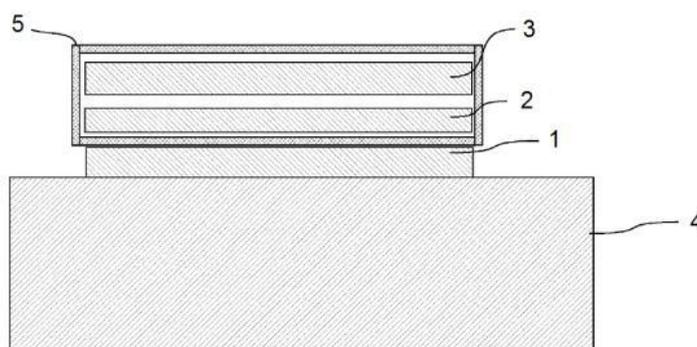


Figura 15. Arquitetura de um sensor magnetostrictivo de deformação. 1) Transdutor; 2) Ressonador; 3) Ímã para atribuir um ponto de operação; 4) Substrato a ser avaliado; 5) Envelope protetivo. Adaptado de [25].

O transdutor é uma fita amorfa magnetostrictiva colada diretamente sobre o substrato que se deseja avaliar. Esta fita, quando deformada juntamente ao substrato sob estado de tensão, altera seu estado magnético através do efeito Villari. Em outras palavras, a deformação ocorrida no substrato faz com que o estado magnético da fita amorfa seja alterado. Se o transdutor apresentar anisotropia magnética transversal ao

eixo de deformação, o mesmo poderá sofrer a máxima variação de seu estado magnético (rotação máxima de seus momentos) quando deformado.

O ressonador é uma fita amorfa, posicionada acima do transdutor, cuja a frequência de ressonância é medida constantemente. Quando o estado magnético do transdutor é alterado por alguma deformação ocorrida no substrato avaliado, o ressonador também acaba por alterar seu estado magnético devido a sua proximidade com o transdutor. Isto ocasiona uma alteração no valor de sua frequência de ressonância, podendo ser detectada através do sistema apropriado.

O ímã posicionado nas proximidades do ressonador tem por função lhe atribuir um ponto de operação adequado. Este ponto de operação é atribuído em função da curva  $\Delta E$  do ressonador. Se a curva apresenta alguma assimetria, como apresentado no modelo ideal da Figura 12, a sensibilidade do sensor pode ser ajustada de acordo com o ponto de operação. Um ressonador que possui o ponto de operação atribuído sob o campo de anisotropia ou logo acima deste terá uma grande sensibilidade, pois pequenas variações de campo magnético resultarão em grandes variações de sua frequência de ressonância. O ponto de operação próximo ao campo de anisotropia também confere maior amplitude de resposta ao sistema de detecção. Isto demonstra a importância de as curvas  $\Delta E$  apresentarem uma elevada assimetria [20,25].

O ressonador também deve ser posicionado de forma a não bloquear o seu movimento longitudinal, o que pode acabar por diminuir a intensidade do sinal detectado. A parte central do ressonador é a que apresenta deslocamento nulo, enquanto a extremidade apresenta deslocamento máximo. Se o ressonador for fixado em algum ponto, este ponto deve ser na sua região central para que o sinal detectado seja o maior possível [12,20].

### 3.6 TRATAMENTOS TÉRMICOS

Os tratamentos térmicos têm por objetivo aumentar a anisotropia dos materiais. Isto ocorre devido ao acoplamento magneto-elástico e ordenamentos direcionais atômicos. De acordo com Chikazumi [21], o modelo de pares considera que a circunstância na qual a energia varia, na rotação dos momentos magnéticos atômicos, não depende apenas de sua orientação quanto ao momento vizinho, mas também da

sua orientação quanto a direção de ligação entre um par de átomos. Os tratamentos também são capazes de aliviar as tensões internas provenientes dos processos de fabricação. Estes tratamentos podem ser realizados na presença de campos magnéticos e/ou tensões aplicadas sobre o material [21,37,43,48,49].

Como mencionado anteriormente, uma anisotropia transversal ao eixo longo faz com que o material possa apresentar a magnetostricção máxima quando magnetizado no sentido paralelo a este eixo. Isto aumenta a sensibilidade do material à aplicação de campos magnéticos e tensões, modificando a forma de sua curva  $\Delta E$ , ou seja, a forma de sua curva de frequência de ressonância. Também é possível observar um aumento na assimetria da curva, fazendo com que sua forma fique mais próxima do modelo teórico ideal para as fitas amorfas com anisotropia magnética transversal, Figura 16 [14,28,37,44,48,49].

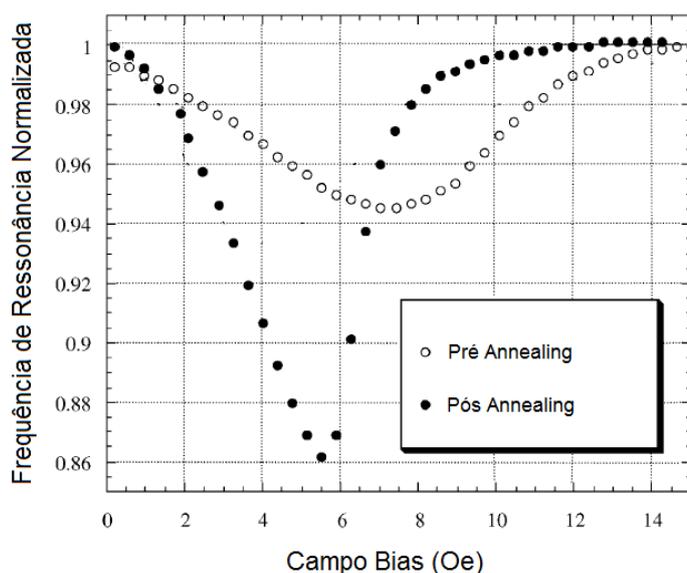


Figura 16. Influência de tratamento térmico em uma fita Metglas 2826 MB, 4 cm, a 200°C, sob campo transversal de 1300 Oe durante 2 horas. Adaptado de [44].

Os campos magnéticos transversais fazem com que, durante o tratamento termomagnético, os momentos fiquem direcionados paralelamente à direção que se deseja induzir o eixo fácil de magnetização, enquanto a temperatura alivia tensões e reduz a energia necessária para a rotação dos momentos [48].

Kim *et al.* [50] observaram, para fitas Metglas 2826MB, que tratamentos termomagnéticos em campo transversal ao eixo longo das fitas, aumentam sua magnetostricção de saturação neste eixo. Já, tratamentos termomagnéticos com campo paralelo ao eixo longo não apresentam o mesmo resultado, pois orientam os momentos magnéticos na direção do eixo, fazendo com que a magnetostricção de saturação das fitas seja reduzida, neste eixo. Também foi constatado que a magnetostricção de saturação apresenta valores mais elevados quando a fita, após ser tratada sob campo transversal, é excitada na sua frequência de ressonância.

As taxas de resfriamento do material também desempenham um papel importante na indução da anisotropia magnética. Para materiais como Metglas 2826AC, por exemplo, taxas de resfriamento mais rápidas resultam numa redução do valor do seu campo de anisotropia, Figura 17, tornando o material mais sensível à aplicação de campos magnéticos [10,14,37].

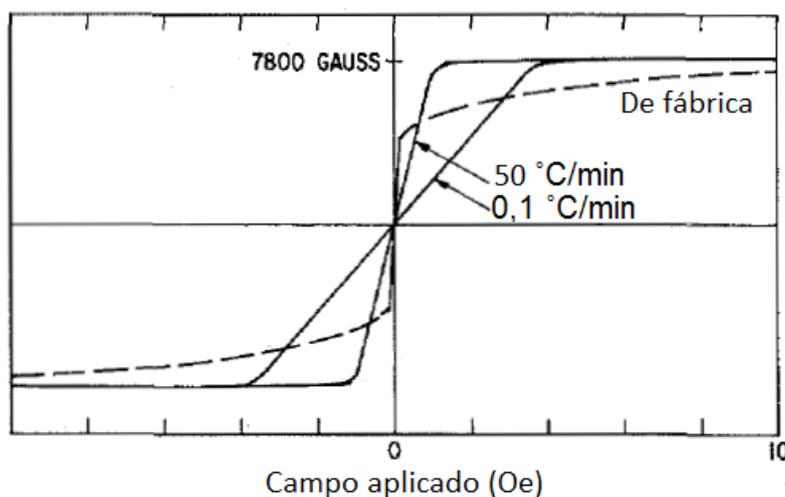


Figura 17. Curvas M-H para Metglas 2826 AC como recebido de fábrica e após annealing de 2 horas, a 325 °C sob campo transversal com diferentes taxas de resfriamento. Adaptado de [37].

É possível observar que os tratamentos termomagnéticos possuem uma influência na linearidade das curvas de magnetização, e não apenas na redução do valor dos campos de anisotropia. Isto é um fator importante pois a linearidade da curva M-H indica que a susceptibilidade magnética do material não varia ao longo do seu processo de magnetização. Tratamentos térmicos sob tensão, com ou sem a aplicação de campo magnético simultâneo, também podem apresentar a mesma

influência [37,48,51]. Porém, este tipo de tratamento possui uma execução mais dificultada devido a maior complexidade do sistema a ser utilizado, não sendo realizado neste trabalho.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Diferentes técnicas e abordagens foram utilizadas para avaliar, de forma quantitativa e qualitativa, as propriedades magnéticas de seis diferentes ligas, sendo que, apenas a liga Vitroperm 800 apresentava estrutura nanocristalina.

A seis diferentes ligas avaliadas foram:

- Metglas 2826MB3 (Metglas®);
- 1K501 e 1K501a (Beijing Yeke Co., Ltd.);
- EAS (Electronic Article Surveillance) Tag;
- Vitrovac 7600 e Vitroperm 800 (nanocristalina) (Vacuumschmelze®).

Suas composições mássicas aproximadas foram obtidas através de data-sheets e verificadas através de um EDS-SDD da Oxford, modelo X-Max 50. O EAS Tag e a fita Yeke 1k501a não possuem data-sheet, e suas composições foram verificadas apenas com EDS, Tabela 1.

Tabela 1. Composição mássica aproximada das ligas utilizadas.

Liga	Composição (wt%)									
	Fe	Ni	Co	Si	Mo	Al	Cu	B	Nb	Impurezas
Metglas 2826MB3	45	45	-	-	7	-	-	3	-	-
Yeke 1k501	45	43	-	-	8	-	-	4	-	-
Yeke 1k501a	45	42	-	-	8	1	-	-	-	4
EAS Tag	27	53	14	1	-	-	-	-	-	5
Vitrovac 7600	75	-	22	-	-	-	-	-	-	3
Vitroperm 800	83	-	-	9	-	-	1,5	-	5,5	1

Suas propriedades magnéticas foram avaliadas antes e após os tratamentos termomagnéticos. Testes de tração, sobre um substrato não magnético, foram realizados utilizando as fitas como transdutores e ressonadores. Testes também foram realizados com uma das fitas sobre um aço magneticamente mole, para o estudo da influência deste sobre o efeito  $\Delta E$ . Para a realização deste teste, três substratos de aço 1010 com diferentes dimensões foram utilizados:

- Substrato 1: 49,65 X 8,5 X 2,8 mm;



No sistema de aquisição das curvas  $\Delta E$ , as bobinas de Helmholtz para geração de campo contínuo (1) estão conectadas a uma fonte de corrente contínua da Agilent, modelo E3634A (6). As bobinas de Helmholtz para geração de campo alternado (2) estão conectadas a um gerador de função da Stanford Research Systems, modelo DS 345 (4). A bobina pick-up (3) está conectada ao amplificador sintonizado lock-in da Stanford Research Systems, modelo SR 830 (5). A fonte de corrente contínua, o gerador de função e o amplificador estão conectados a um computador (7) para que a coordenação dos processos possa ser realizada através de um programa criado por Mateus Beltrami e Eduardo S. Bastos no software LabVIEW.

A fonte de corrente contínua transmite uma corrente diretamente ao primeiro par de bobinas de Helmholtz. O campo contínuo fornece um campo de bias para a amostra. O gerador de função envia corrente alternada para o segundo par de bobinas de Helmholtz e um sinal de referência para o amplificador sintonizado lock-in. A corrente alternada é responsável por varrer uma determinada faixa programada de frequências, até que a frequência de ressonância do material seja encontrada para cada intensidade de campo contínuo aplicado. A amostra a ser avaliada é posicionada dentro da bobina pick-up, que está conectada ao amplificador sintonizado lock-in, responsável por fornecer as variações de amplitude em função da frequência do campo oscilante. Posteriormente, os valores de amplitude são plotados em função do campo de bias, fornecendo então uma curva  $\Delta E$ , como exemplificado na figura abaixo.

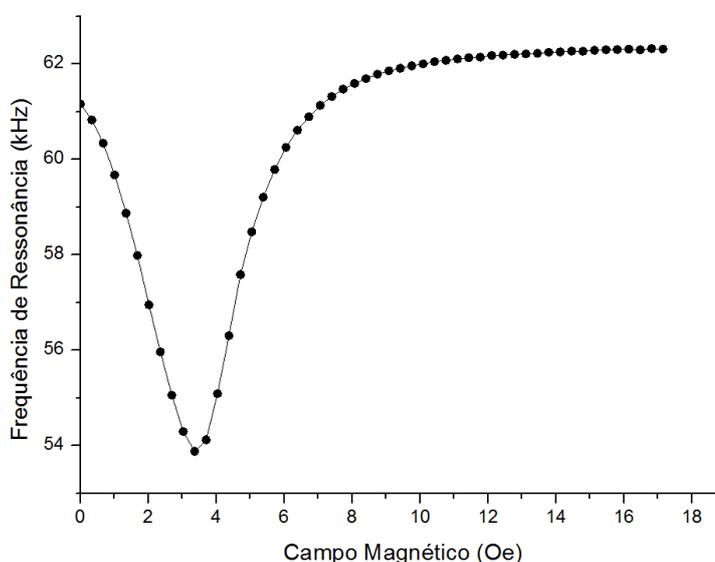


Figura 19. Curva de frequência  $\Delta E$  para fita Yeke 1k501a tratada a 315°C por 30 minutos.

Para a avaliação da curva  $\Delta E$  de uma fita magnética amorfa sobre um substrato de metal magnético mole (aço 1010), três substratos com diferentes dimensões foram utilizados. Para garantir que os substratos metálicos estavam desmagnetizados, os mesmos foram levados a um forno da Sanchis, modelo tubular de 3 kW, a uma temperatura de aproximadamente 800°C.

A Figura 20, abaixo, apresenta o sistema para aquisição das curvas de histerese e magnetização dos materiais avaliados. O sistema é composto por um traçador de curvas de histerese da Globalmag (1); uma bobina excitadora (2); e uma bobina pick-up (3), construída por Joana M. Pasquali. O traçador fornece correntes de até 3 A com frequências de até 400 Hz, e está conectado a um computador para a aquisição de dados.

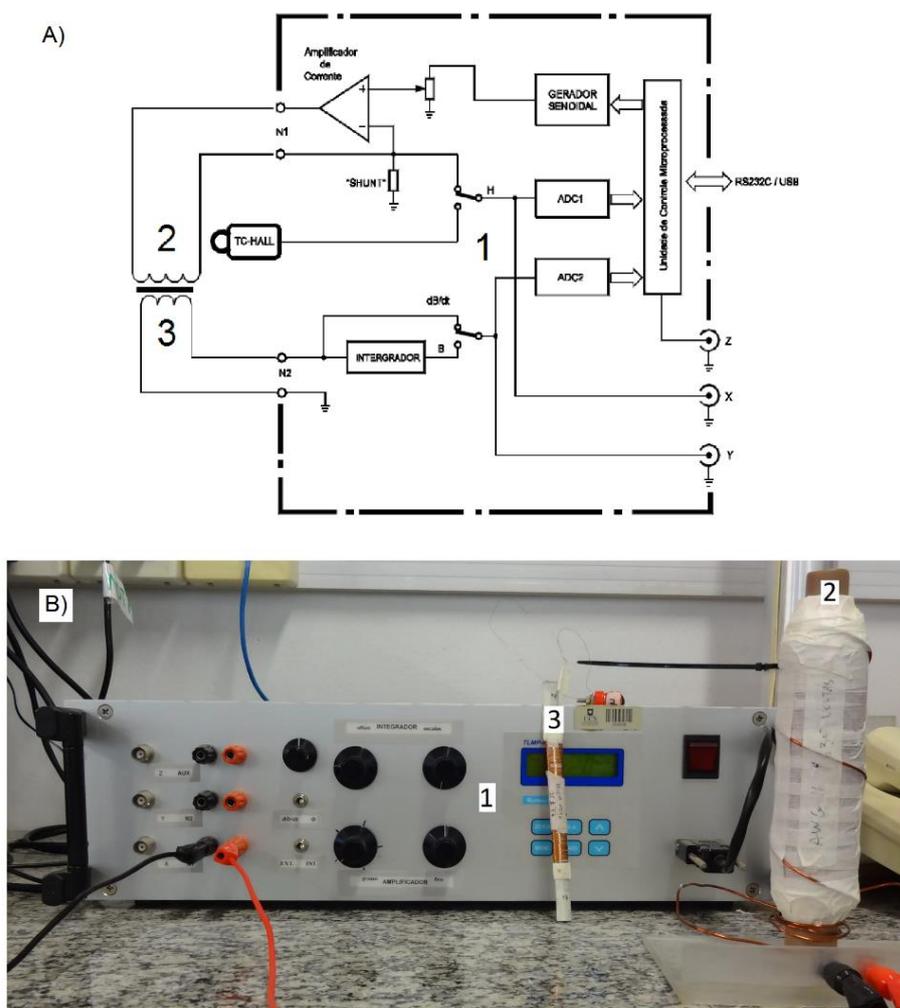


Figura 20. A) Diagrama geral e B) fotografia do sistema para aquisição de curvas de histerese e magnetização. 1) Traçador de histerese; 2) Bobina excitadora; 3) Bobina pick-up.

O traçador (1) envia corrente alternada à bobina excitadora (2) de acordo com uma frequência pré-estabelecida. A bobina pick-up (3) contém o material a ser avaliado, e é posicionada dentro da bobina excitadora. A variação de fluxo magnético gerada na pick-up é captada pelo integrador do traçador. Para se obter a curva de magnetização, uma curva padrão do branco (ar) é traçada e posteriormente subtraída da curva de histerese do material avaliado. Um exemplo da curva de magnetização é apresentado na figura a seguir.

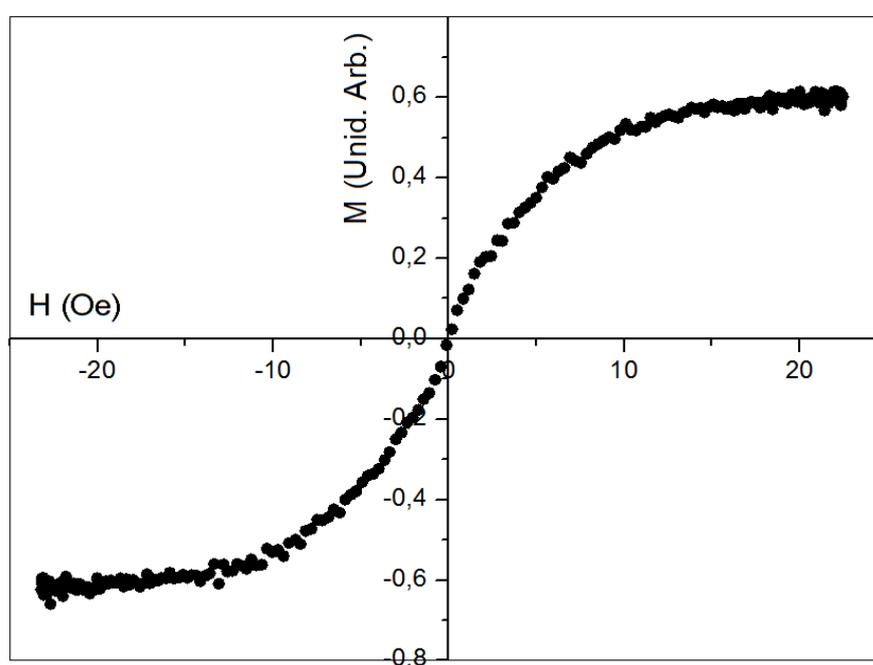


Figura 21. Curva de magnetização para uma fita Metglas 2826MB3, de fábrica.

Um forno foi projetado e construído, juntamente com Eduardo S. Bastos, em laboratório para a realização dos tratamentos termomagnéticos das fitas amorfas, Figura 22. O objetivo do forno é induzir uma anisotropia transversal à direção longa das fitas tratadas. Isto é realizado através da aplicação de campo magnético perpendicular ao eixo (e no plano) das fitas, juntamente com aquecimento de temperaturas entre 235 e 350°C. O forno é constituído por um suporte de alumínio para ímãs de NdFeB (1) (pelo qual um fluxo de água corrente os mantém em temperatura ambiente), para aplicação de campo magnético transversal  $H_{trat}$  às fitas amorfas. As amostras são colocadas dentro de um tubo de quartzo (2), com auxílio de um porta amostra de alumínio (material não magnético), para aplicação de vácuo

no sistema. O vácuo de aproximadamente 1 Torr é fornecido por uma bomba mecânica da Alcatel, modelo Pascal 2105 SD. Um suporte para cruzeta (3) é utilizado para o posicionamento da cruzeta que conecta ao tubo de quartzo a bomba de vácuo, um termopar tipo K da Equipe, e um medidor de vácuo da Terranova, modelo 924A. Para o aquecimento das fitas amorfas, utiliza-se uma resistência de Ni-Cr conectada à fonte de corrente contínua da Agilent, mencionada anteriormente.

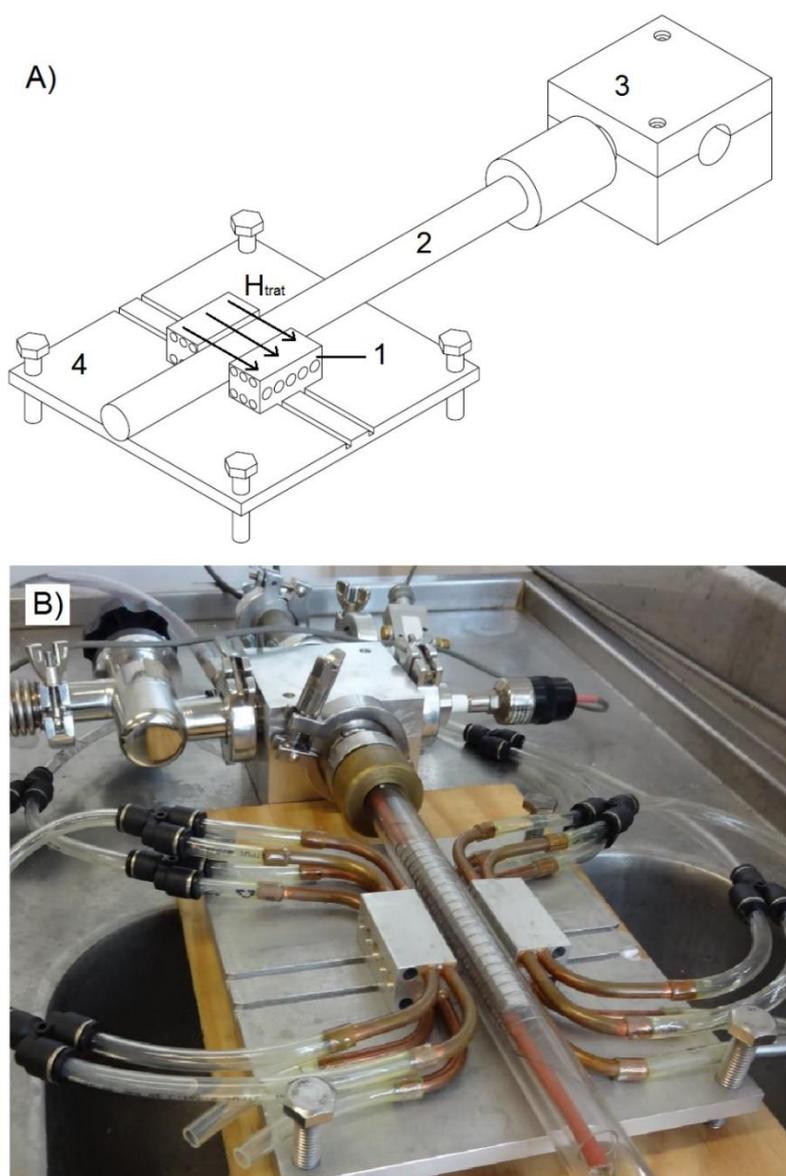


Figura 22. A) Esquema representativo e B) fotografia do forno para tratamento termomagnético das fitas amorfas. 1) Suporte pra ímãs de neodímio; 2) Tubo de quartzo para aplicação de vácuo; 3) Suporte para cruzeta; 4) Base para regulagem de altura do ímãs.

Primeiramente, o material a ser tratado é higienizado com acetona e algodão, colocado dentro do porta amostra e levado para dentro do tubo de quartzo, juntamente com a resistência para aquecimento. O termopar é colocado em contato com o porta amostra e o sistema é então fechado. Os ímãs de neodímio são posicionados e o sistema de circulação de água para resfriamento é ativado. Após o posicionamento de todos os componentes, a bomba de vácuo é acionada, e as demais regulagens necessárias são realizadas. O sistema de aquecimento é então ligado e os tratamentos termomagnéticos nas diferentes temperaturas são cronometrados. Após os tratamentos, para garantir que os ímãs de neodímio utilizados para geração de campo não tiveram sua magnetização afetada pela temperatura, utilizou-se um gaussímetro da Lake Shore, modelo 475 DSP, para medição de seus campos magnéticos.

As amostras foram tratadas em 4 diferentes temperaturas, 235, 275, 315 e 350°C. Os tempos de tratamento foram de 30 minutos, com resfriamento a temperatura ambiente. Algumas amostras de Metglas2826MB3 foram tratadas a 315°C por 15, 30 e 60 minutos para avaliar a influência dos tempos de tratamento. Lembrando que cada fita utilizada foi tratada apenas uma vez, não passando por dois ou mais tratamentos térmicos. Todas as fitas foram tratadas com campo magnético transversal ao seu sentido longo (na largura), aproximadamente 550 Oe (0,055 T). As amostras possuem campo de saturação magnética abaixo dos 20 Oe.

Para a realização dos testes de tração, um sistema de pesos foi montado em uma bancada de laboratório, Figura 23. Este sistema é composto por uma âncora (3) para o carregamento de pesos e ganchos conectados aos substratos (1) para transmitir a tensão aplicada. Os transdutores foram colados sobre tiras de latão de aproximadamente 26,5 cm de comprimento (substrato não magnético). As tiras de latão foram usinadas de uma chapa de latão com espessura de aproximadamente 0,8 mm. Para obter o valor de deformação imposto sobre o substrato, o módulo de elasticidade da chapa de latão foi medido nos sentidos paralelo e transversal à sua direção de laminação, no Laboratório de Mecânica da Universidade de Caxias do Sul (LAMEC). Utilizou-se uma máquina de ensaios universal da EMIC, modelo DL20000. Para garantir uma maior deformação, as tiras foram então usinadas no sentido transversal à laminação da chapa, devido ao menor módulo de elasticidade

encontrado, ~ 79 GPa. A deformação imposta sobre as barras de latão foi calculada através das equações 20 e 21.

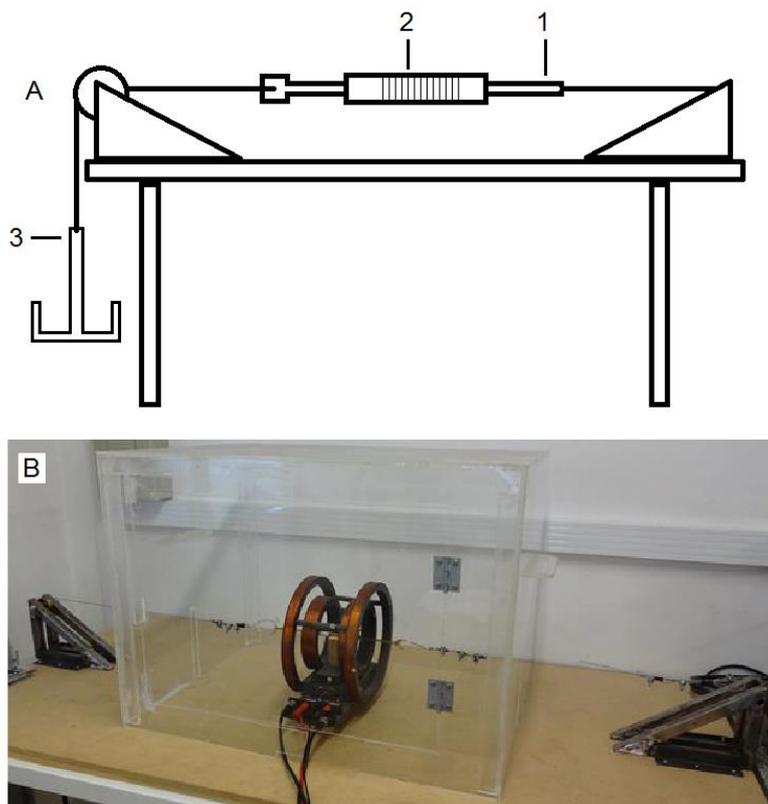


Figura 23. A) Esquema representativo e B) foto do sistema para tração de substratos de latão para teste dos transdutores e ressonadores. 1) Amostra de latão; 2) Bobina ou conjunto de bobinas para aplicação de campo e detecção de ressonância; 3) Âncora para a aplicação de pesos.

$$\sigma = \frac{m \cdot g}{A} \quad (20)$$

$$e = \frac{\sigma}{E} \quad (21)$$

$\sigma$  = Tensão [Pa];

$m$  = Massa de carregamento da âncora [kg];

$g$  = Gravidade [ $\sim 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ ];

$A$  = Seção transversal da tira de latão [ $\text{m}^2$ ];

$e =$  Deformação [adimensional];

$E =$  Módulo de Young do latão [Pa].

Um teste foi realizado com um extensômetro da Excel Sensores Ind. Comp. Exp. Ltda. para verificar se o sistema de tração era capaz de deformar as tiras de latão utilizadas nos testes de tração. A Figura 24 apresenta os valores de deformação, em função da tensão aplicada, obtidos no teste com o extensômetro e os valores estimados através dos cálculos com as equações 20 e 21. Nos testes de tração com as tiras de latão, as tensões aplicadas não ultrapassaram o valor de 30 MPa.

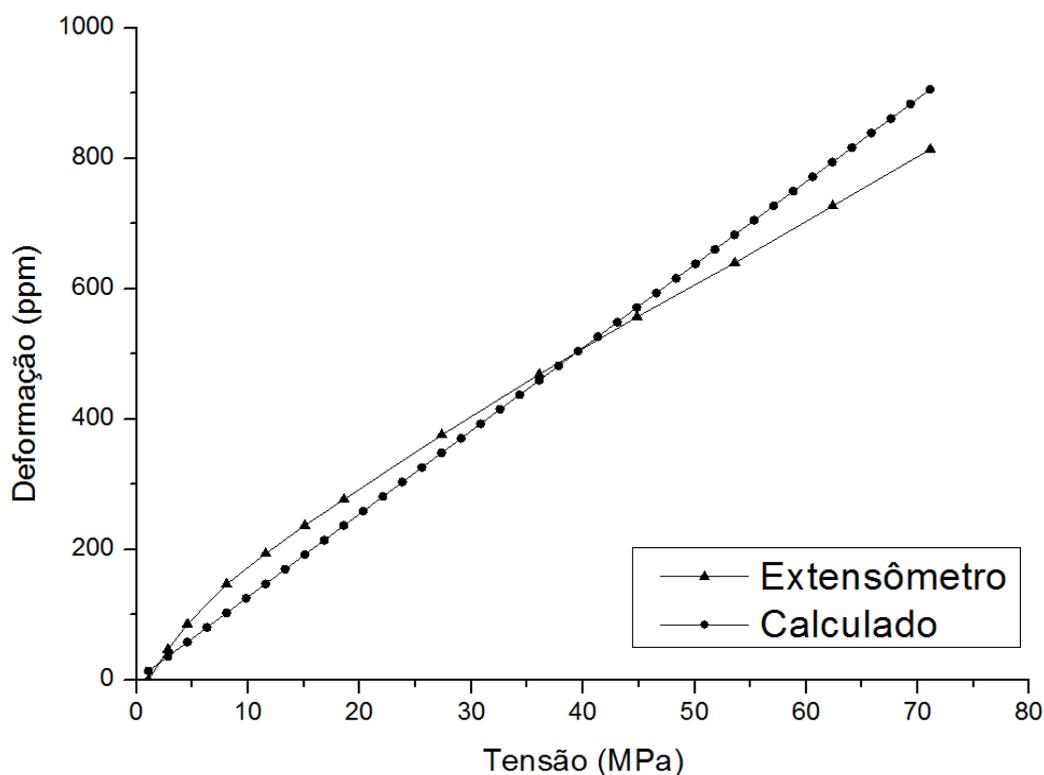


Figura 24. Teste de deformação com extensômetro.

Diferentes combinações entre os pares ressonador e transdutor foram avaliadas. A colagem dos transdutores (2) sobre as tiras de latão (1) foi realizada com cola de cianoacrilato a base de éster, Figura 25. Para garantir uma melhor adesão no processo de colagem, a superfície das tiras de latão foi lixada com lixas mesh 50 e

600. Toda superfície de um dos lados das fitas foi colada, e para isto, utilizou-se um balão de ar para pressionar a fita sobre o substrato e distribuir a pressão de maneira mais uniforme sobre todos os pontos.

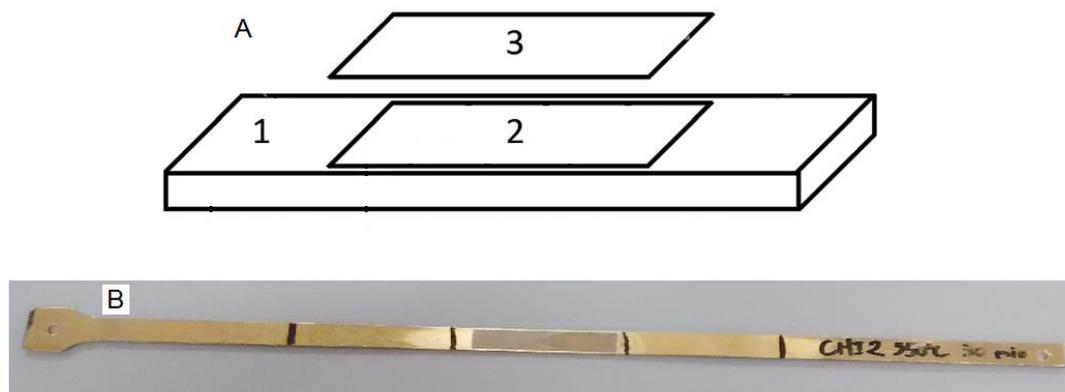


Figura 25. A) Esquema representativo, adaptado de [52] e B) foto da tira de latão para teste de tração. 1) Tira de latão para tração; 2) Transdutor colado sobre a tira de latão; 3) Ressonador posicionado sobre o transdutor.

Para a medição das frequências de ressonância dos ressonadores durante os ensaios de tração, foram utilizados dois sistemas. O primeiro sistema é o mesmo utilizado nos experimentos de aquisição das curvas  $\Delta E$ , onde o substrato a ser tracionado, contendo o par ressonador e transdutor, passa através da bobina pick-up. O segundo sistema é composto por um analisador de redes da Agilent Technologies, modelo E5061B, Figura 26, juntamente com uma bobina que desempenha as funções de atribuição de campo contínuo, geração de campo alternado e pick-up. Assim como no primeiro sistema, o substrato contendo o par transdutor e ressonador passa por dentro da bobina. O analisador de redes envia os sinais de corrente para a bobina e uma referência ao seu próprio sistema. As variações de impedância na bobina são detectadas e comparadas com a referência.

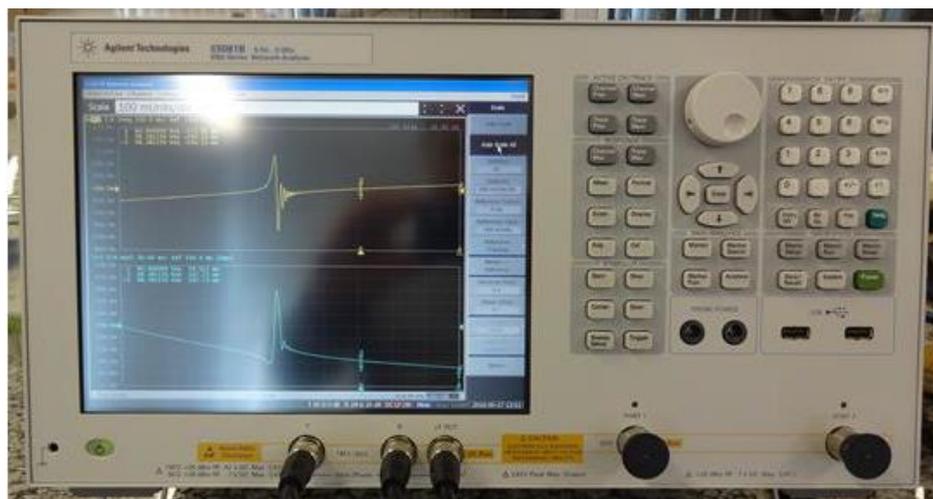


Figura 26. Foto do analisador de redes da Agilent Technologies.

Para se obter uma avaliação qualitativa da interação entre ressonador e transdutor, e entre ressonador e um aço magnético mole, foi utilizado o software FEMM (Finit Elements Method Magnetics), versão 4.2, criado por David Meeker da QinetiQ North America.

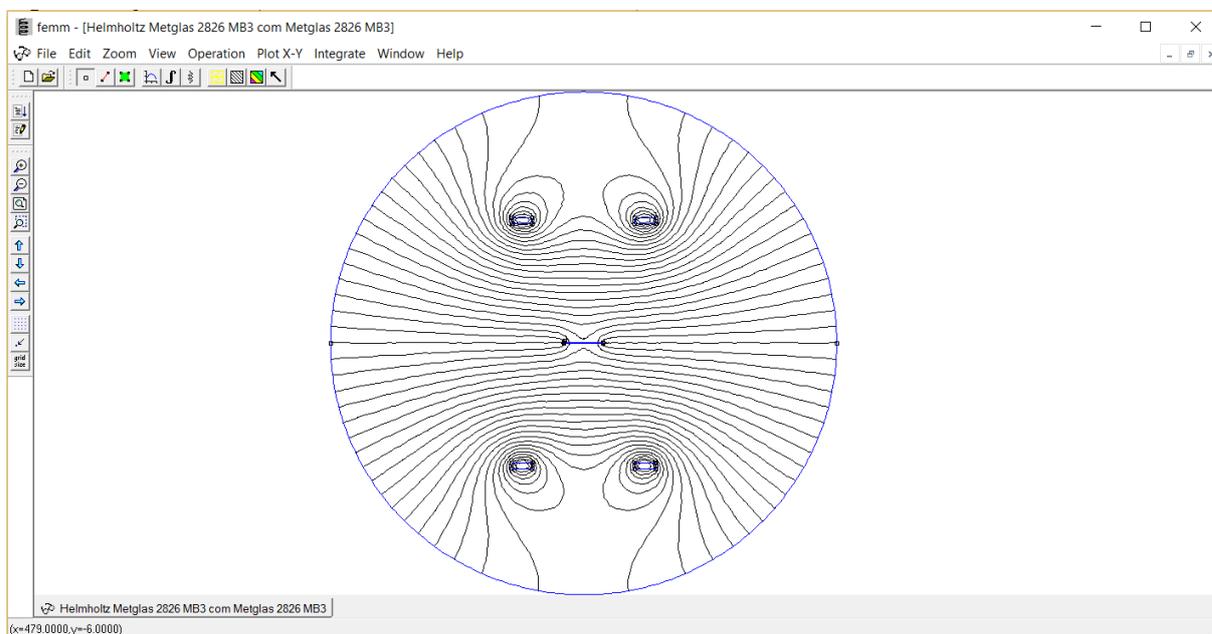


Figura 27. Interface de usuário do software FEMM, versão 4.2. Simulação de linhas de campo magnético geradas por bobinas de Helmholtz com amostra de Metglas 2826 MB3 centralizada.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 COMPOSIÇÃO DAS LIGAS

As ligas tiveram suas composições, obtidas através dos data-sheets, verificadas pela técnica de EDS (Tabela 1). Não havia data sheets para as ligas Yeke 1k501a e os EAS tags, tendo suas composições determinadas apenas por EDS. Através desta técnica, a quantidade de boro e outros elementos leves não é possível de ser estimada. As composições das ligas Yeke 1k501 e 1k501a são semelhantes, indicando que as duas ligas fornecidas pela Yeke Co., Ltd., podem ser idênticas. A composição da liga Metglas 2826MB3 é praticamente idêntica à liga Yeke 1k501, indicando que esta pode ser uma versão chinesa da liga produzida pela Metglas®. O EAS Tag também pode possuir impurezas que podem estar associadas a elementos não quantificáveis por esta técnica.

### 5.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS

A Figura 28 apresenta uma curva de frequência de ressonância em função do campo magnético (curva  $\Delta E$ ) de uma fita Metglas 2826MB3 não tratada, como obtida de fábrica. Através da equação 19, foi calculada a curva  $\Delta E$  teórica para um material amorfo magnetostrictivo com anisotropia magnética transversal, Figura 29.

Diferentemente do modelo teórico, a curva da Figura 28 não possui forma assimétrica. A variação de frequência de ressonância entre os estados não magnetizado e magnetizado (campo de anisotropia,  $\sim 5$  Oe) é de aproximadamente 4% do valor da frequência de ressonância inicial ( $\sim 2,4$  kHz), enquanto para o modelo teórico é de aproximadamente 40%. Ou seja, a variação no modelo teórico é dez vezes maior. Isto pode ser um indicativo de que o material vindo de fábrica não apresenta anisotropia magnética transversal. Também pode-se observar, na Figura 28, que a amplitude do sinal é mais intensa quando a frequência de ressonância possui valores em torno do vale da curva (campo de anisotropia).

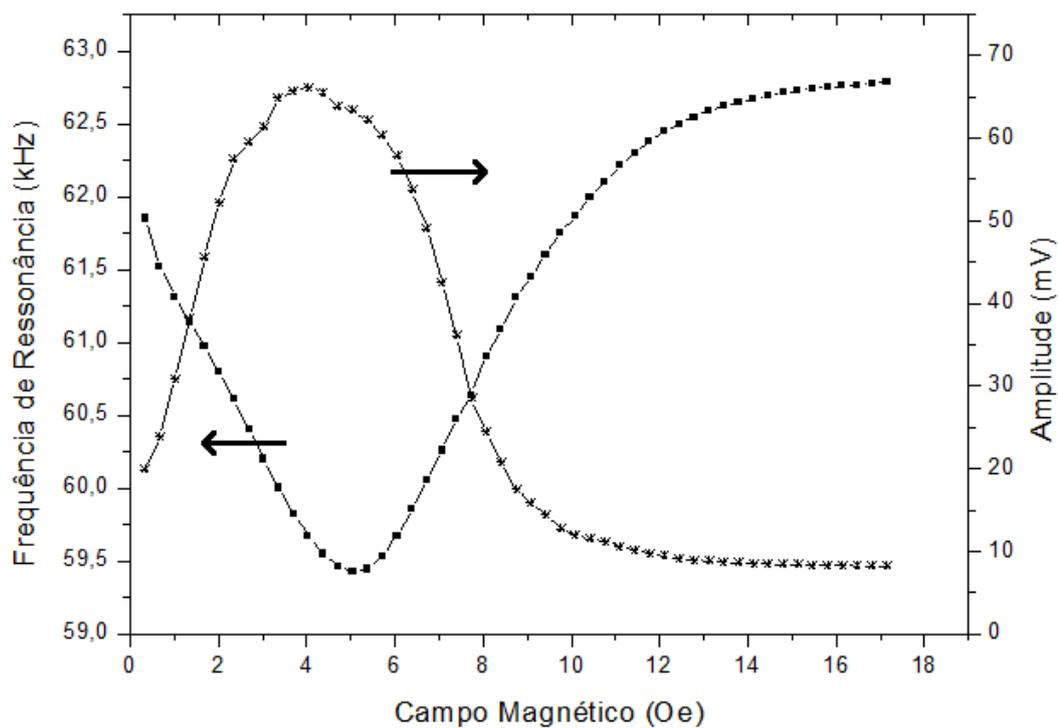


Figura 28. Curva da frequência de ressonância de uma fita Metglas 2826MB3 não tratada.

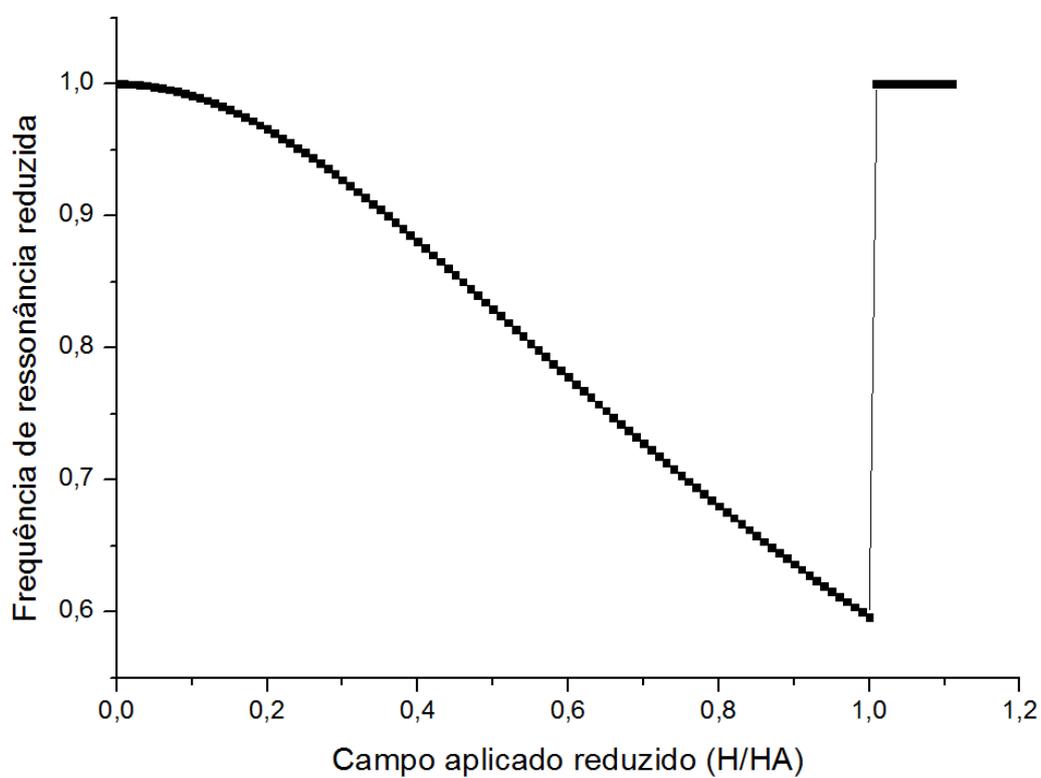


Figura 29. Modelo teórico da curva da frequência de ressonância reduzida para material amorfo magnetostrictivo com anisotropia magnética transversal.

Após esta fita ser tratada termicamente, ocorreram diferenças consideráveis na forma de sua curva  $\Delta E$ . A Figura 30, abaixo, mostra a influência de um dos tratamentos térmicos realizados, 315°C por 30 minutos. Lembrando que, todos os tratamentos térmicos neste trabalho foram realizados com aplicação de campo transversal de ~550 Oe.

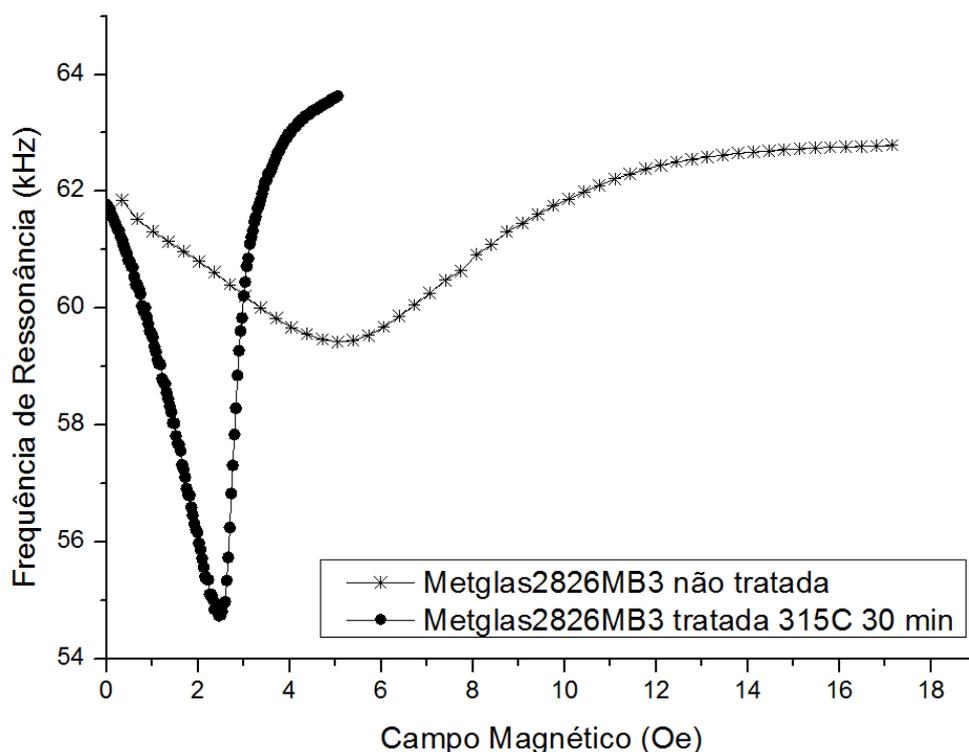


Figura 30. Curvas da frequência de ressonância para uma fita Metglas 2826MB3 não tratada e tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

A fita tratada apresenta uma maior assimetria na sua curva  $\Delta E$ , com uma variação de frequência de aproximadamente 11,4% (~7 kHz), do estado não magnetizado até o seu campo de anisotropia (~ 2,5 Oe). A redução do valor do campo de anisotropia é atribuída a um processo de magnetização que requer menor energia, em outros termos, o tratamento reduziu o valor da constante de anisotropia  $K_a$ . O cálculo das constantes  $K_a$  das fitas é realizado na próxima sessão. A fita tratada apresenta uma curva  $\Delta E$  de forma mais similar à proposta no modelo teórico, Figura 29, e nos tratamentos termomagnéticos realizados por Mungle *et al.*, Figura 16.

As curvas de magnetização apresentadas na Figura 31, correspondentes a uma fita Metglas não tratada e à fita Metglas tratada, discutida acima, apresentam diferentes comportamentos. A fita tratada apresenta sua curva  $M-H$  mais próxima do eixo da magnetização e possui caráter linear até o ponto da saturação magnética. Isto lhe confere uma susceptibilidade magnética maior e não variável ao longo do processo de magnetização. A saturação magnética da fita tratada se torna mais evidente e ocorre em campos de menor intensidade, significando uma redução do campo de anisotropia. Estes fatores indicam que o tratamento termomagnético reduz o valor de  $K_a$  para este material. O mesmo comportamento para curvas de magnetização foi observado por Luborsky *et al.*, ao comparar o material vindo de fábrica com o tratado, Figura 17. Os dados apresentados na Figura 31 corroboram os apresentados na Figura 30.

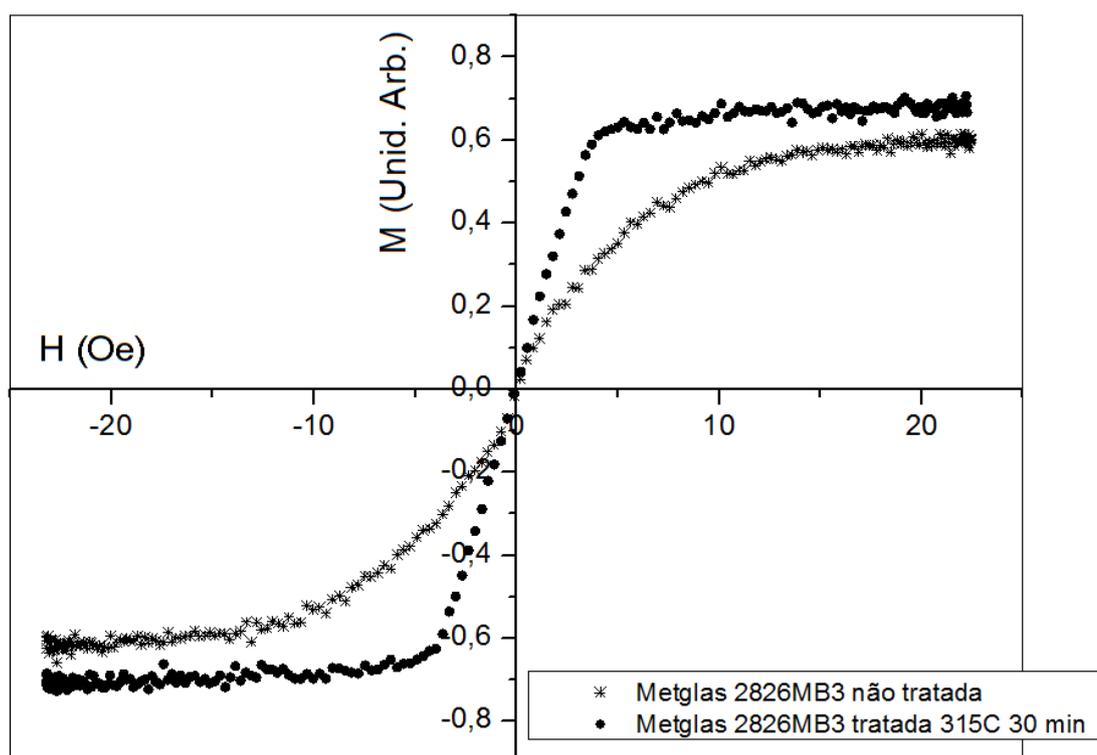


Figura 31. Curvas de magnetização para Metglas 2826MB3 não tratada e tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

A Figura 32 apresenta a evolução das curvas  $\Delta E$  para fitas Metglas 2826 MB3 em função de diferentes temperaturas de tratamento. O campo de anisotropia das fitas

tratadas diminui à medida que a temperatura de tratamento aumenta, enquanto o vale de frequência de ressonância se torna mais profundo. As fitas tratadas a 315 e 350 °C apresentaram curvas de forma e profundidade semelhantes, com elevada assimetria.

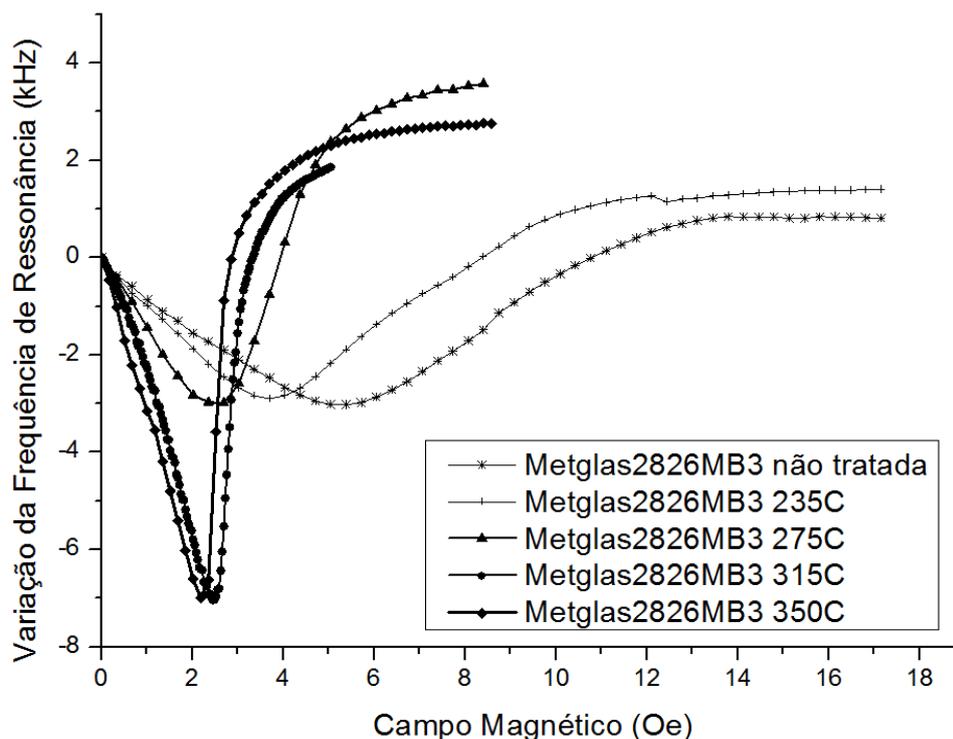


Figura 32. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

Para verificar a assimetria das curvas, uma derivada da frequência de ressonância em função do campo magnético foi calculada para a fita tratada a 315 °C, Figura 33. O pico da derivada, em ~2,7 Oe, representa o ponto de maior taxa de variação da frequência de ressonância em função do campo para a fita tratada, aproximadamente 16 kHz/Oe. As maiores taxas de variação se encontram na região logo após o vale da curva  $\Delta E$ , demonstrando que a mesma apresenta caráter assimétrico. Como visto anteriormente, um ponto de operação pode ser atribuído ao ressonador que compõe o sensor. As diferentes taxas de variação de frequência de ressonância em função do campo podem permitir a escolha de uma determinada sensibilidade para o ressonador, através da aplicação de um campo de bias.

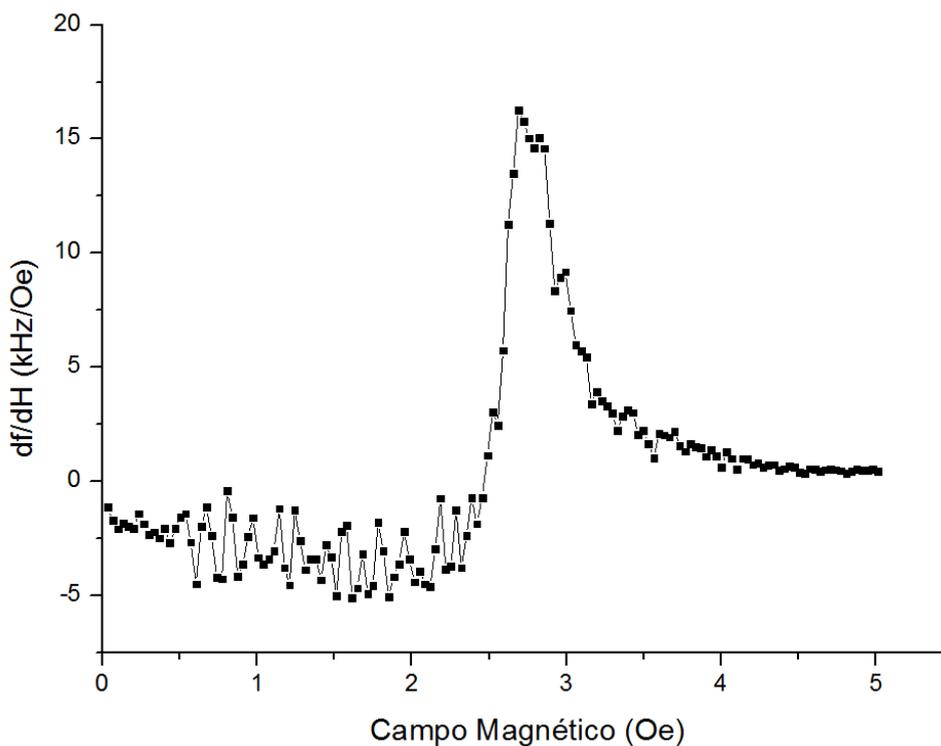


Figura 33. Variação da frequência de ressonância em função do campo para uma fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

Diferentes tempos de tratamento também foram investigados em uma das ligas metálicas. As fitas Metglas foram tratadas na temperatura de 315°C por 15, 30 e 60 minutos. A Figura 34 apresenta os diferentes resultados para os diferentes tempos de tratamento.

A fita tratada durante 30 minutos apresentou uma curva  $\Delta E$  mais assimétrica e mais profunda. Este parâmetro de tempo foi o escolhido para a realização dos tratamentos térmicos nas demais ligas avaliadas neste trabalho. Os tratamentos em diferentes tempos ainda devem ser reproduzidos para uma melhor investigação.

A fita tratada por 60 minutos apresentou, através de uma análise de sua curva de magnetização, uma susceptibilidade magnética constante, semelhante à fita tratada por 30 minutos. Porém, seu campo de anisotropia apresentou valor mais elevado que para a fita de 30 minutos.

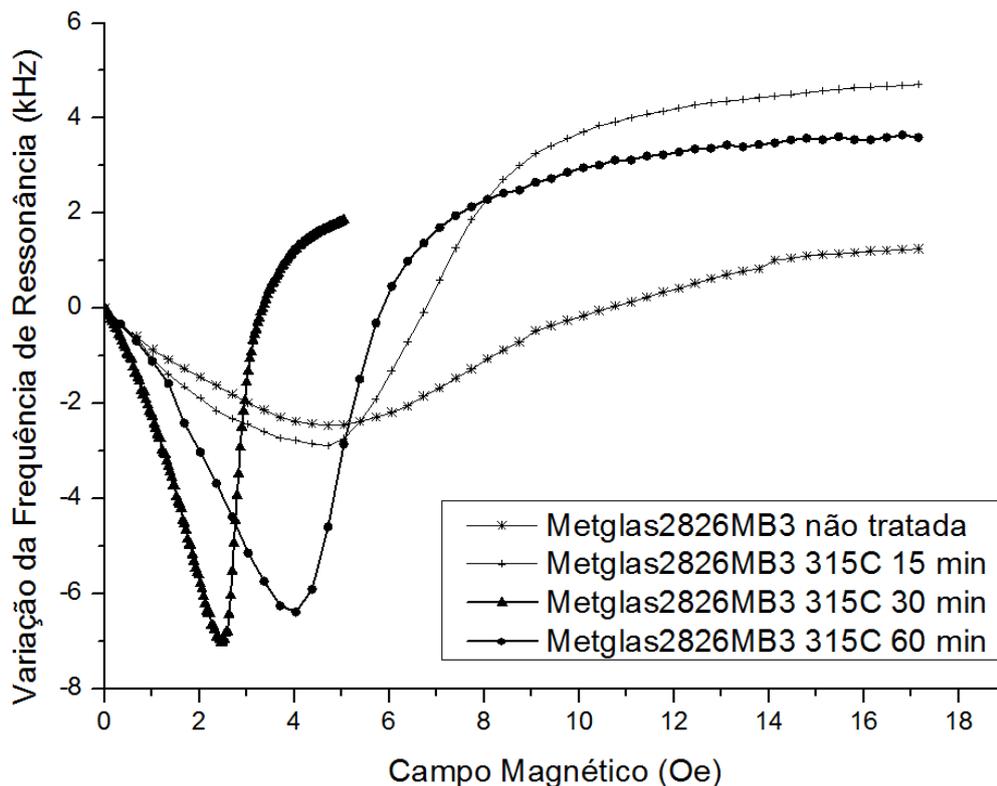


Figura 34. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Metglas 2826MB3 tratadas a 315°C, durante diferentes tempos, com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

As Figuras 35 e 36 mostram a influência dos tratamentos térmicos para as fitas Yeke 1k501 e Yeke 1k501a, respectivamente. Os tratamentos foram realizados em diferentes temperaturas por 30 minutos. Da mesma forma que as fitas Metglas, ambas as fitas chinesas apresentam curvas mais assimétricas quando tratadas sob temperaturas mais elevadas, com redução do valor de seu campo de anisotropia. Os tratamentos de 350°C apresentaram as maiores variações de frequência de ressonância e curvas mais assimétricas.

Devido à redução dos campos de anisotropia e ao aumento das variações de frequência de ressonância, todas as fitas tratadas apresentam uma maior sensibilidade à aplicação de campos magnéticos, quando comparadas às de fábrica.

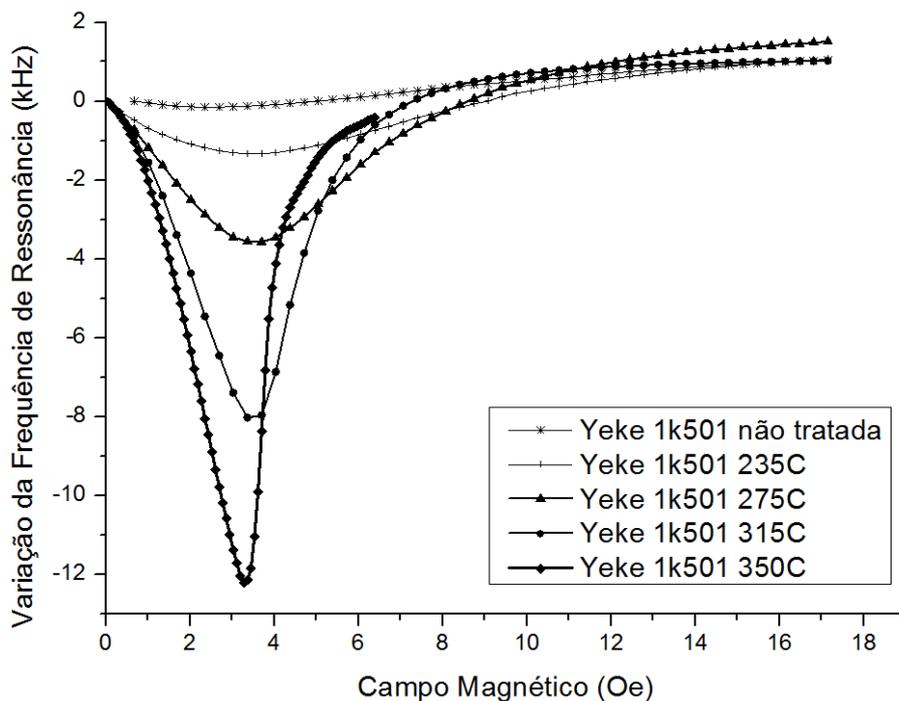


Figura 35. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Yeke 1k501 tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

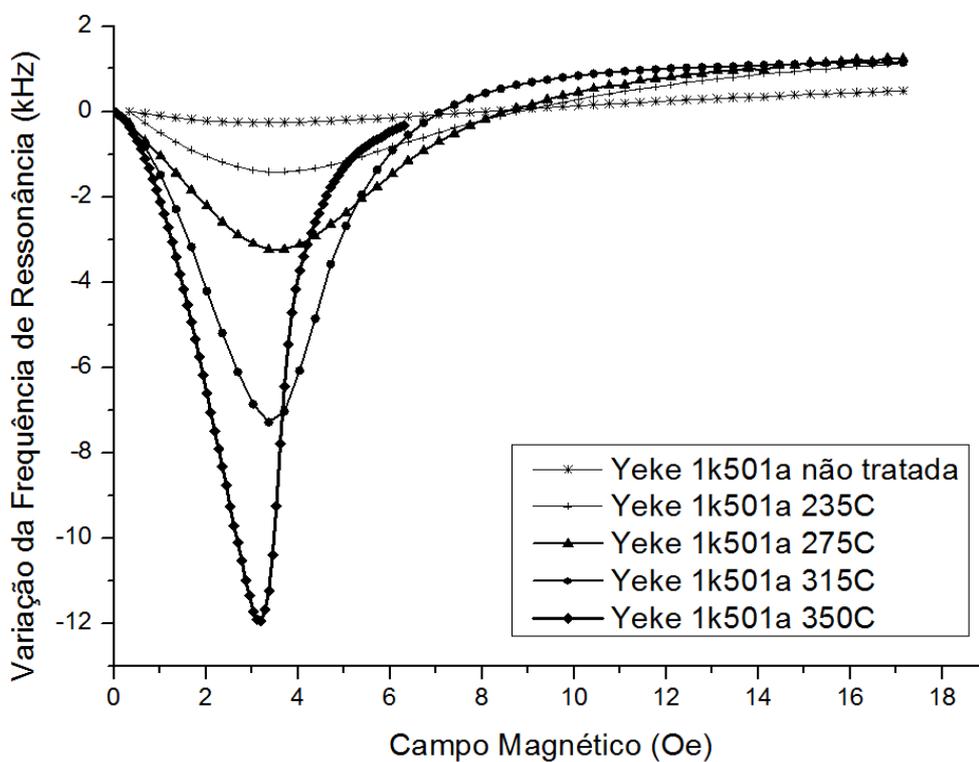


Figura 36. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Yeke 1k501a tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

A Figura 37 apresenta a diferença entre as curvas de magnetização de uma fita Yeke 1k501 não tratada e após tratamento de 350°C por 30 minutos. Estas curvas possuem comportamento semelhante ao observado anteriormente para a fita Metglas, com redução da constante  $K_a$  corroborando a forma das curvas  $\Delta E$ .

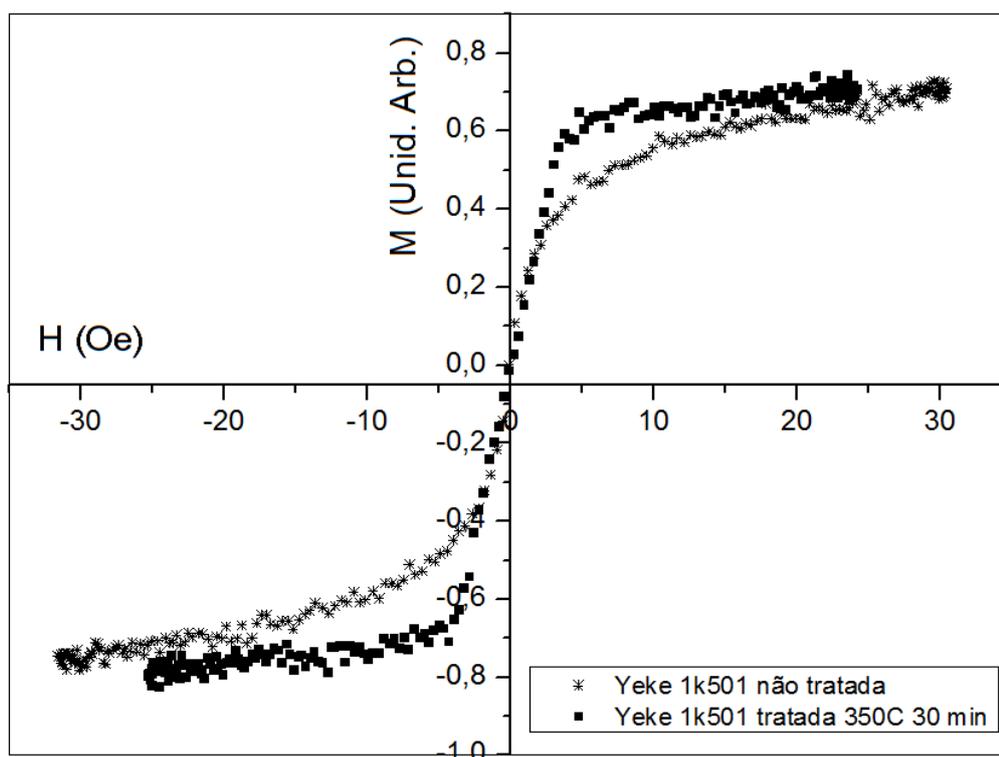


Figura 37. Curvas de magnetização para fita Yeke 1k501 antes e após tratamento a 350°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

As fitas Vitrovac 7600 também apresentaram melhorias após os tratamentos termomagnéticos, Figura 38. Para estas fitas, os tratamentos térmicos também apresentaram um aumento evidente na assimetria das curvas  $\Delta E$ , porém, com um aumento do valor do campo de anisotropia em função da temperatura de tratamento. Este comportamento não foi observado para os outros materiais testados. Isto pode estar relacionado com a diferente composição desta liga (presença do elemento Co).

Para verificar estes dados, as curvas de magnetização para este material também foram traçadas antes e após os tratamentos térmicos. As curvas da Figura 39 confirmam o aumento do campo de anisotropia para uma fita Vitrovac 7600 tratada a 315°C por 30 minutos. Significando num aumento de  $K_a$  para este material.

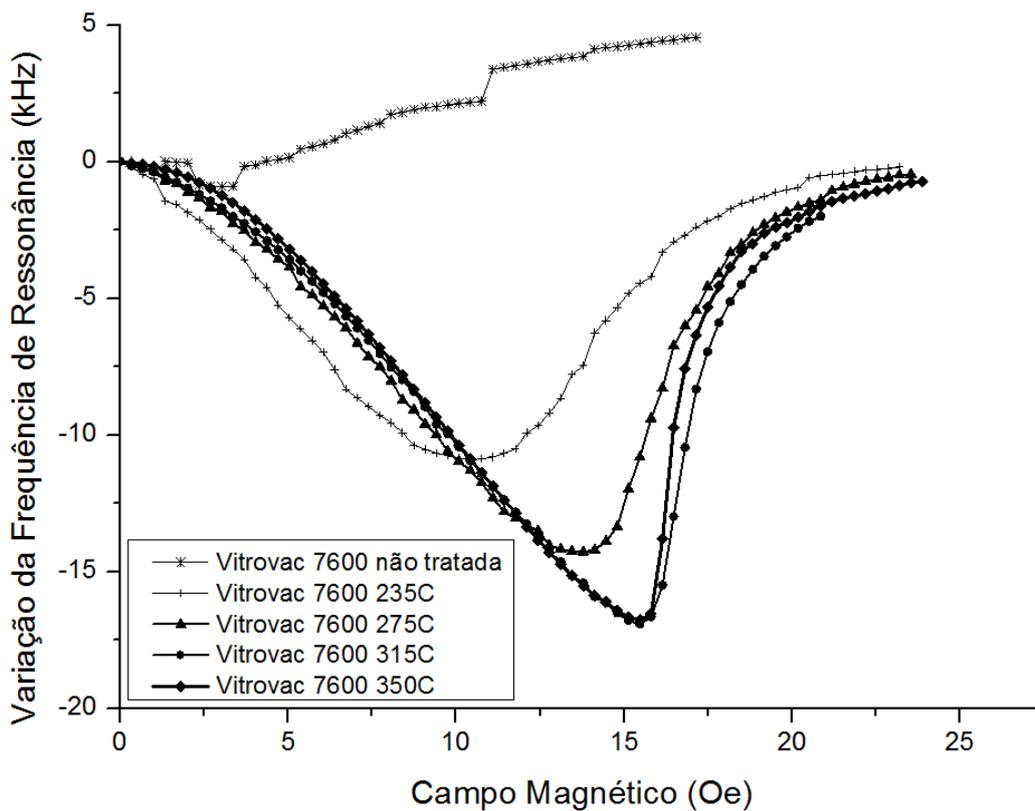


Figura 38. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para fitas Vitrovac 7600 tratadas sob diferentes temperaturas, durante 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

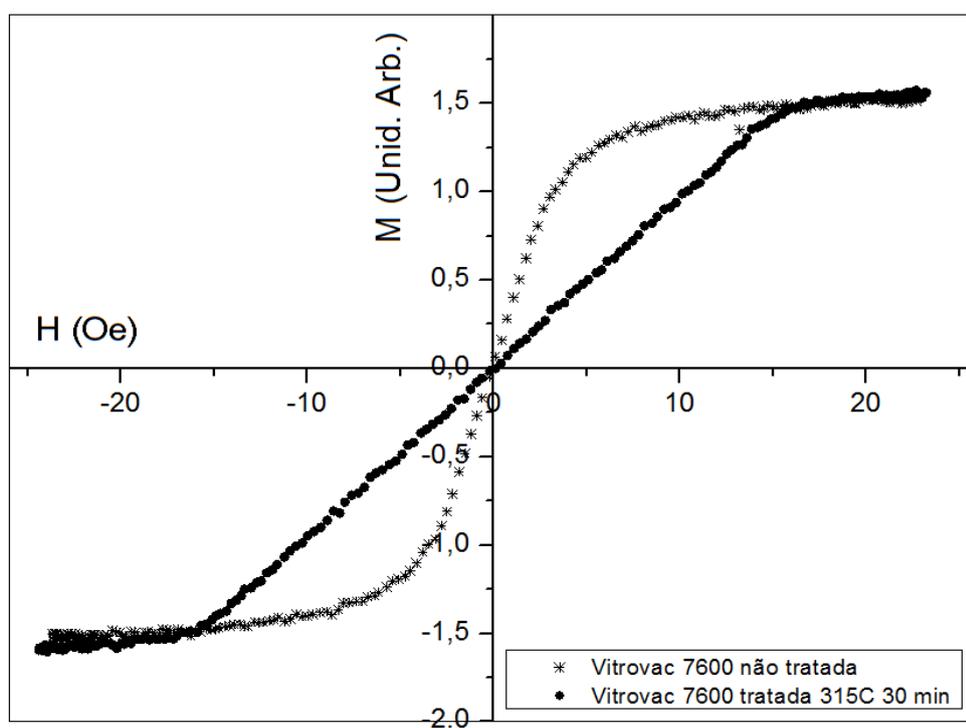


Figura 39. Curvas de magnetização para fita Vitrovac 7600 antes e após tratamento a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

As fitas amorfas utilizadas nos EAS tags, durante seu processo de fabricação, passam por tratamentos térmicos sob tensão e temperatura. Um tratamento a 315°C durante 30 minutos foi realizado e não resultou em variações consideráveis na forma de sua curva  $\Delta E$ , como as fitas tratadas previamente, Figura 40.

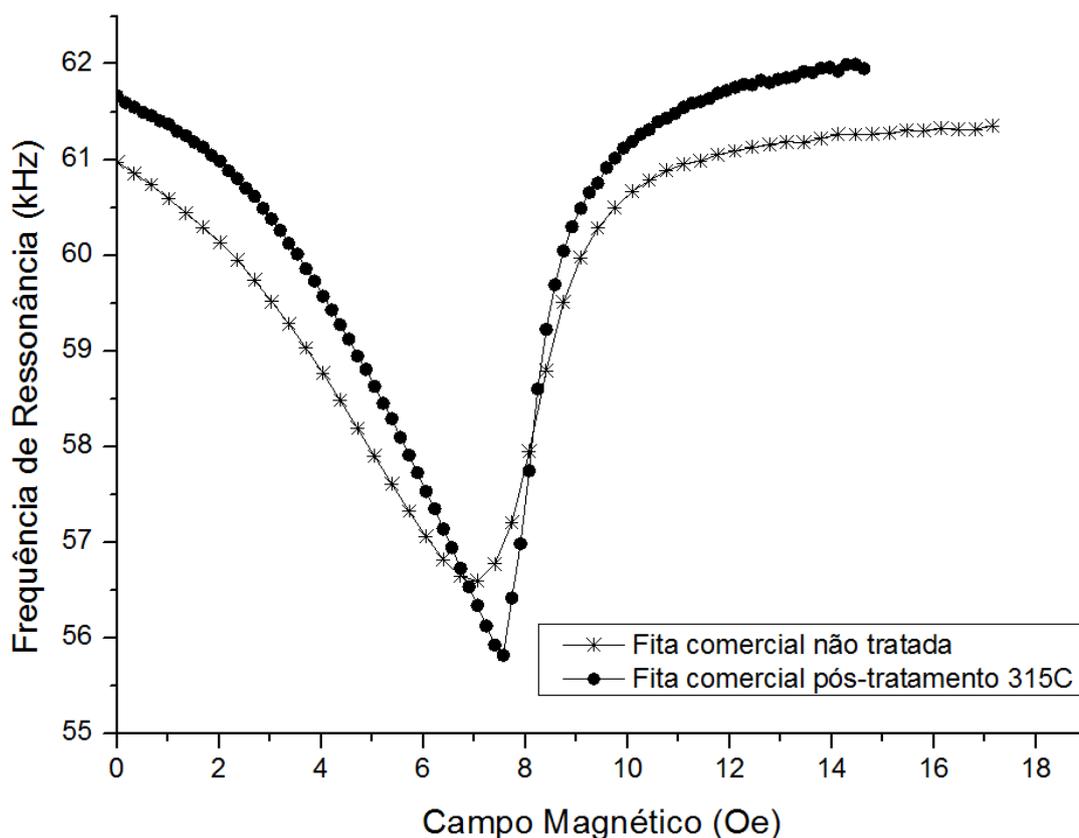


Figura 40. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para uma fita de EAS tag tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

A liga nanocristalina Vitroperm 800 também foi tratada nas mesmas condições da fita acima. Esta fita, diferentemente de todas as outras, não apresentava curvas  $\Delta E$  bem definidas, e mesmo após tratamento, não apresentou melhorias comparáveis às observadas nas outras ligas, Figura 41. Nesta curva, os valores de frequência de ressonância não apresentam uma continuidade. Isto pode ser explicado por tensões internas presentes no material.

As tensões internas podem gerar mais de um pico de ressonância para um mesmo campo de bias aplicado sobre o material. Isto ocorre pois mais de um modo

de vibração está presente quando o material é excitado magneticamente através do campo de interrogação. Cada modo, para um mesmo campo de bias, possui uma frequência de ressonância específica. Quando um dos modos apresenta uma amplitude vibracional maior que outro, um salto no valor da frequência é detectado, como observado através da curva  $\Delta E$  para o material Vitroperm 800 tratado.

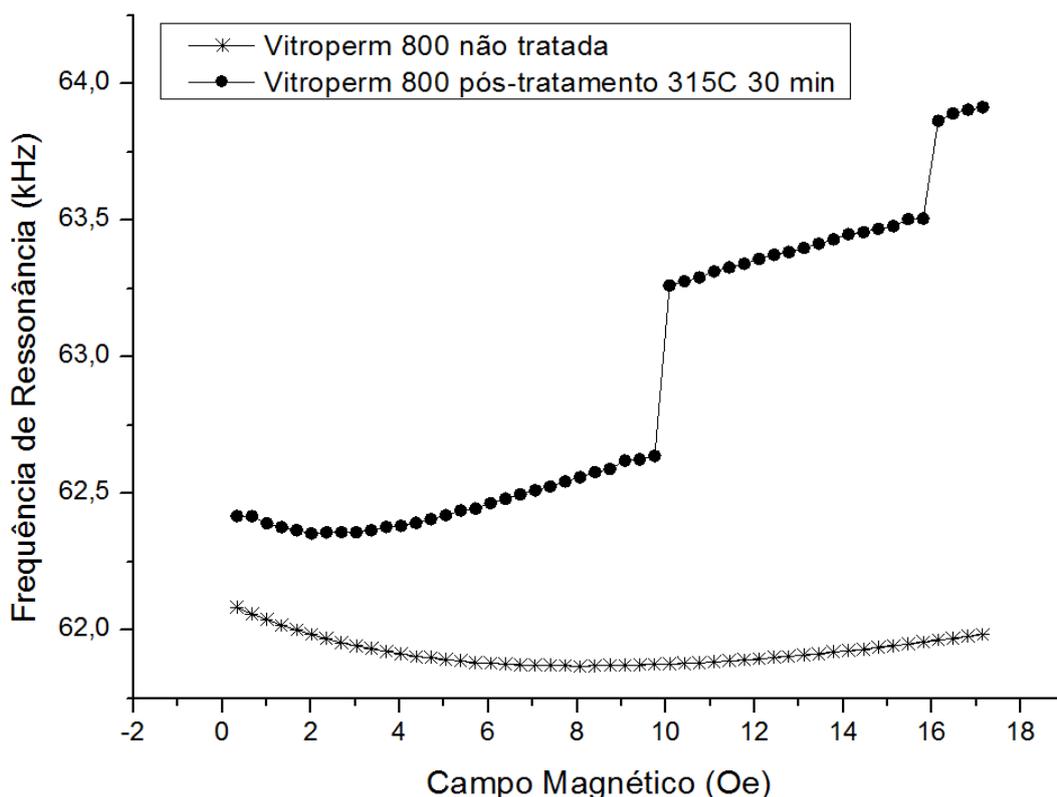


Figura 41. Variação da frequência de ressonância em função de campo magnético para uma fita de Vitroperm 800 tratada a 315°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe.

Tratamentos térmicos podem aliviar as tensões internas presentes no material. Para melhor exemplificar isto, as Figura 42 e 43 apresentam os picos de frequência de ressonância, para um mesmo campo de bias  $\sim 7,06$  Oe, para uma fita Yeke 1k501 antes e após tratamento termomagnético, respectivamente.

Através da Figura 42 é possível observar mais de um pico de ressonância na região de maior amplitude de sinal. Já, uma fita tratada apresenta uma relaxação das tensões internas, fazendo com que o pico de ressonância se torne bem definido com apenas um modo de vibração, como apresentado na Figura 43. O que ocorre no caso

da fita Vitroperm 800 tratada, é que tensões internas ainda estiveram presentes após o processo de tratamento. Isto pode estar relacionado ao fato de esta liga possuir uma estrutura nanocristalina, diferentemente das outras ligas avaliadas.

Também é possível observar que, após o tratamento térmico, a amplitude do sinal também aumenta, fornecendo uma maior resposta magnética ao sistema. De acordo com Kim *et al.* [50], fitas tratadas, em comparação com as não tratadas, apresentam maior magnetostricção. Isto faz com que, quando interrogadas em sua frequência de ressonância, apresentem deformações mais elevadas, podendo ocasionar maiores variações de fluxo magnético, gerando um sinal de maior amplitude.

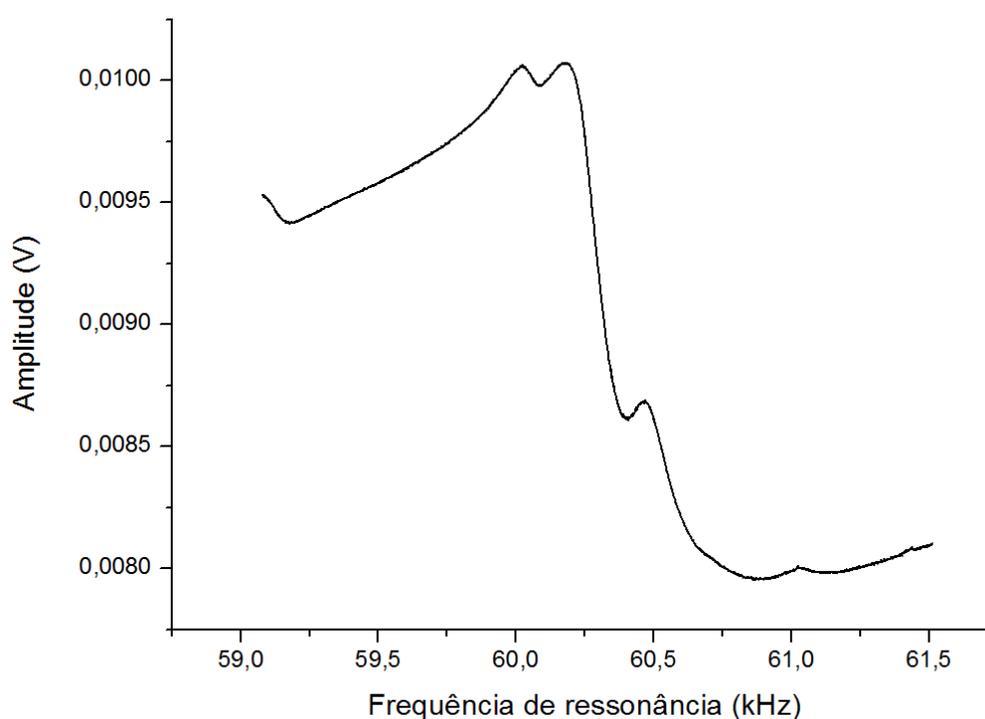


Figura 42. Pico de frequência de ressonância para fita Yeke 1k501 não tratada. Campo de bias de  $\sim 7,06$  Oe.

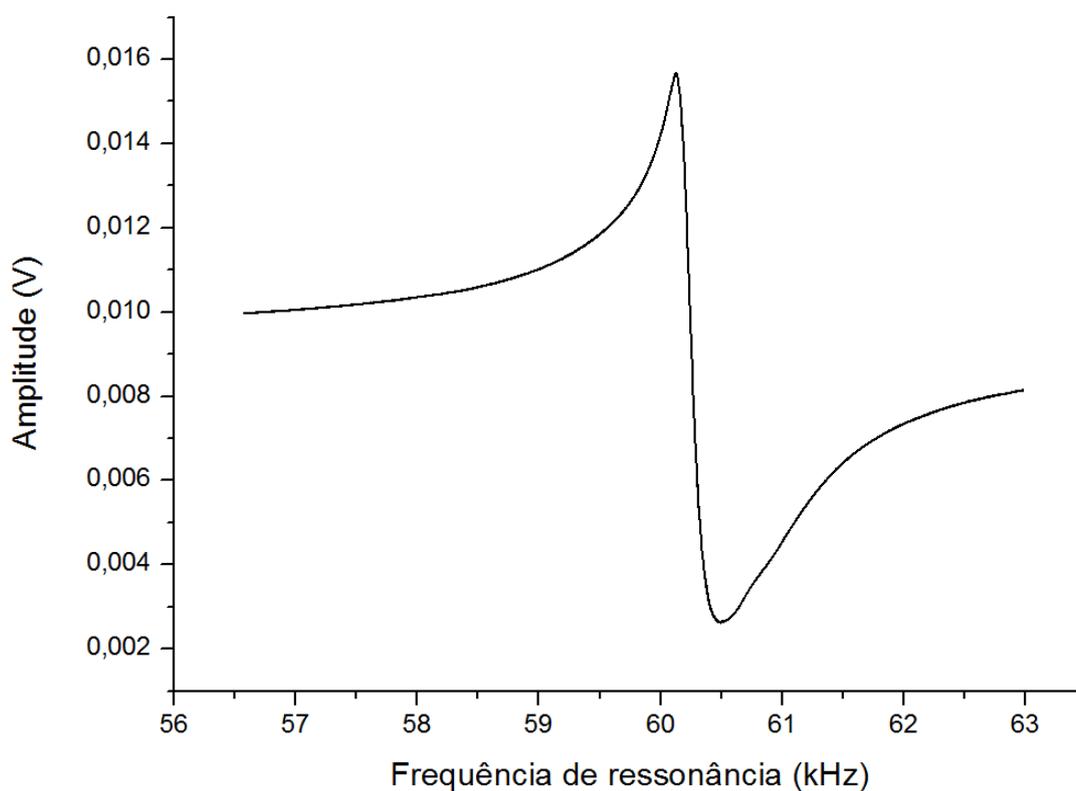


Figura 43. Pico de frequência de ressonância para fita Yeke 1k501 após tratamento a 275°C por 30 minutos com campo transversal de aproximadamente 550 Oe. Campo de bias de ~7,06 Oe.

Os tratamentos termomagnéticos, de maneira geral para as fitas Metglas 2826MB3, Yeke 1k501, 1k501a e Vitrovac 7600, aumentam a anisotropia magnética no eixo transversal das fitas, fazendo com que as curvas  $\Delta E$  se tornem mais profundas e assimétricas. A Tabela a seguir apresenta os valores aproximados de campo de anisotropia e variação máxima de frequência de ressonância da curva  $\Delta E$  (do estado não magnetizado até o campo de anisotropia), para as temperaturas de tratamento com melhores resultados destas ligas.

Tabela 2. Campos de anisotropia e variações máximas de frequência para fitas tratadas.

Liga	Temperatura de tratamento (°C)	$H_A$ (Oe)	$\Delta f$ (kHz)
Metglas 2826MB3	315	2,45	7,04
	350	2,19	6,99
Yeke 1k501	350	3,28	12,21
Yeke 1k501a	350	3,19	11,95
Vitrovac 7600	315	15,47	16,91
	350	15,47	16,77

As temperaturas de tratamento de 315 e 350°C, para as ligas Metglas 2826MB3 e Vitrovac 7600, não acarretam em diferenças consideráveis entre suas curvas  $\Delta E$ . Para as fitas da Yeke Co. Ltd., foi observada uma semelhança na composição, assim como resultados semelhantes para os tratamentos térmicos. Isto está de acordo com a sugestão de as duas ligas serem idênticas.

Apesar de as ligas Yeke 1k501 e Metglas 2826MB3 possuírem composições praticamente idênticas, suas curvas  $\Delta E$ , antes e após os tratamentos, possuem características diferentes. Isto pode estar relacionado com o método de produção destes materiais e a homogeneidade da dispersão dos componentes da liga dentro de suas estruturas.

Para todos os tratamentos térmicos, os resfriamentos foram realizados a temperatura ambiente, mantendo as fitas tratadas sob vácuo durante o processo. As Figuras 44 e 45 apresentam o resfriamento das ligas em função do tempo e a taxa de resfriamento em função da temperatura, respectivamente.

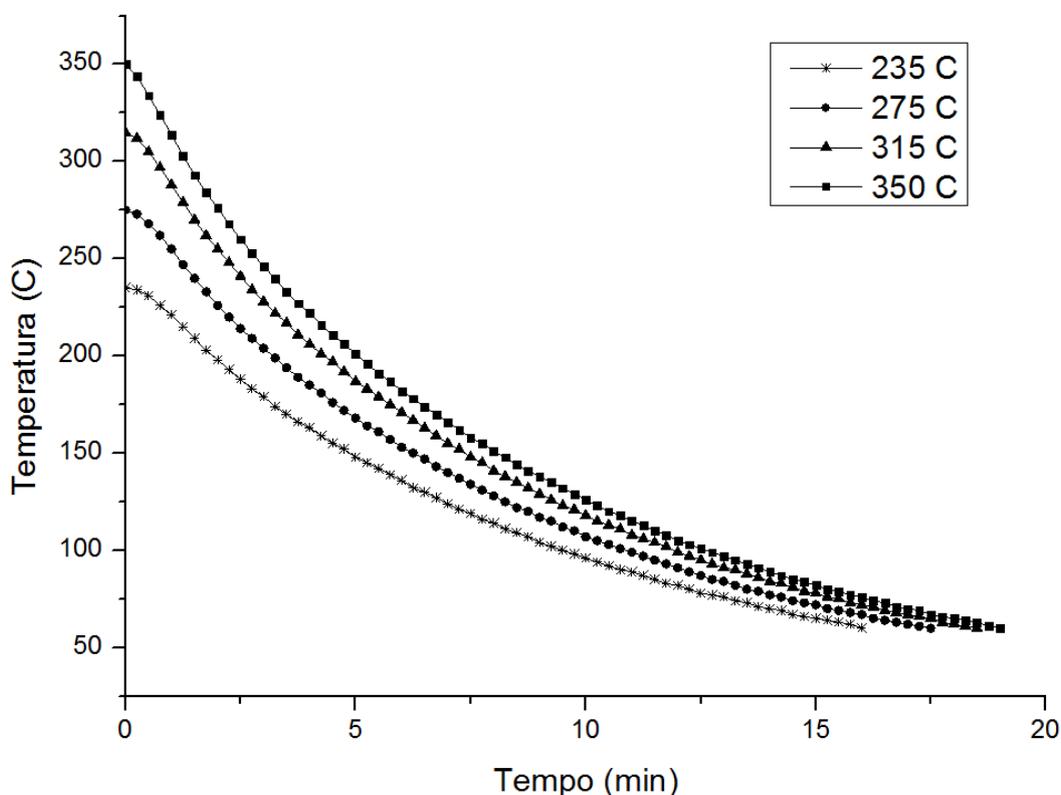


Figura 44. Temperatura em função do tempo de resfriamento.

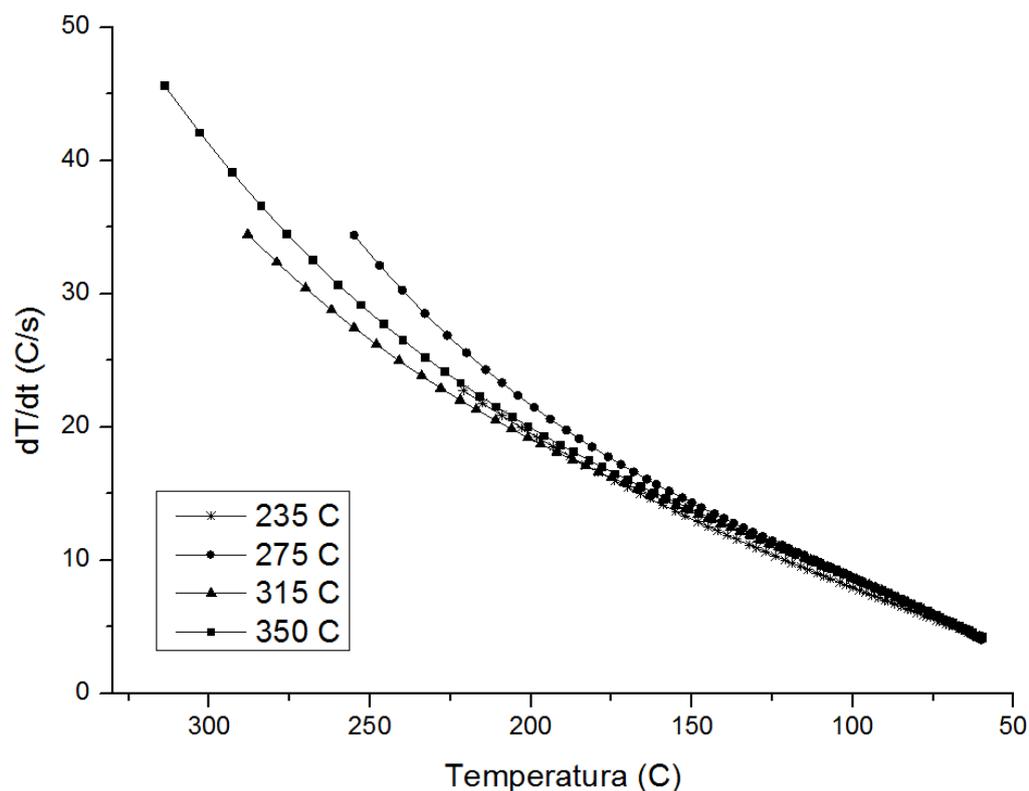


Figura 45. Taxas de resfriamento em função da temperatura.

Para a obtenção das curvas das taxas de resfriamento em função da temperatura, Figura 45, uma derivada numérica foi calculada através dos dados apresentados na Figura 44. A partir disso, a equação que descreve a curva foi encontrada e, posteriormente, as curvas das taxas de resfriamento foram calculadas para as temperaturas medidas.

Devido à ausência de um sistema para controle de resfriamento, as taxas de resfriamento não foram uniformes, diminuindo juntamente à temperatura.

### 5.3 CÁLCULO DAS CONSTANTES DE ANISOTROPIA

Para a realização dos cálculos das constantes  $K_a$  dos materiais tratados, utilizou-se os valores de magnetização de saturação obtidos nos data-sheets e artigos. Para os campos de anisotropia, utilizou-se os valores obtidos através das curvas  $\Delta E$ .

Através das curvas de magnetização, observou-se que as ligas tratadas apresentam susceptibilidade magnética constante até a saturação, tornando válida a aproximação do cálculo de  $K_a$  através da equação 4. A tabela abaixo mostra os valores das constantes calculadas (estimadas) para as ligas tratadas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 3. Constantes de anisotropia  $K_a$  para as fitas tratadas.

Liga	Temperatura de tratamento (°C)	$M_s$ (T)	$K_a$ (J/m <sup>3</sup> )
Metglas 2826MB3	315	0,88	$1,1 \cdot 10^3$
	350		$9,7 \cdot 10^2$
Yeke 1k501	350	0,88	$1,4 \cdot 10^3$
Yeke 1k501a	350		$1,4 \cdot 10^3$
Vitrovac 7600	315	1,74	$2,7 \cdot 10^4$
	350		$2,7 \cdot 10^4$

A liga Metglas 2826MB3 apresenta os menores valores de  $K_a$ , seguida pelas ligas Yeke e Vitrovac 7600. A liga Vitrovac 7600 apresenta seu valor de  $K_a$  em uma ordem de grandeza maior que as outras ligas.

Ainda que, possuindo o mesmo valor de magnetização de saturação e valores de  $K_a$  da mesma ordem de grandeza, as ligas Yeke necessitam de maior energia para atingir sua saturação magnética, em comparação com a liga Metglas. Ao se avaliar os valores de  $K_a$  e os valores de magnetização de saturação para as ligas tratadas, é possível concluir que a susceptibilidade magnética da liga Metglas é a maior dentre todas.

Uma maior susceptibilidade permite que um ponto de operação possa ser atribuído a um ressonador com campos magnéticos de menor energia, como já observado através das curvas  $\Delta E$ . Porém, a variação de frequência de ressonância máxima ( $\Delta f$ ) para a liga Metglas ainda é menor dentre as ligas, Tabela 2. Isto pode limitar o range de operação de um ressonador desse material.

#### 5.4 TESTE DE DEFORMAÇÃO

Para a realização dos testes de deformação, quatro fitas diferentes foram utilizadas como transdutores:

- Yeke 1k501 tratada a 350°C por 30 minutos;
- Yeke 1k501a tratada a 350°C por 30 minutos;
- Vitrovac 7600 tratada a 315°C por 30 minutos;
- Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 60 minutos.

Para cada transdutor, três fitas diferentes foram utilizadas como ressonador:

- Yeke 1k501 tratada a 350°C por 30 minutos;
- Yeke 1k501a tratada a 350°C por 30 minutos;
- Metglas 2826MB3 tratada a 350°C por 30 minutos.

A liga Vitrovac 7600 não foi utilizada como ressonador devido a uma limitação técnica. O alto valor de campo de anisotropia desta liga não pôde ser aplicado através do analisador de redes da Agilent, impossibilitando a atribuição de um ponto de operação elevado.

O sistema de bobinas de Helmholtz, utilizado para a obtenção das curvas  $\Delta E$ , não foi utilizado para os testes de deformação. Durante os testes, o substrato de latão se deslocava à medida que a tensão era aplicada, impossibilitando a atribuição de um ponto de operação constante nos ressonadores. Os testes de deformação foram realizados com o analisador de redes.

Para atribuir o ponto de operação ideal para os ressonadores, suas curvas  $\Delta E$  foram traçadas quando sobre os transdutores. Os pontos de operação com grandes variações de frequência de ressonância, em função do campo magnético, foram escolhidos para os testes (região após o vale das curvas  $\Delta E$ ).

Uma observação constatada através dos testes de deformação é que, a magnetização induzida pela deformação no transdutor possui direção paralela ao campo de bias, utilizado para atribuir o ponto de operação do ressonador. A Figura 46 apresenta um desenho esquemático da interação entre o campo magnético gerado

pelo transdutor e o campo de bias, aplicados sobre o ressonador. De acordo com o artigo publicado pelo grupo do laboratório LCM-UCS em 2016 [52], o campo de bias (sobre o ressonador) é afetado pelo campo originado da magnetização do transdutor. À medida que o transdutor se magnetiza (material com magnetostricção positiva), o seu campo reduz o campo de bias, diminuindo o fluxo magnético sobre o ressonador. Isto é uma possível explicação para as variações de frequência de ressonância positivas ou negativas dos ressonadores durante os testes de deformação.

Uma segunda hipótese é que, de acordo com O'Handley, materiais com magnetostricção positiva aumentam sua susceptibilidade magnética (por consequência, sua permeabilidade) durante um processo de tração, Figura 9. Isto faria com que um aumento no fluxo magnético ocorresse no transdutor à medida que se deforma juntamente com o substrato sob tração. Em outras palavras, tanto o campo gerado pelo transdutor, quanto o aumento de sua permeabilidade, estariam causando uma diminuição do fluxo magnético, gerado pelo campo de bias, através do ressonador.

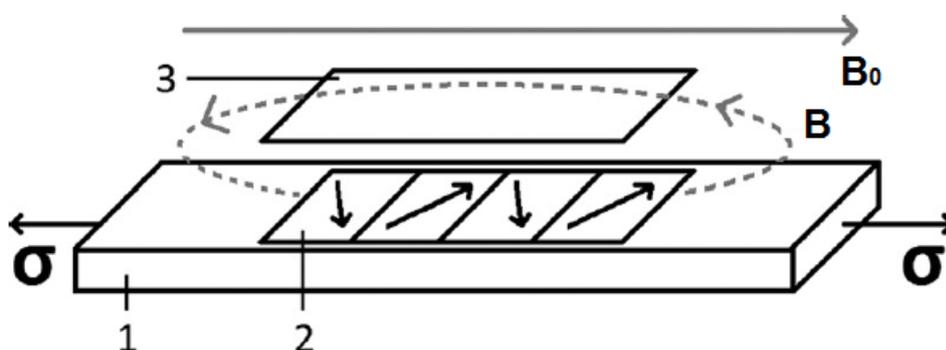


Figura 46. Esquema representativo da interação entre 3) ressonador e 2) transdutor durante um processo de deformação de um 1) substrato. Adaptado de [52].

A Figura 47 apresenta os resultados dos testes de deformação para o transdutor Yeke 1k501 tratado a 350°C por 30 minutos, com três diferentes ressonadores. A curva do ressonador Yeke 1k501a apresenta variações de frequência de ressonância positivas. Isto se deve ao fato de seu ponto de operação ter sido atribuído antes do mínimo de sua curva  $\Delta E$ , diferentemente das outras duas ligas. Esta escolha foi realizada pois os picos de frequência de ressonância obtidos após

esta região não eram bem definidos, para esta liga. Este fato foi constatado apenas quando o ressonador se encontrava posicionado sobre o transdutor. Isto pode ser um indicativo que o fluxo magnético sobre o ressonador não é uniforme quando nessa condição.

É possível observar também, através das curvas da Figura 47, que as variações de frequência de ressonância não são constantes ao longo do teste de deformação. Isto também é constatado por Suess [26]. À medida que a deformação aumenta, as variações de frequência de ressonância atingem um plateau. Isto pode estar relacionado à saturação do transdutor e/ou a um máximo ou mínimo determinado pela curva  $\Delta E$  do ressonador utilizado.

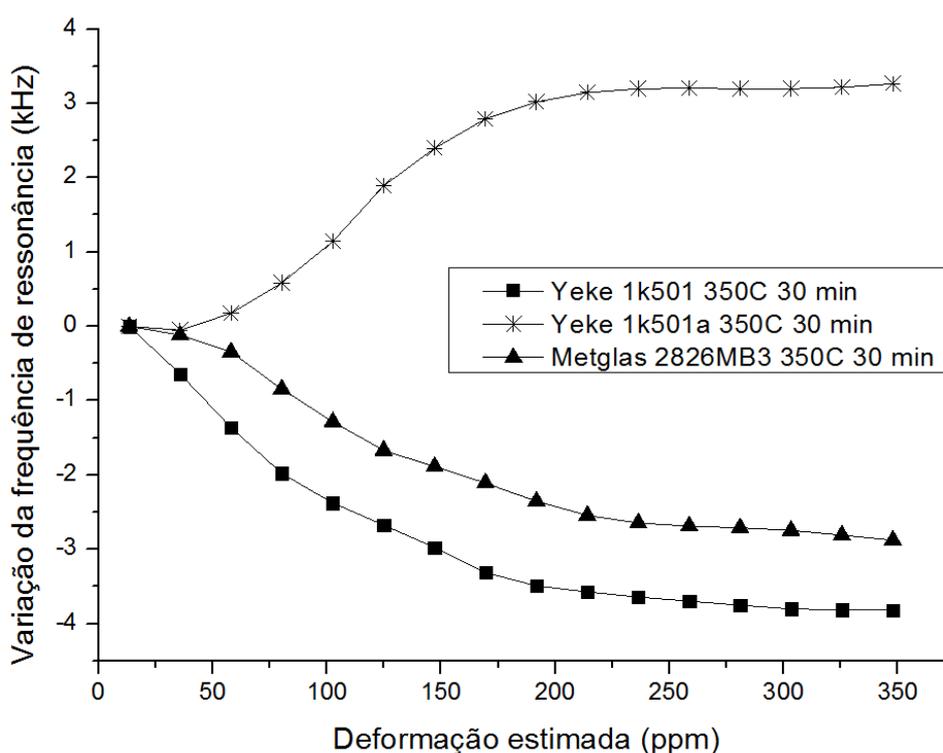


Figura 47. Teste de deformação para o transdutor Yeke 1k501 tratado a 350°C por 30 minutos. Ressonadores Yeke 1k501, Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.

Os testes de tração para os transdutores Yeke 1k501a tratado a 350°C por 30 minutos e Metglas 2826MB3 tratado a 315°C por 60 minutos estão apresentados nas Figuras 48 e 49, respectivamente. Para o transdutor Yeke 1k501a, o ressonador Yeke

1k501 também não apresentou picos de frequência de ressonância bem definidos. Este ressonador não foi avaliado nos testes de tração para este transdutor.

É possível observar um comportamento semelhante para os dados apresentados nas Figuras 47 e 48. Os pares ressonador e transdutor compostos pelas fitas chinesas, apresentaram maiores variações de frequência de ressonância. Já, na Figura 49, a maior variação de frequência de ressonância ocorre para o par ressonador e transdutor composto por fitas Metglas, também constatado em [52].

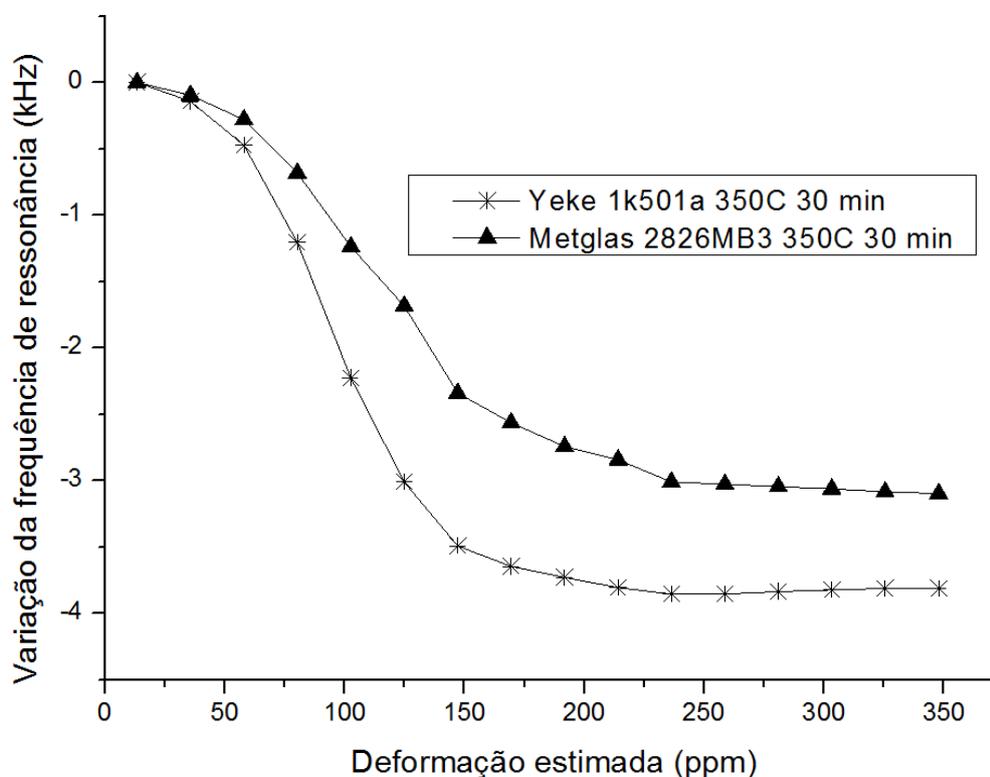


Figura 48. Teste de deformação para o transdutor Yeke 1k501a tratado a 350°C por 30 minutos. Ressonadores Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.

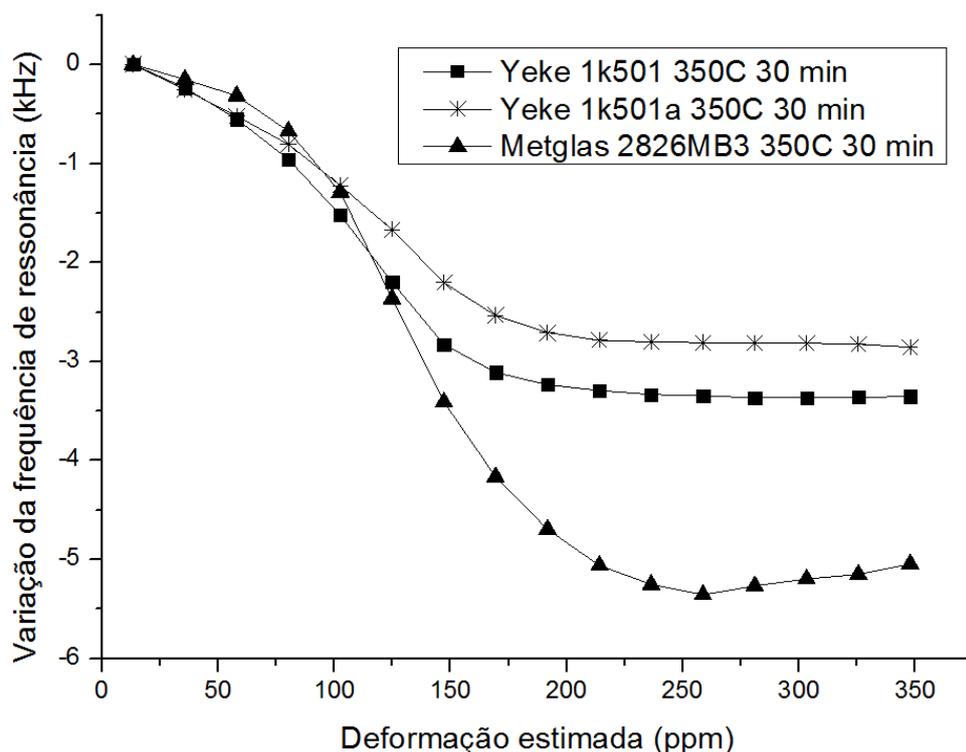


Figura 49. Teste de deformação para o transdutor Metglas 2826MB3 tratado a 315°C por 60 minutos. Ressonadores Yeke 1k501, Yeke 1k501a e Metglas 2826MB3 tratados a 350°C por 30 minutos.

Todas as curvas de deformação apresentadas demonstraram grandes variações de frequência de ressonância em comparação com resultados iniciais. Previamente à realização dos tratamentos térmicos nas fitas, variações pequenas de frequência de ressonância e sem um comportamento definido foram observadas para os testes de deformação. Isto foi um dos motivos para a realização dos tratamentos termomagnéticos.

Uma comparação foi realizada entre o material tratado e não tratado em um teste de deformação, publicada no artigo [52] pelo grupo do laboratório LCM. A Figura 50 apresenta estes resultados. O transdutor Metglas utilizado neste teste foi o mesmo utilizado nos testes mencionados anteriormente.

Enquanto o ressonador Metglas tratado apresenta, neste caso, uma variação de frequência de ressonância de aproximadamente -4 kHz, o mesmo material não tratado apresenta uma variação de apenas ~ 190 Hz. O tratamento ocasionou um aumento de 20 vezes na variação de frequência de ressonância da fita. O EAS tag

não tratado em laboratório, apresentou uma variação de ~825 Hz, em torno de 4 vezes maior que para o Metglas não tratado.

Para fins de uma melhor visualização, uma linha preta contínua foi traçada na figura abaixo, representando o ponto de variação nula de frequência de ressonância. Desta forma, se torna mais evidente a necessidade dos tratamentos térmicos realizados nas fitas amorfas.

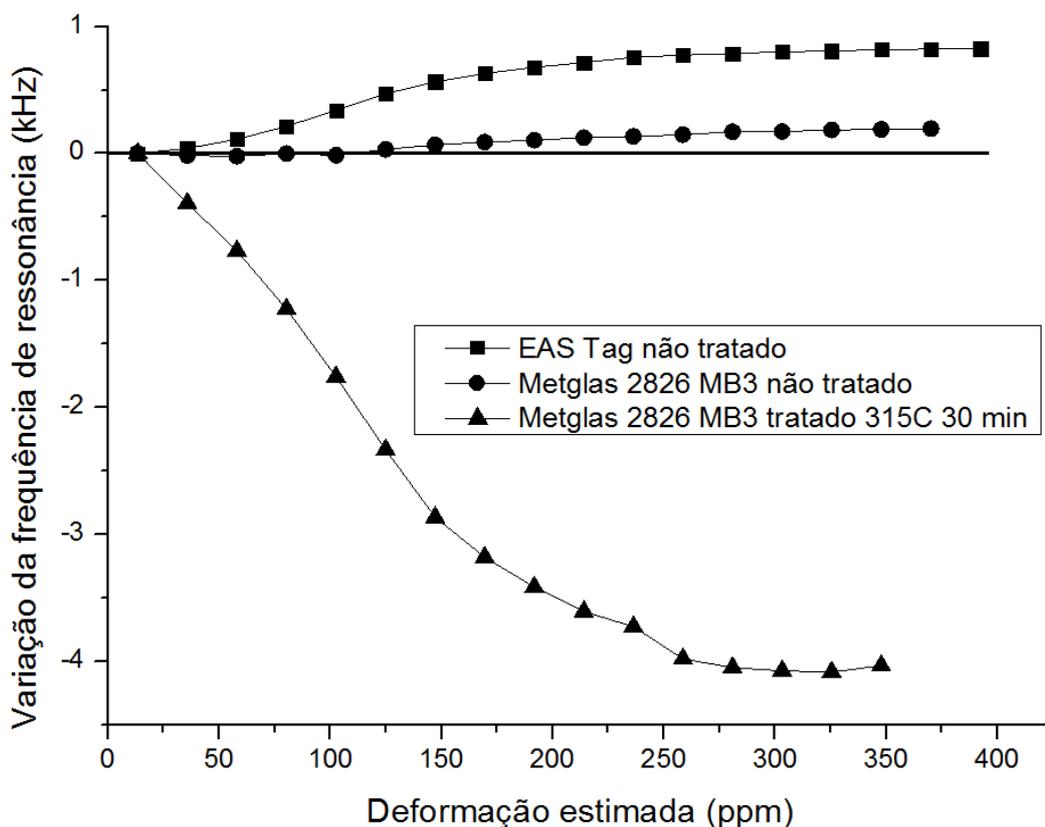


Figura 50. Teste de deformação para o transdutor Metglas 2826MB3 tratado a 315°C por 60 minutos. Adaptado de [52].

Outro fato observável através destas curvas, é que a saturação, região do plateau, atingida pelos ressonadores, ocorre em diferentes valores de deformação. Diferentes pontos de operação foram utilizados para cada ressonador, sugerindo que talvez o transdutor também esteja respondendo diferentemente de acordo com o ponto de operação atribuído. Para melhor compreender o ocorrido, curvas de

magnetização foram traçadas para uma fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, antes e após colagem, Figura 51.

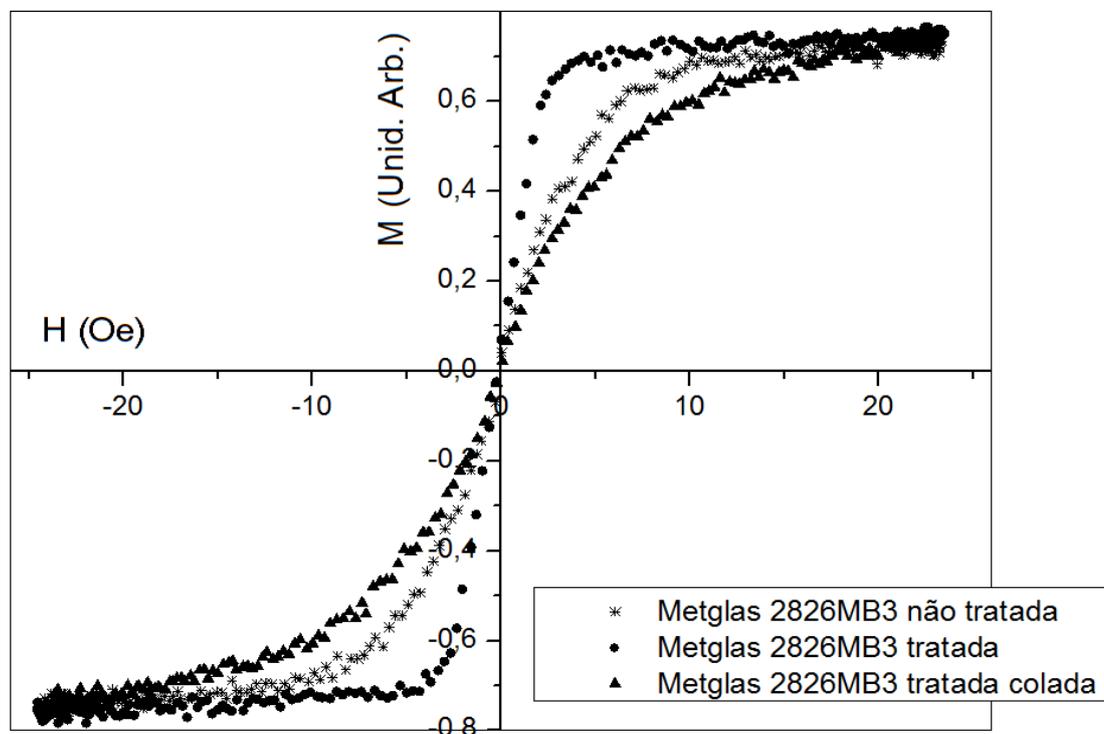


Figura 51. Curvas de magnetização para fita Metglas 2826MB3, antes e após colagem, tratada a 315°C por 30 minutos.

A curva de magnetização característica para o material não tratado possui maior susceptibilidade magnética que para o material tratado colado. Isto demonstra que o processo de colagem restringe a magnetização do material, porém não impede que o mesmo se magnetize. Isto sugere que, quando um ponto de operação é atribuído, o transdutor também acaba por se magnetizar, porém com uma menor intensidade, podendo limitar o seu range de operação.

Quando a variação da frequência de ressonância, para os ressonadores Yeke 1k501a (Figura 48) e Metglas (Figuras 49 e 50), atinge seu plateau na curva de deformação, ela apresenta uma pequena variação positiva nos valores mais altos de deformação.

Duas hipóteses para este comportamento estão sendo avaliadas. A primeira, e mais simples, é a de que o ressonador passou da região do vale de sua curva  $\Delta E$ ,

invertendo o sinal da variação de sua frequência de ressonância. A segunda hipótese, é a de que o transdutor chegou no seu ponto de saturação devido ao processo de deformação. Quando um material atinge a saturação magnética, sua susceptibilidade magnética se torna nula (magnetização constante), reduzindo o valor da permeabilidade do material. Isto indica que após a saturação do transdutor, um aumento do fluxo magnético sobre o ressonador poderia estar ocorrendo, fazendo com que os valores de frequência de ressonância voltem a aumentar.

O acoplamento entre os pares transdutor e ressonador ainda deve ser melhor estudado para que o comportamento das curvas obtidas nos testes de tração possa ser melhor explicado. A Tabela 4, abaixo, mostra os valores máximos aproximados de variação de frequência de ressonância e suas respectivas deformações.

Tabela 4. Valores aproximados de variações de frequência de ressonância e deformações.

Ressonadores	Transdutores					
	Yeke 1k501		Yeke 1k501a		Metglas 2826MB3	
	$\epsilon$ (ppm)	$\Delta f$ (kHz)	$\epsilon$ (ppm)	$\Delta f$ (kHz)	$\epsilon$ (ppm)	$\Delta f$ (kHz)
Metglas 2826MB3 (350°C 30 min)	347	-2,87	236	-3,01	259	-5,35
Yeke 1k501a (350°C 30 min)	281	3,19	236	-3,85	259	-2,81
Yeke 1k501 (350°C 30 min)	303	-3,80	-	-	281	-3,36

A Tabela 5 apresenta os valores do Gauge Factor ( $GF$ ) para os pares ressonador e transdutor apresentados na Tabela 4. Nos sensores magnetostrictivos de deformação, o  $GF$  é calculado através da variação percentual da frequência de ressonância em função da deformação percentual imposta no sensor, equação 22. Lembrando que, os ressonadores utilizados possuem frequência de ressonância inicial em torno de 60 kHz.

$$GF = \frac{|\Delta f|}{f_0} \frac{1}{\epsilon} \quad (22)$$

$GF = Gauge\ Factor$  [adimensional];

$f_0 = Frequência\ de\ ressonância\ inicial$  [kHz].

Tabela 5. Gauge Factor para os pares ressonador e transdutor.

	Transdutores		
	Yeke 1k501	Yeke 1k501a	Metglas 2826MB3
Ressonadores	GF		
Metglas 2826MB3 (350°C 30 min)	139	215	348
Yeke 1k501a (350°C 30 min)	184	264	176
Yeke 1k501 (350°C 30 min)	201	-	192

Para fins de comparação, os extensômetros convencionais (variação de resistência elétrica) possuem valores de  $GF$  que variam entre 2 e 5 [20]. Isto demonstra que os sensores magnetostrictivos de deformação avaliados neste trabalho podem apresentar valores de  $GF$  de até duas ordens de grandeza maiores que os extensômetros convencionais.

## 5.5 CURVAS $\Delta E$ COM SUBSTRATO MAGNÉTICO

Os testes sobre substratos magnéticos moles foram realizados com o intuito de simular a aplicação do sensor dentro um sistema real. No caso dos *risers*, o sensor seria posicionado sobre a estrutura de uma das malhas de reforço interno. Esta malha é composta por um material metálico magnético que afetaria as condições de funcionamento do sensor de deformação.

Para a obtenção das curvas  $\Delta E$  sobre substrato magnético mole, a fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, Figura 30, foi utilizada. A fita foi posicionada sobre os substratos de aço 1010, acima de sua região central, dentro do sistema de detecção de bobinas de Helmholtz. Os três substratos de diferentes dimensões foram desmagnetizados através de sua permanência em um forno tubular a uma temperatura aproximada de 800°C por alguns segundos. A Figura 52 apresenta as curvas  $\Delta E$  para a fita Metglas sobre os três substratos de diferentes dimensões.

A curva  $\Delta E$  para a fita sobre o substrato de menor dimensão (1) não possui uma forma bem definida, quando comparada aos outros dois substratos. Para substratos com maiores comprimentos, o valor do campo desmagnetizante diminui. Isto pode estar relacionado com a maior distância entre os polos gerados nestes, durante a análise. Polos mais distantes implicam que campos com menores

intensidades sejam gerados ao redor da região central do substrato (local de posicionamento da fita ressonadora), sugerindo que o substrato de maior comprimento reduz menos intensamente os campos aplicados sobre a fita.

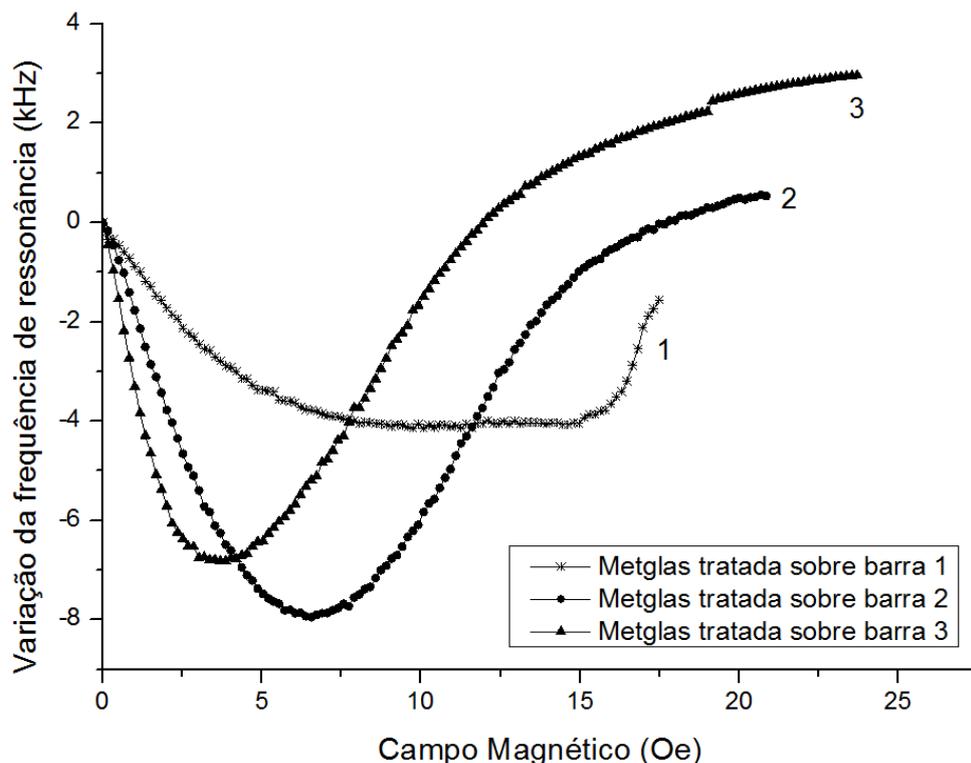


Figura 52. Variação da frequência de ressonância em função do campo magnético, para fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, sobre três substratos magneticamente moles (desmagnetizados) de diferentes dimensões.

Após a obtenção das curvas  $\Delta E$  sobre os substratos desmagnetizados, novas curvas foram traçadas sobre os mesmos, porém, sem que o processo de desmagnetização fosse realizado, Figura 53.

As curvas da Figura 53 são semelhantes a uma curva  $\Delta E$  espelhada na região do pico, demarcada por uma linha vertical em cada curva. Se cada curva for avaliada a partir dessa região, observa-se um comportamento semelhante às curvas apresentadas na figura anterior, exceto para o substrato 1.

Como os substratos da Figura 53 apresentavam magnetização residual, a fita, ao ser posicionada sobre os mesmos, poderia estar sendo magnetizada pelo campo proveniente desta magnetização. Durante o experimento de obtenção das curvas  $\Delta E$ ,

os momentos magnéticos da fita estariam se direcionando paralelamente ao campo aplicado, saindo da direção anti-paralela induzida pela magnetização dos substratos. Esta é uma possível explicação para o comportamento observado através das curvas da Figura 53.

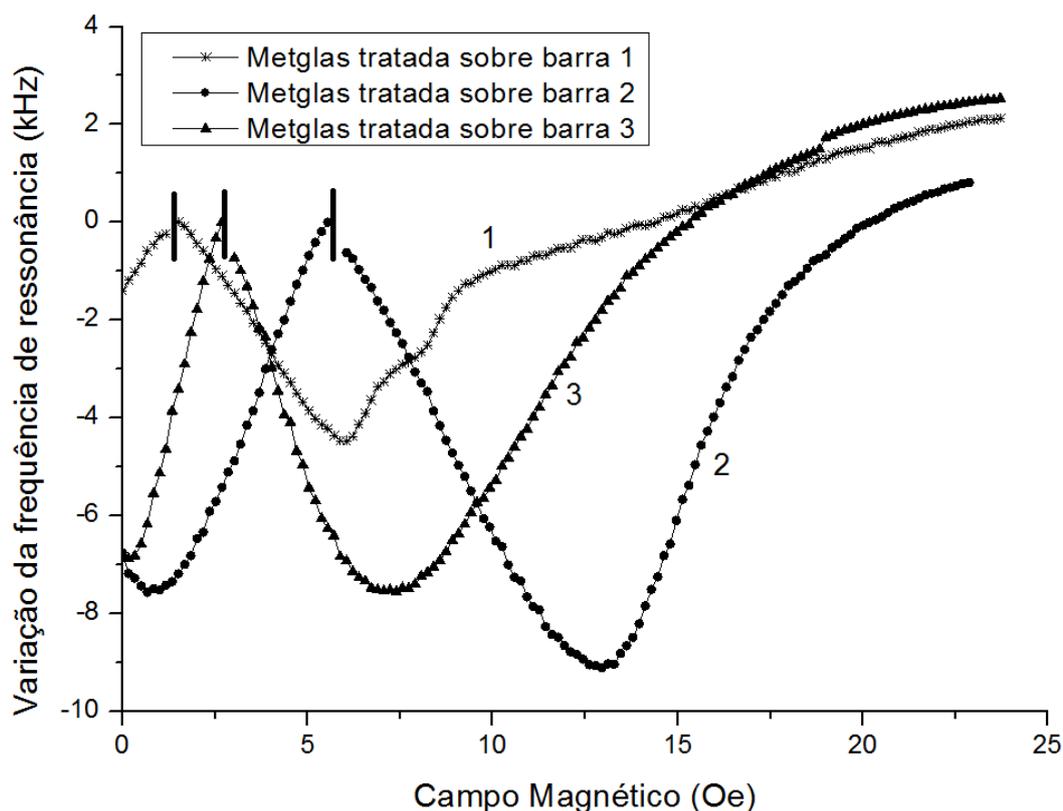


Figura 53. Variação da frequência de ressonância em função do campo magnético, para fita Metglas 2826MB3 tratada a 315°C por 30 minutos, sobre três substratos magneticamente moles de diferentes dimensões.

No tópico a seguir, simulações foram realizadas para avaliar qualitativamente os efeitos magnéticos ocorridos entre um sensor e um transdutor, e entre uma fita e um substrato magnético mole.

## 5.6 SIMULAÇÕES

O software FEMM, versão 4.2, permite calcular campos em duas dimensões. As análises realizadas envolveram densidades de fluxo magnético na seção central

dos materiais, normal ao comprimento. As densidades de fluxo no sentido da largura das fitas, processos de magnetização e a interação entre momentos magnéticos não puderam ser avaliadas.

Nas simulações, as diferenças entre as densidades de fluxo magnético na região central de uma fita Metglas 2826MB3 foram avaliadas para diferentes condições, que visam reproduzir os experimentos realizados neste trabalho. A fita foi avaliada juntamente a outra fita idêntica e juntamente a um material magnético mole, aço 1010.

O objetivo de se avaliar a densidade de fluxo magnético juntamente a outra fita idêntica é de simular o ocorrido em um teste de deformação, onde um campo de bias é aplicado sobre o conjunto ressonador e transdutor. A maneira encontrada para simular o efeito da magnetização do transdutor, ocorrida durante um processo de deformação, foi a atribuição de uma magnetização unidirecional ao longo da fita que representa este componente na simulação.

Primeiramente avaliou-se as densidades de fluxo magnético nas duas fitas de Metglas 2826MB3 idênticas ( $\mu_r$  de 3500 e  $M_s$  de 0,88 T), posicionadas uma sobre a outra e separadas por uma distância de 0,1 mm. O campo de bias escolhido possuía um valor de  $\sim 1,5$  Oe, suficiente para determinar um ponto de operação antes do vale da curva  $\Delta E$  de uma fita Metglas tratada termomagneticamente. Nas simulações, para a geração do campo de bias, as bobinas de Helmholtz utilizadas nos experimentos reais foram reproduzidas. A Figura 54 apresenta a densidade de fluxo magnético através da região central da fita que representa o ressonador. Neste caso, o transdutor se encontra nas mesmas condições que o ressonador, possuindo uma densidade de fluxo magnético idêntica.

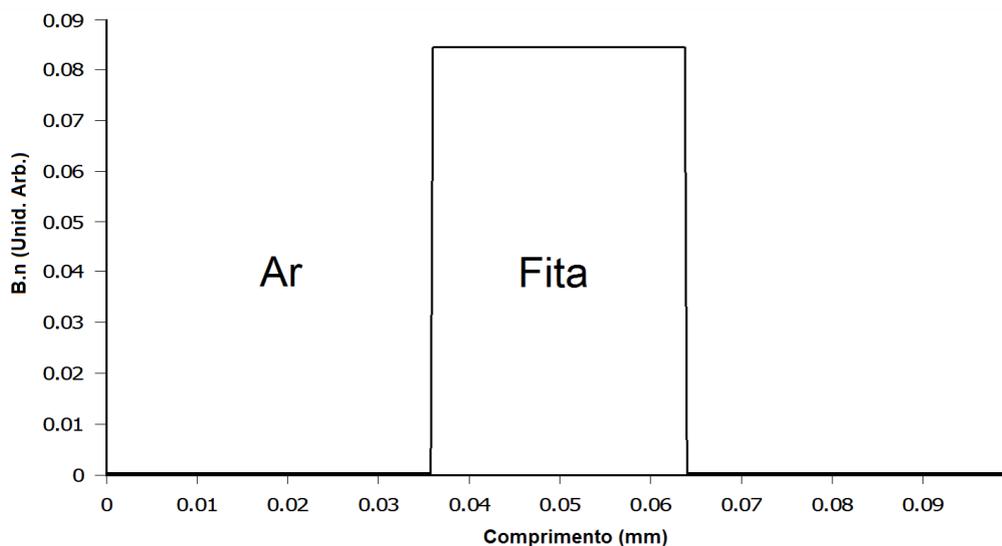


Figura 54. Simulação de densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 sobre transdutor idêntico ao ressonador. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe.

Para simular o processo de tração, uma magnetização foi atribuída à fita transdutora. É possível observar uma diminuição na densidade de fluxo através da região central da fita ressonadora, Figura 55.

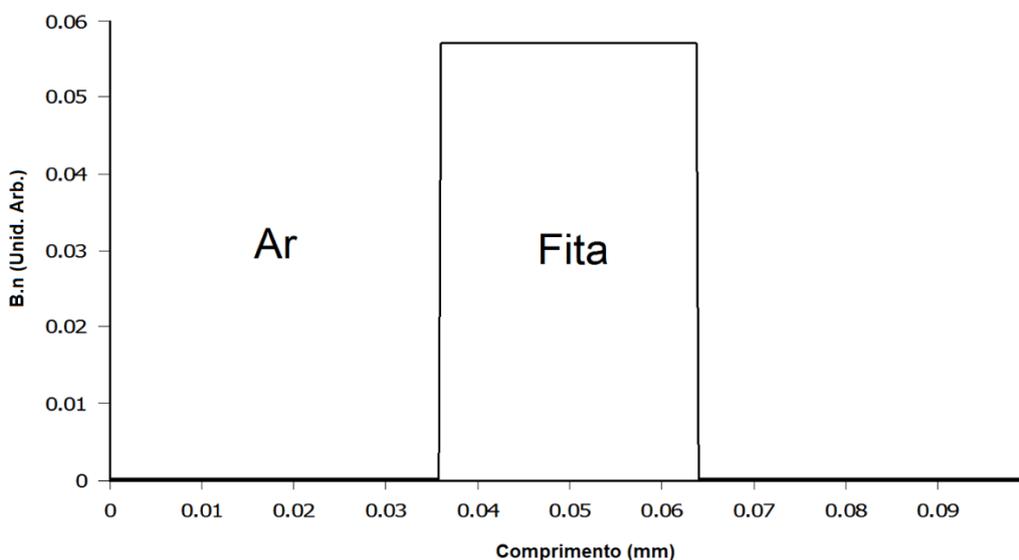


Figura 55. Simulação de densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 sobre transdutor magnetizado. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe.

Foi constatado que, quando uma magnetização é atribuída ao transdutor, a densidade de fluxo magnético na região central do ressonador diminui de acordo com

a intensidade desta magnetização. Outra observação realizada através das simulações é que, se o transdutor apresenta sua permeabilidade aumentada (fato esperado de um material com magnetostricção positiva sob tração) a densidade de fluxo sobre o ressonador também diminui. Isto corrobora as hipóteses sugeridas na seção dos testes de tração.

As simulações realizadas com o ressonador sobre substratos de aço 1010 com três diferentes dimensões estão apresentadas nas figuras a seguir.

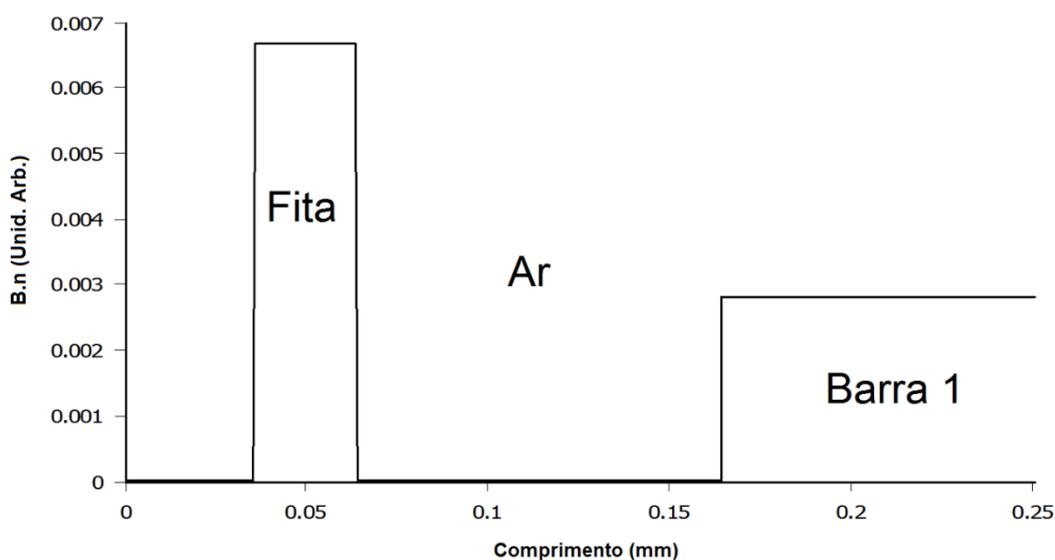


Figura 56. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 1 de aço 1010. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe.

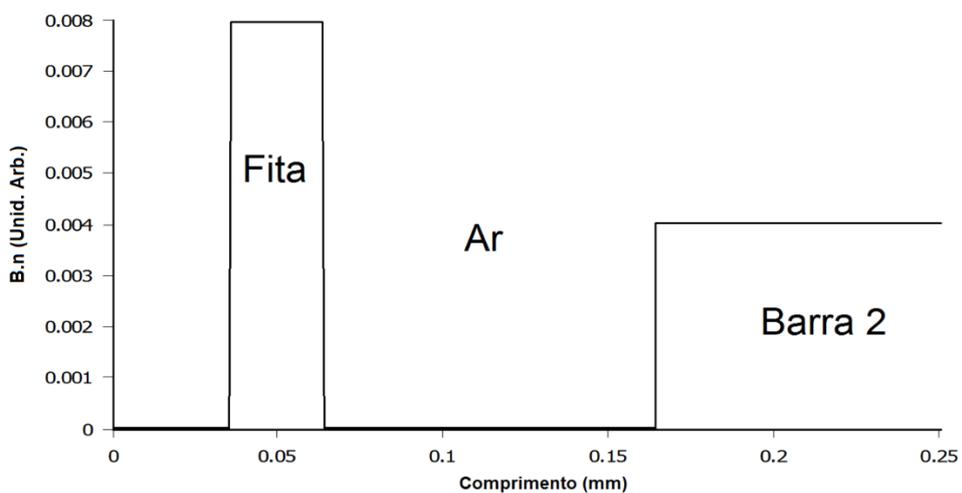


Figura 57. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 2 de aço 1010. Campo aplicado de ~ 1,5 Oe.

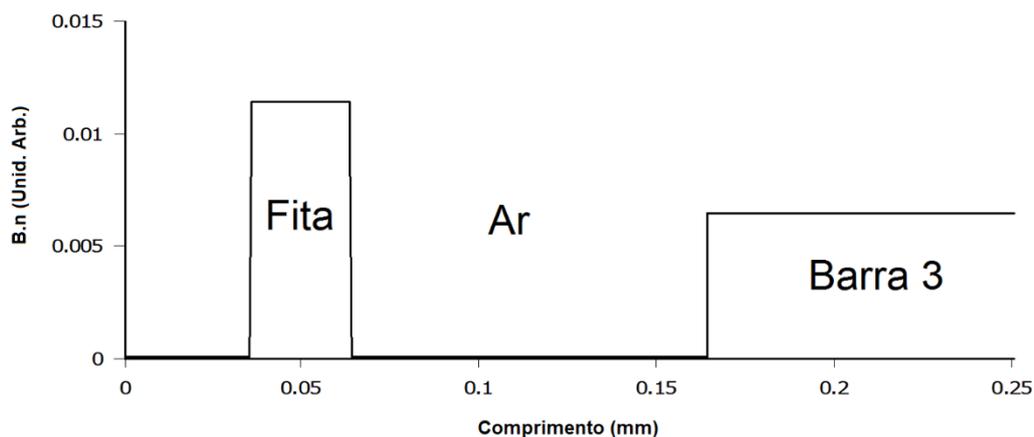


Figura 58. Simulação da densidade de fluxo magnético para região central de um ressonador de Metglas 2826MB3 e do substrato 3 de aço 1010. Campo aplicado de  $\sim 1,5$  Oe.

Como visto através dos testes realizados em laboratório, quando o ressonador se encontrava sobre o substrato de maior tamanho (3), o vale de sua curva  $\Delta E$  apresentava valor de campo menos elevado. Isto está de acordo com o observado na simulação, pois a densidade de fluxo magnético é maior para ambos ressonador e substrato de maior tamanho. Este fato também pode estar relacionado às dimensões das bobinas de Helmholtz, onde o substrato de maior tamanho apresentava seu comprimento muito próximo à distância de separação entre as bobinas, o que pode ocasionar um fluxo magnético não constante sobre o mesmo.

## 5.7 TRABALHOS PUBLICADOS PELO GRUPO

Este trabalho de mestrado originou dois trabalhos publicados pelo grupo do laboratório LCM. Um artigo intitulado “Enhanced response from field-annealed magnetoelastic strain sensor” no Journal of Applied Physics, DOI: 10.1063/1.4960687 [52]. A seguir está apresentada a primeira página do artigo publicado. Também foi publicada uma patente intitulada “Método de tratamento termomagnético em fita amorfa e sistema de detecção de deformação em substrato”, número BR 10 2016 017237 3 [53]. A patente conta com a colaboração dos inventores Alessandro Dalponte, Eduardo S. Bastos e Frank Patrick Missell.



## Enhanced response from field-annealed magnetoelastic strain sensor

Alessandro Dalponte, Eduardo S. Bastos, and Frank P. Missell

*Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, RS 95070-560, Brazil*

(Received 13 June 2016; accepted 28 July 2016; published online 10 August 2016)

Magnetoelastic materials permit the development of remote-query strain sensors for use in situations of difficult access. In this work, we examined materials for a remote-query strain sensor based on the  $\Delta E$  effect. An applied stress modifies the magnetic field produced by a transducer glued to the sample and thereby changes the resonant frequency of a vibrating amorphous ribbon. We considered several amorphous alloys for both the vibrating ribbon and the transducer. To eliminate the casting stress and improve the anisotropy, ribbons were annealed in a transverse magnetic field. This resulted in a dramatic improvement in the sensor performance when sensors were biased above the anisotropy field. For example, a Metglas 2826MB3 ribbon with resonant frequency of 62 kHz showed frequency shifts of up to 5 kHz for a deformation of 0.03%. These results are in good agreement with models for the  $\Delta E$  effect. *Published by AIP Publishing.* [<http://dx.doi.org/10.1063/1.4960687>]

### I. INTRODUCTION

Amorphous metals have been shown to have magnetomechanical properties which are superior to those of any other magnetic materials. For this reason, they have been used in a large number of sensor and transducer applications.<sup>1–3</sup> Not only do these materials have large magnetomechanical coupling factors  $k$  but they also lend themselves to the construction of sensors which may be queried remotely,<sup>4,5</sup> without the necessity of electrical wiring. In their review papers, Grimes *et al.*<sup>4,5</sup> have described many sensors for environmental control. However, this paper will deal only with magnetoelastic strain sensors based on the  $\Delta E$  effect.<sup>3</sup> Other magnetic sensors for measurement of both applied and residual stress have been discussed elsewhere.<sup>6–10</sup> The use of magnetoelastic sensors for measuring strain (see Figure 1 below) has been the subject of at least two patents.<sup>11–13</sup> These sensors could be useful in situations of difficult access, where it is not convenient to have to deal with electrical connections.

In the figure below, a transducer consisting of an amorphous strip (2) is shown glued to an object (1) subject to stress. The constant external magnetic bias field  $H_0$  determines the operating point on the  $\Delta E$  curve of a resonator made from another amorphous strip (3). The resonator vibrates freely in the presence of a magnetic field produced by an external source and the transducer. In an application, the external source might be a permanent magnet. In our experiment, this field was produced by a Helmholtz coil to facilitate the choice of the bias field. When the object is strained, the transducer will also be deformed, leading to a change in its magnetic properties, and therefore, a variation in the magnetic field  $H$  at the resonator. Due to the strong  $\Delta E$  effect,<sup>3</sup> the magnetic field variation changes the resonant frequency of the resonator. Some different resonator materials have been studied for these sensors.<sup>13</sup> However, the magnetic field annealed materials, which we report here, substantially increase the sensor response.

### II. EXPERIMENT

In order to optimize the sensor, a series of experiments were carried out to determine the materials which would be

most suitable for use in the sensor. The materials studied were mostly commercial alloys and their commercial designations are used in the present work. Thus four ribbon compositions were investigated in this work: (1) Metglas 2826MB3 (Metglas Co.), (2) Vitrovac 7600 (Vacuumschmelze), (3) a commercial EAS—electronic article surveillance tag from the local supermarket, and (4) 1K501 (Beijing Yeke Nano Tech). Magnetization curves of as-cast ribbons showed rounding near the anisotropy field, indicative of casting stress. For this reason, the amorphous ribbons were annealed in a transverse magnetic field in the plane of the ribbon. A magnetic field of about 500 Oe was applied using NdFeB magnets outside the small home-made furnace. For the most part, the ribbons were annealed in air (pressure 1 Torr) for 30 min around 315 °C, although other times and temperatures were investigated.

Figure 2 shows the resonant frequency of two ribbon compositions, Metglas 2628MB3 and Vitrovac 7600, before and after annealing, as a function of the DC magnetic bias field. The frequency minimum is a manifestation of the  $\Delta E$  effect and, after annealing, has not only become more pronounced but has also become asymmetric. The asymmetry is due to a sharp decrease in the susceptibility as  $H$  reaches the anisotropy field  $H_A$  and is in agreement with the predictions of models.<sup>3,14,15</sup> It is interesting to note in Figure 2 that annealing reduces the anisotropy field of Metglas 2826 MB3 while it increases that of Vitrovac 7600.

All ribbon compositions were submitted to the same annealing procedure described above. The frequency minimum associated with the  $\Delta E$  effect can be characterized by the frequency difference  $\Delta f$  between zero field and the field corresponding to the lowest point on the curve, which we designate as  $H_A$ , since it is close to the anisotropy field. The values for the different ribbons are given in Table I.

The annealing treatment had very little effect on the  $\Delta f$  curve of the EAS tag, presumably because this material had already undergone some kind of anneal to align its domains perpendicular to the ribbon axis. Its  $\Delta f$  curve did not present the marked asymmetry seen in Figure 2. The annealing deepened the  $\Delta f$  curve minimum of the Beijing 1K501 material, but did not result in a visible asymmetry.

## 6 CONCLUSÕES

Um forno para realização de tratamentos termomagnéticos para indução de anisotropia transversal em fitas magnéticas foi construído em laboratório. O forno é capaz de aplicar um campo de  $\sim 500$  Oe e realizar tratamentos em temperaturas de até  $350^{\circ}\text{C}$ , se demonstrando eficiente na melhoria das propriedades magnéticas das fitas amorfas tratadas.

Uma bancada para aplicação de tensão em substratos de latão foi construída em laboratório. Através da bancada foi possível obter bons resultados nos testes com os ressonadores e transdutores avaliados.

Os tratamentos termomagnéticos tornaram as curvas  $\Delta E$  das fitas amorfas mais profundas e assimétricas. As curvas de magnetização apresentaram um aumento de sua linearidade, com susceptibilidade magnética constante até o ponto da saturação. As formas de ambas as curvas se tornaram mais próximas às descritas pelo modelo teórico de materiais amorfos com anisotropia magnética transversal.

Os tratamentos realizados nas temperaturas de  $315$  e  $350^{\circ}\text{C}$ , por 30 minutos, resultaram nas curvas  $\Delta E$  mais assimétricas e profundas nas quatro principais ligas, Metglas 2826MB3, Yeke 1k501, Yeke 1k501a e Vitrovac 7600.

Os testes de tração realizados com o par ressonador e transdutor, ambos tratados termomagneticamente, apresentaram melhorias relevantes quando comparados aos materiais não tratados. Isto indica que os tratamentos aumentam a sensibilidade dos sensores magnetostrictivos de deformação.

O par ressonador e transdutor composto por fitas de Metglas 2826MB3 apresentou as maiores variações de frequência de ressonância dentre os testes de deformação realizados,  $-5,35$  kHz para aproximadamente 260 ppm.

As medidas das curvas  $\Delta E$ , para o material Metglas 2826MB3 tratado, sobre os substratos de aço 1010, demonstraram que as curvas ainda são detectáveis, porém, sofrem alteração devido às interações magnéticas com o substrato. São dependentes do estado magnético do substrato. A bancada de tração não é adequada para a realização dos testes com as tiras de aço.

As simulações realizadas indicam que a magnetização do transdutor e o aumento de sua permeabilidade resultam na diminuição do fluxo magnético através do ressonador quando sob um campo de bias. Este resultado corrobora as hipóteses sugeridas através da observação dos resultados obtidos e das teorias avaliadas.

As interações entre ressonador e transdutor, e ressonador e substrato magnético mole, ainda devem ser melhor estudadas para uma compreensão completa dos fenômenos que ocorrem em um sensor magnetostrictivo de deformação.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Aprimorar o forno para tratamentos termomagnéticos, implantando um sistema com menos peças móveis para garantir maior reprodutibilidade nos tratamentos;

Aprimorar sistema para cortar e dimensionar as fitas;

Realizar mais tratamentos térmicos durante diferentes períodos de tempo com os outros materiais;

Realizar análises de difração de raios-X para verificar se as fitas adquiriram alguma cristalinidade durante os tratamentos realizados;

Aprimorar sistema de tração, para tracionar peças com maior seção transversal e maior módulo de elasticidade, ideal para simular a aplicação do sensor em *risers*;

Avaliar a orientação dos momentos magnéticos antes e após os tratamentos, através das técnicas de microscopia por efeito Kerr e microscopia por força magnética (MFM), para melhor observar sua influência sobre a anisotropia magnética dos materiais tratados;

Medir curvas de magnetização para os transdutores, após colagem, sob diferentes condições de tensão (compressão, tração e torção), para melhor compreender seu comportamento e estado magnético durante quando atuando no sensor de deformação;

Realizar simulações mais completas com um software mais aprimorado.

## **8 AGRADECIMENTOS**

CNPq edital Universal 2014 – “Sensores magnetoelásticos para monitoramento de propriedades físicas, químicas e biológicas” – Projeto 447777/2014-9.

## 9 REFERÊNCIAS

- [1] 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**. v. 66, p. 67-71, 2014.
- [2] TORMES, C. D. **ESTUDO DE SECAGEM DE ARGILA UTILIZANDO UM SENSOR MAGNETOELÁSTICO**. 2014. 113 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2014.
- [3] POSSAN, A. L. **BIOSENSOR MAGNETOELÁSTICO PARA A DETECÇÃO DE *Escherichia Coli***. 2015. 105 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2015.
- [4] BELTRAMI, M. **DESENVOLVIMENTO E CONSTRUÇÃO DE SENSOR MAGNETOELÁSTICO DE pH E COM ELETRÔNICA PORTÁTIL**. 2016. 125 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Centro de Ciências Exatas e Tecnologias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.
- [5] POZZA, M. D. **AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES TIÓIS NO DESEMPENHO DE BIOSSENSORES MAGNETOELÁSTICOS PARA DETECÇÃO DE *Escherichia Coli***. 2016, 91 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos e Tecnologias) – Centro de Ciências Exatas e da Tecnologia, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2016.
- [6] MENTI, C., HENRIQUES, J. A. P., MISSELL, F. P., ROESCH-ELY, M. Antibody-based magneto-elastic biosensor: potential devices for detection of pathogens and associated toxins. **Applied Microbiology and Biotechnology**. v. 100, p. 6149-6163, 2016.
- [7] POSSAN, A. L., MENTI, C., BELTRAMI, M., SANTOS, A. D., ROESCH-ELY, M., MISSELL, F. P. Effect of surface roughness on performance of magnetoelastic biosensor for the detection of *Escherichia Coli*. **Material Science and Engineering C**. v. 58, p. 541-547, 2016.

- [8] MENTI, C., BELTRAMI, M., POSSAN, A. L., MARTINS, S. T., HENRIQUES, J. A. P., SANTOS A. D., MISSELL, F. P., ROESCH-ELY, M. Biocompatibility and degradation of gold-covered magneto-elastic biosensors exposed to cell culture. **Colloids and Surfaces B: Biointerfaces**. v. 143, p. 111-117, 2016.
- [9] Caroline Menti, Frank Patrick Missell, Mateus Beltrami, Sandro Tomaz Martins, Mariana Roesch-Ely, João Antonio Pegas Henriques, Marcia Dalla Pozza, “Método e sistema de detecção de analíto”, BR 10 2016 009471, INPI, Abril 28, 2016.
- [10] GRIMES, C. A., MUNGLE, C. S., ZENG, K., JAIN, M. K., DRESCHER, W. R., PAULOSE, M., ONG, K. G. Wireless Magnetoelastic Resonance Sensors: A Critical Review. **Sensors**. v. 2, p. 294-313, 2002.
- [11] Technip. Disponível em <<http://www.technip.com/en/our-business/subsea/flexible-pipe>>. Acesso em 07/04/2016.
- [12] GRIMES, C. A., ROY, S. C., RANI, S., CAI, Q. Theory, Instrumentation and Applications of Magnetoelastic Resonance Sensors: A Review. **Sensors**. v. 11, p. 2809-2844, 2011.
- [13] HERZER, G. Magnetic materials for electronic article surveillance. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. p. 598-602, 2003.
- [14] LIVINGSTONE, J. D. Magnetomechanical Properties of Amorphous Metals. **physica status solidi (a)**. v. 70, p. 591, 1982.
- [15] O'HANDLEY, R. C. **Modern Magnetic Materials Principles and Applications**. John Wiley & Sons, 1942.
- [16] KOUZOUNDIS, D., NIKOLAKIS, V. The use of a non-linear model for a more realistic calculation of the “ $\Delta E$  effect” in magnetoelastic ribbons. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. v. 395, p. 59-66, 2015.
- [17] LACHEISSERIE, É. T., GIGNOUX, D., SCHLENKER, M. **Magnetism: Materials and Applications**. Springer Science and Business Media, 2005.
- [18] 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**. v. 8, p. 639-646, 1999.

- [19] Hasegawa, R. Applications of amorphous magnetic alloys in electronic devices. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 287, p. 405-412, 2001.
- [20] HUBER, T., BERGMAIR, B., VOGLER, C., BRUCKNER, F., HRKAC, G., SUESS, D. Magnetoelastic resonance sensors for remote strain measurements. **APPLIED PHYSICS LETTERS**. v. 101, 2012.
- [21] CHIKAZUMI, S., CHARAP, S. H. **Physics on Magnetism**. ROBERT E. John Wiley & Sons, 1986.
- [22] SAVAGE, H. T., SPANO, M. L. Theory and application of highly magnetoelastic Metglas 2605SC. **Journal of Applied Physics**. v. 53, p. 8092, 1982.
- [23] SPANO, M. L., HATHAWAY, K. B., SAVAGE, H. T. Magnetostriction and magnetic anisotropy of field annealed Metglas\* 2605SC alloys via dc M-H loop measurements under stress. **Journal of Applied Physics**. v. 53, p. 2667, 1982.
- [24] WUN-FOGLE, M., SAVAGE, H. T., CLARK, A. E. SENSITIVE, WIDE FREQUENCY RANGE MAGNETOSTRICTIVE STRAIN GAGE. **Sensors and Actuators**. v. 12, p. 323-331, 1987.
- [25] Dieter Suess, "Wireless sensor for measuring stress", US Patent 2011/0232392 A1, Sept. 29, 2011.
- [26] SUESS, D., SCHREFL, T., BERGMAIR, B., GRÖSSINGER, R., FIDLER, J., TSCHEGG, E. Wireless Passive magneto/acoustic strain sensors. In: InterMag, 2009, Sacramento, California.
- [27] LEVY, R. A., HASEGAWA, R. **Amorphous Magnetism II**. Plenum Press, 1977.
- [28] BYDZOVSKY, J., KRAUS, L., SVEC, P., PASQUALE, M., KOLLAR, M. Strain sensor based on stressed-annealed  $\text{Co}_{69}\text{Fe}_2\text{Cr}_7\text{Si}_8\text{B}_{14}$  amorphous ribbons. **Sensors and Actuators A**. v. 110, p. 82-86, 2004.
- [29] ONG, K. G., GRIMES, C. A. Tracking the harmonic response of magnetically-soft sensors for wireless temperature, stress, and corrosive monitoring. **Sensors and Actuators A**. v. 101, p. 49-61, 2002.
- [30] Metglas. Disponível em [http://www.metglas.com/products/magnetic\\_materials/](http://www.metglas.com/products/magnetic_materials/). Acesso em 15/10/2015.

- [31] Beijing Yeke. Disponível em [http://en.cnyeke.com/\\_d276706673.htm](http://en.cnyeke.com/_d276706673.htm). Acesso em 10/12/2015.
- [32] Vacuumschmelze. Disponível em <http://www.vacuumschmelze.com/>. Acesso em 21/11/2015.
- [33] COEY, J. D. **Magnetism and Magnetic Materials**. Cambridge University Press, 2009.
- [34] CULLITY, B. D., GRAHAM, C. D. **Introduction to Magnetic Materials**. John Willey & Sons, 2009.
- [35] SQUIRE, P. T. PHENOMENOLOGICAL MODEL FOR MAGNETIZATION, MAGNETOSTRICTION AND  $\Delta E$  EFFECT IN FIELD-ANNEALED AMORPHOUS RIBBONS. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. v. 87, p. 299-310, 1990.
- [36] BERTOTTI, G. **Hysteresis in Magnetism**. Academic Press, 1998.
- [37] LUBORSKY, F. E., BECKER, J. J., MCCARY, R. O. Magnetic Annealing of Amorphous Alloys. **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**. v. 11, n. 6, 1975.
- [38] TSAI, H. Y, LIN, R. S., CHEN, J. S., CHUNG, C. T., SHEU, Y. H. Design of a non-contact strain sensor based on amorphous ribbons. **Sensors and Actuators A**. v. 199, p. 37-42, 2013.
- [39] WICHMAN, H. J., HOLST, A., BUDELMANN, H. Magnetoelastic stress measurements and material defect detection in prestressed tendons using coil sensors. **Non-Destructive Testing in Civil Engineering**. 2009.
- [40] BERGMAIR, B. HUBER, T., BRUCKNER, F., VOGLER, C., FUGER, M., SUESS, D. Fully coupled, dynamic model of a magnetostrictive amorphous ribbon and its validation. **Journal of Applied Physics**. v. 115, 2014.
- [41] MCCURRIE, R. A. **FERROMAGNETIC MATERIALS Structure and Properties**. Academic Press, 1994.
- [42] LIANG, C., MORSHED, S., PROROK, B. C. Correction for longitudinal mode vibration in thin slender beams. **Applied Physics Letters**. v. 90, 2007.

- [43] SANG, S., CHENG, P., ZHANG, W., LI, P., HU, J., LI, G., JIAN, A. Investigation of a new  $\text{Fe}_{83}\text{Ga}_{17}$  wire-based magnetoelastic resonance biosensor. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 26, p. 980-987, 2015.
- [44] MUNGLE, C., GRIMES, C. A., DRESCHER, W. R. Magnetic field tuning of the frequency-temperature response of a magnetoelastic sensor. **Sensors and Actuators A**. v. 101, p. 143-149, 2002.
- [45] MITCHELL, E. E., DEMOYER, R., VRANISH, J. A New Metglas Sensor. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS**. v. 33, n. 2, 1986.
- [46] GUTIERREZ, J., MUTO, V., SQUIRE, P. T. Induced anisotropy and magnetoelastic properties in Fe-rich metallic glasses. **Journal of Non-Crystalline Solids**. v. 287, p. 417-420, 2001.
- [47] SQUIRE, P. T. Magnetomechanical measurements and their application to soft magnetic materials. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. v. 160, p. 11-16, 1996.
- [48] NIELSEN, O. V., NIELSEN, H. J. V. STRAIN- AND FIELD-INDUCED MAGNETIC ANISOTROPY IN METALLIC GLASSES WITH POSITIVE OR NEGATIVE  $\lambda_s$ . **Solid State Communications**. v. 35, p. 281-284, 1980.
- [49] BERRY, B. S., PRITCHET W. C. Magnetic Annealing and Directional Ordering of an Amorphous Ferromagnetic Alloy. **PHYSICAL REVIEW LETTERS**. v. 34, n. 16, 1975.
- [50] KIM, M. H., LEE, K. S., LIM, S. H. Magnetostriction measurements of metallic glass ribbon by fiber-optic Mach-Zehnder interferometry. **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**. v. 191, p. 107-112, 1999.
- [51] OHNUMA, M., HERZER, G., KOZIKOWSKI, P., POLAK, C., BUDINSKY, V., KOPPOJU, S. Structural anisotropy of amorphous alloys with creep-induced magnetic anisotropy. **Acta Materialia**. v. 60, p. 1278-1286, 2012.
- [52] DALPONTE, A., BASTOS, E. S., MISSELL, F. P. Enhanced response from field-annealed magnetoelastic strain sensor. **Journal of Applied Physics**. v. 120, p. 064502, 2016.

[53] Alessandro Dalponte, Eduardo Stimamiglio Bastos, Frank Patrick Missell, “Método de tratamento termomagnético em fita amorfa e sistema de detecção de deformação em substrato”, BR 10 2016 017237 3, INPI, Julho 25, 2016.