**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE LORENA**

MATEUS BOTANI DE SOUZA DIAS

**Construção de um transdutor quase-estático de tensão mecânica em
propriedades magnéticas, aplicado à liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$.**

Lorena – SP

2014

MATEUS BOTANI DE SOUZA DIAS

**Construção de um transdutor quase-estático de tensão mecânica em
propriedades magnéticas, aplicado à liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$.**

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de Lorena da Universidade de São Paulo para a
obtenção do título de Mestre em Ciências do
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Materiais, na área de Concentração: Materiais
Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos.

Orientadora: Prof^a. Dra. Cristina Bormio Nunes

Edição reimpressa e corrigida

Lorena - SP

Junho, 2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha Catalográfica

Elaborada pela Biblioteca Especializada em Engenharia de Materiais
USP/EEL

Dias, Mateus Botani de Souza

Construção de um transdutor quase-estático de tensão mecânica em propriedades magnéticas, magnetização e magnetostricção, aplicado à liga $(\text{Fe}_{0.8}\text{Al}_{0.2})_{98}\text{B}_2$ /Mateus Botani de Souza Dias.—ed. Reimp., corr.—2014.

100 f.: il.

Dissertação Mestre em Ciências – Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais. Área de Concentração: Materiais Metálicos, Cerâmicos e Poliméricos) – Escola de Engenharia de Lorena - Universidade de São Paulo, 2014.

Orientador: Cristina Bórmio Nunes

1. Magnetostricção 2. FeAlB 3. Transdutor 4. GALFENOL
I. Título.

CDU 537.6

Dedico este trabalho para a Vó Carmela e para o Vô Nelson

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu pai (Carlos Alberto L. de S. Dias) e minha mãe (Mirna Botani L. de S. D.) por todos os abraços (de recepção e despedida). Eles me fizeram perceber que não importa quanto tempo eu esteja navegando em mar aberto, sempre terei um porto seguro para retornar. Em especial, agradeço ao meu irmão (Artur B. de S. Dias) por todas as noites que passamos na "velocidade e agressão", por nos tornarmos "caras que não dormem desde o natal" e que "tem permissão executiva" ("be ready to piau!").

Agradeço a minha namorada (Andressa M. Scalco) por todas as risadas e bons momentos que passamos. Sinto-me confiante e seguro com ela, pois nossas conversas diárias são como um navio resistente e veloz, que me permite navegar bem sobre calmarias e tempestades. Além disso, os melhores lanches são feitos com bastante requieirão e amor.

Agradeço a minha orientadora (Cristina Bormio Nunes) pela oportunidade deste mestrado. A sincronicidade dos eventos desse trabalho mostra como as coisas não são ao acaso, já que fui resgatado do ponto de carona pelo galeão da minha orientadora, garantindo assim o meu próprio navio.

Agradeço aos meus velhos amigos (Bruno S. de Lima, Mariane Capellari e Matheus Martini) pelo companheirismo, que nossa amizade continue a crescer.

Agradeço também aos meus amigos Erlon Z. Santos e Marcela Gobo por todos os roles lost que fizemos. Eu sei que meu barco se distanciou, mas saibam que vocês estão guardados dentro do meu peito e não esquecerei os bons momentos que passamos.

Agradeço aos meus amigos de república (Rep. Kanganda's) pela convivência diária, foram como outros barcos que enfrentavam os mesmos monstros e ondas do mar. Em especial, gostaria de agradecer ao capitão Guilherme Fulop pela grande amizade que criamos, sendo considerado um irmão por mim. Além disso, não podemos esquecer a viagem aos confins de Bonito.

Agradeço à oficina do DEMAR pela agilidade e competência na confecção das muitas peças que precisei.

Agradeço a empresa TRANSFORMADORES JUNDIAÍ, pelo fornecimento das chapas de ferro-silício (por intermédio do professor Carlos Baldan).

Agradeço a FAPESP (projeto FAPESP 2011/21258-0) e a CNPq (projeto Universal 2010) pelo suporte financeiro dado a este projeto e agradeço a CAPES pela bolsa de mestrado concedida a mim.

"Mar calmo nunca fez bom marinheiro"

Provérbio inglês

RESUMO

DIAS, M. B. de S. **Construção de um transdutor quase-estático de tensão mecânica em propriedades magnéticas, aplicado à liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$** . 2014. 100p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

No presente trabalho, foi construído um transdutor para medir as variações da indução magnética (B) e magnetostricção (λ) de materiais ferromagnéticos macios em função de campo magnético aplicado (H) (voltagem V) e tensões mecânicas (σ). O transdutor possui duas bobinas de excitação ligadas a uma fonte de corrente/voltagem (para aplicar o campo magnético no elemento magnetostrictivo) e um núcleo magnético, para concentrar o fluxo magnético no material ferromagnético. A magnetostricção é medida por extensometria, a tensão mecânica é aplicada por uma máquina de ensaios universal (EMIC), a indução magnética é medida utilizando uma bobina de captura conectada a um fluxímetro e a aquisição dos dados foi realizada por um programa em Labview. O sistema mede curvas de M vs V e λ vs V para σ constante e também M vs σ e λ vs σ para V constante. A partir dessas curvas, é possível adquirir a sensibilidade do material e analisar a sua viabilidade em aplicações como sensores e atuadores. Utilizando este transdutor, foi possível caracterizar uma liga de FeAlB e comparar com uma amostra de GALFENOL, que é o material mais usado desta classe. As ligas apresentam sensibilidades (acima de 10 MPa) da ordem de 0,020 T/MPa para o GALFENOL e 0,012 T/MPa para a liga de FeAlB. Considerando que a liga de FeAlB não apresenta a melhor composição química, há muitas coisas para estudar ainda, como diferentes composições químicas e o processamento adequado para obter a textura desejada.

Palavras-chave: Magnetostricção. ligas de FeAlB. Transdutor, GALFENOL.

ABSTRACT

DIAS, M. B. de S. **Construction of a quasi static transducer of mechanical load at magnetic properties, applied on $(\text{Fe}_{0.8}\text{Al}_{0.2})_{98}\text{B}_2$ alloy.** 2014. 100p. Dissertation (Master of Science) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

In the present research, a transducer was built to measure the changes of magnetic induction (B) and magnetostriction (λ) for soft ferromagnetic materials in function of applied magnetic field (H) (voltage V) and mechanical stress (σ). The transducer comprises two excitation coils connected at a current/voltage supply (to apply the magnetic field in the magnetostrictive element) and a magnetic core, to concentrate the magnetic flux in the ferromagnetic material. The magnetostriction is measured by strain gauges, the mechanical stress is applied by a material test system (EMIC), the magnetic induction is measured using a pick-up coil connected to a fluxmeter and the acquisition of the data was measured by a Labview software. These systems measure the curve B vs. V and λ vs. V for constant σ and B vs. σ e λ vs. σ for constant V. From this curves, it is possible to acquire the material's sensibility and analyse the feasibility of then in application like sensor and actuators. Using this transducer, it was possible to characterize a FeAlB alloy and to compare it with a GALFENOL sample, which is the most used material of this class. The alloys show sensibility (up to 10 MPa) about 0,020 T/MPa to the GALFENOL and 0,012 T/MPa to FeAlB alloy. If we consider that the FeAlB alloy does not have the best chemical composition to reach the higher magnetostriction, there is a lot o thing to study, like different composition and the appropriate processing to obtain the desired texture.

Keywords: Magnetostriction, FeAlB alloys, transducer device, GALFENOL.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Magnetostricção total de ligas de $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{100-x}\text{B}_x$ em função da quantidade de boro x (%) ^[4] .	22
Figura 2 - Deformação causada pela aplicação de um campo magnético (a) e geração de campo magnético causado pela aplicação de uma tensão (b). Adaptada de ^[1] .	24
Figura 3 - Variação da magnetostricção em função da quantidade de gálio no ferro em ligas monocristalinas (GALFENOL). Adaptada de ^[13] .	26
Figura 4 - Em temperatura ambiente, magnetostricção de saturação nas direções cristalográficas [100] e [111], para ligas de Fe-Al, adaptado de ^[16] .	27
Figura 5 - Constante anisotrópica K_1 para ligas de Fe-Al em função da composição da liga, adaptado de ^[17] .	28
Figura 6 - Micrografia das ligas Fe-Al dopadas com diferentes quantidades de boro (0%; 0,5%; 1,0%; 1,5% e 2,0%) ^[19] .	29
Figura 7 - Gráfico de tensão por deformação de ligas com Fe-Ga, Fe-Ga-B e Fe-Ga-Cr. Adaptado de ^[22] .	30
Figura 8 - Magnetostricção em função do campo magnético para amostras de GALFENOL obtidas por várias técnicas. Adaptado de ^[11] .	32
Figura 9 - Curvas de magnetostricção para diferentes orientações cristalográficas. (1) [111], 20 ppm; (2) [110], 30 ppm; (3) [112], 60 ppm; (4) [112] 30 ppm ^[7] .	33
Figura 10 - Curvas de magnetização (a) e susceptibilidade (b) da liga de $\text{Fe}_{81,6}\text{Ga}_{18,4}$, para tensões mecânicas constantes. Adaptado de ^[23] .	34
Figura 11 - Variação da magnetostricção em função do campo aplicado, para diversas tensões aplicadas na liga. Adaptado de ^[2] .	35
Figura 12 - Indução magnética gerada por um campo magnético, para uma amostra monocristalina e solidificada direcionalmente na direção [100] de GALFENOL com 19% de gálio (a) e 24,7% de gálio (b), ambos em porcentagem atômica. Adaptado de ^[24] .	35
Figura 13 - Variação da magnetização em função da tensão, para diversos campos magnéticos aplicados na liga. Adaptado de ^[2] .	37
Figura 14 - Desenho esquemático do funcionamento de um sensor de deformação magnetostrictivo. Adaptado de ^[3] .	38
Figura 15 - Variação da voltagem de detecção em função do número de espiras de detecção e excitação, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018 (frequência de 500 Hz e corrente de 4 mA rms). Adaptado de ^[3] .	39

Figura 16 - Voltagem de detecção em função da frequência de excitação para diversas correntes de excitações, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018. Adaptado de [3].	40
Figura 17 - Voltagem de detecção em função da corrente de excitação para diversas frequências, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018. Adaptado de [3].	41
Figura 18 - Sensibilidade à força para diversas frequência de excitação. Adaptado de [3].	42
Figura 19 - Sensibilidade à força para diferentes correntes de excitação. Adaptado de [3].	42
Figura 20 - Comparação da voltagem de detecção normalizada para um sensor de força magnetostrictivo e para um extensômetro, em função da aplicação da força.	43
Figura 21 - Desenho esquemático da seção axial de uma válvula de injeção de combustível. Adaptado de [25].	44
Figura 22 - Desenho esquemático da seção axial da ponta da válvula de injeção de combustível fechada. Adaptado de [25].	45
Figura 23 - Desenho esquemático da seção axial da ponta da válvula de injeção de combustível aberta. Adaptado de [25].	46
Figura 24 - Desenho esquemático do dispositivo sensorial.	47
Figura 25 - Fotografia das chapas de ferro-silício.	48
Figura 26 - Curva de indução magnética vs. Campo magnético aplicado, para uma chapa de grão orientado de fero-silício e uma frequência de 60 Hz [26].	48
Figura 27 - Fresadora Universal Romi U-30, utilizada na fabricação dos componentes do dispositivo sensorial.	50
Figura 28 - Elemento magnetostrictivo com entalhe.	51
Figura 29 - Bobina de captura e extensômetro colado na barra de GALFENOL.	52
Figura 30 - Ponte de Wheatstone da national instruments (NI 9237).	53
Figura 31 - Fotografia do dispositivo sensorial sem o elemento magnetostrictivo.	56
Figura 32 - Fotografia mostrando o dispositivo antes da montagem do mesmo (figura 30).	57
Figura 33 - Desenho esquemático de metade do núcleo magnético.	57
Figura 34 - Fotografia do núcleo magnético desmontado.	58
Figura 35 - Desenho esquemático do carretel utilizado para as bobinas de excitação.	59
Figura 36 - Fotografia dos carretéis utilizados para as bobinas de excitação.	59
Figura 37 - Fotografia das bobinas de excitação após serem enroladas nos carretéis.	60
Figura 38 - Desenho esquemático das chapas de suporte.	61

Figura 39 - Fotografia das chapas de suporte.....	61
Figura 40 - Programa utilizado na aquisição de dados do fluxímetro (a), da ponte de Wheatstone (b) e da fonte de excitação (c).	62
Figura 41 - Programa utilizado no controle da tensão elétrica nas bobinas de excitação.....	63
Figura 42 - Modelo esquemático de "um quarto de ponte do tipo I", mostrando a localização de cada uma das resistências da ponte. Adaptada de ^[28]	64
Figura 43 - Fotografia dos componentes de "um quarto de ponte do tipo I".	65
Figura 44 - Comparação entre os valores de deformação obtidos por uma MTS e utilizando o extensômetro.	66
Figura 45 - Comparação entre os valores de magnetostricção medidos pela ponte de capacitância e pelo extensômetro.....	67
Figura 46 - Modelo esquemático de "um quarto de ponte do tipo II", mostrando a localização de cada uma das resistências da ponte. Adaptada de ^[28]	68
Figura 47 - Desenho esquemático mostrando a ligação dos fios em "um quarto de ponte do tipo II"	69
Figura 48 - Fotografia dos componentes de "um quarto de ponte do tipo II".	69
Figura 49 - Calibração da magnetostricção de uma amostra de GALFENOL (18,4% de gálio), medida por "um quarto de ponte do tipo II" e utilizando uma ponte de capacitância.	70
Figura 50 - Barra de uma liga de alumínio AA6005 com a bobina de captura.....	71
Figura 51 - Comparação entre o fluxo magnético (fluxímetro) e o campo magnético aplicado (gaussímetro).....	71
Figura 52 - Comparação entre os valores de campo magnético medido pelo fluxímetro e gaussímetro.	72
Figura 53 - Fotografia do dispositivo sensorial completo com a amostra de FeAlB e bobina de captura.	73
Figura 54 - Influência da taxa de crescimento da tensão elétrica na medida da indução magnética, medida pelo fluxímetro.	73
Figura 55 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem e/ou corrente aplicada (campo magnético).	75
Figura 56 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão e para a taxa de incremento de voltagem de 0,2 V/s.	76
Figura 57 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).....	77
Figura 58 - Magnetostricção da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 0,2 V/s).....	78

Figura 59 - Magnetostricção da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).....	79
Figura 60 - Indução magnética em função da tensão de compressão, para diferentes voltagens (correntes; campo magnético) nas bobinas de excitação.....	81
Figura 61 - Sensibilidade da liga de FeAlB para diferentes voltagens de excitação (campos magnéticos).....	82
Figura 62 - Magnetostricção do GALFENOL em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).....	83
Figura 63 - Indução magnética do GALFENOL em função da voltagem (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).....	84
Figura 64 - Comparação entre a magnetostricção do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão.	85
Figura 65 - Comparação entre a indução magnética do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão.	86
Figura 66 - Comparação da variação da indução magnética pela compressão, do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão..	87
Figura 67 - Comparação da sensibilidade do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão.	87
Figura 68 - Desenho em 3 dimensões utilizado para a simulação computacional utilizando o software Comsol. Considerou-se as bobinas (a) de cobre, o núcleo magnético (b) e o elemento magnetostrictivo (c) de ferro puro e a atmosfera de (d) de ar.....	90
Figura 69 - Malha fina utilizada na simulação computacional.	90
Figura 70 - Mapeamento magnético indicando a densidade de fluxo (t) no circuito magnético.....	91
Figura 71 - Diagrama de fluxo do programa mostrado na figura 39.....	97
Figura 72 - Diagramas de fluxo referentes à aquisição (a), organização (b) e exibição (c) dos dados. O diagrama mostrado em (d) foi utilizado para apagar os gráficos entre os ensaios quase estáticos.....	98
Figura 73 - Diagrama de fluxo referente ao cálculo do tempo de subida até a voltagem máxima e de descida até a da voltagem final.	99
Figura 74 - Diagrama de fluxo que envia o valor da tensão elétrica desejada para a fonte de corrente.....	99
Figura 75 - Diagrama de fluxo que controla a subida da tensão elétrica nas bobinas de excitação.....	100
Figura 76 - Diagrama de fluxo que controla a descida da tensão elétrica nas bobinas de excitação.....	100

LISTA DAS TABELAS

Tabela 1 - Magnetostricção para vários valores de tensão de compressão para a liga de FeAlB na região de saturação.....	80
Tabela 2 - Magnetostricção para vários valores de tensão de compressão para a liga de GALFENOL na região de saturação.	84

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS	21
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	24
2.1 Magnetostricção.....	24
2.2 Liga contendo ferro e alumínio	27
2.3 Efeito da orientação cristalográfica na magnetostricção.....	31
2.4 Efeito da aplicação de tensão sobre a magnetostricção.....	33
2.5 Transdutor de tensão em sinal magnético/elétrico.....	37
2.6 Sensibilidade do transdutor	41
2.7 Um exemplo de aplicação de um material magnetostrictivo	43
3. MATERIAIS E MÉTODOS	47
3.1 Dispositivo sensorial.....	47
3.2 Aparato experimental para medidas de magnetização e magnetostricção.....	51
3.2.1 Extensômetro (" <i>Strain Gauge</i> ").....	51
3.2.2 Ponte de Wheatstone.....	52
3.2.3 Fluxímetro.....	53
3.2.4 Fontes elétricas e eletroímã.....	54
3.2.5 Gaussímetro.....	54
3.2.6 LabView	54
3.2.7 Máquinas de ensaio	54
3.2.8 Medidas quase estáticas	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
4.1 Componentes do dispositivo sensorial	56
4.2 Calibração.....	64
4.3 Teste quase-estático.....	76
4.4 Aprimoramentos necessários na determinação do campo magnético.....	88
5. PRÓXIMOS PASSOS	92
6. CONCLUSÃO	93
REFERÊNCIAS	94
Apendice A - Programação do Labview	97

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

Sensores são instrumentos capazes de converter propriedades mecânicas, térmicas, magnéticas e etc. em sinais elétricos, quantificando a intensidade dos mesmos. Esse tipo de dispositivo é utilizado em diversos campos, desde áreas aeroespaciais até medicinais ^[1].

Alguns sensores são baseados nos materiais inteligentes (“*smart materials*”), estes sofrem deformações elásticas com as condições do ambiente (temperatura, campo elétrico e campo magnético) e geram um sinal elétrico proporcional à intensidade dos mesmos ^[1].

Em geral, sensores capazes de medir força são construídos a partir de materiais piezoelétricos ou utilizando extensômetros (“*strain gauges*”). Entretanto, existem certas limitações para o uso de ambos, associadas ao desempenho do material piezoelétrico e do material de que é feito o extensômetro ^[2].

O extensômetro possui uma vida bem limitada à fadiga, mesmo à temperatura ambiente, e não apresenta qualquer tipo de proteção externa, não sendo recomendado o seu uso em ambientes severos. Além disso, a superfície para a fixação do extensômetro deve ser bem preparada e limpa, para garantir uma boa aderência e consequentemente, resultados confiáveis ^{[2],[3]}.

Os sensores construídos a partir de materiais piezoelétricos só podem ser utilizados em situações estáticas, pois os materiais piezoelétricos são cerâmicos (sendo extremamente frágeis), o que inviabiliza aplicações que envolvam algum tipo de tensão dinâmica ^{[2],[3]}.

Já os sensores magnetostrictivos são mais robustos mecanicamente e podem ser aplicados em situações estáticas ou dinâmicas, isso se deve ao fato de que muitos dos materiais magnetostrictivos são metálicos, como por exemplo, o GALFENOL ^{[1],[2],[3]}.

Sensores que utilizam materiais magnetostrictivos apresentam uma ampla faixa de aplicações, sendo utilizado em controles de robôs na manufatura de indústrias, controle e monitoramento de vibrações, monitoramento de construções contra eventos sísmicos, sobrecarga nas pontes, suspensões/embreagens de carros, máquinas CNC, atuadores eletro-hidráulicos e magnéticos ^{[2],[3]}.

Dessa forma, é importante estudar novos materiais magnetostrictivos que sejam mais robustos mecanicamente, para que possam ser utilizados em situações onde exista alguma aplicação de força, seja esta constante ou dinâmica.

Atualmente, a classe de ligas sem a presença de elementos terras raras que tem sido mais estudadas são as ligas do sistema Fe-Ga. Esta liga foi denominada de GALFENOL e a composição que apresenta as melhores propriedades magnetostrictivas é próxima de 19% de Ga em porcentagem atômica.

Na mesma linha de interesse do GALFENOL, o nosso grupo levantou os resultados de magnetostricção da liga de FeAlB, mostrando que a mesma também possui potencial para aplicação. A Figura 1 mostra a magnetostricção total para ligas $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{100-x}\text{B}_x$ em função da quantidade de boro x ^[4].

Figura 1 - Magnetostricção total de ligas de $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{100-x}\text{B}_x$ em função da quantidade de boro x (%) ^[4].

O intuito desse trabalho é construir um dispositivo que permita a caracterização de materiais magnetostrictivos em situações quase-estáticas e dinâmicas. Esse dispositivo será usado para caracterizar uma liga de FeAlB e também o GALFENOL.

Até o momento, em nosso grupo, somente era possível a medida de magnetostricção por dilatométrica de capacitância em amostras muito pequenas (menores que 3 mm) e sem a aplicação de esforço mecânico.

A possibilidade de poder caracterizar os materiais magnetostrictivos sobre ação de tensões é essencial para determinar o real potencial dos materiais estudados na fabricação de sensores e consequentemente, possibilita o estudo e construção de dispositivos sensoriais no futuro ^[5].

O transdutor construído no presente trabalho possibilita a aplicação de campos magnéticos e tensões mecânicas simultaneamente ao material magnetostrictivo. Com este dispositivo estudamos as propriedades magnéticas (magnetostricção, indução magnética) da liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$ em situações quase-estáticas e a partir destes resultados, foi determinada a sensibilidade para aplicações em sensores.

As caracterizações realizadas na liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$ também foram feitas em uma barra de GALFENOL adquirida da empresa ETREMA (EUA) a fim de comparar os resultados entre elas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 MAGNETOSTRICÇÃO

A propriedade física magnetostricção foi descoberta em 1840, após James Joule observar a ocorrência de pequenas deformações (~ 10 ppm) em uma barra de ferro que estava sobre ação de um campo magnético. Essa propriedade relaciona as propriedades mecânicas e magnéticas dos materiais, sendo que se uma deformação é gerada quando o material se encontra sobre aplicação de um campo magnético, este comportamento é chamado de efeito Joule. Já quando existe uma variação das propriedades magnéticas quando uma tensão é aplicada, este efeito é denominado efeito Villari, ambos os fenômenos estão esquematizados conforme a Figura 2 ^{[1],[6]}.

Figura 2 – Deformação causada pela aplicação de um campo magnético (a) e geração de campo magnético causado pela aplicação de uma tensão (b). Adaptada de ^[1].

A magnetostricção pode ser pensada considerando-se apenas a propriedade em uma direção ou considerando-se a deformação do material como um todo.

A deformação em uma direção é chamada de magnetostricção linear e divide-se em magnetostricção longitudinal (λ_{long}), deformação medida na mesma direção da aplicação do campo magnético, e magnetostricção transversal (λ_{trans}), deformação medida na direção perpendicular à aplicação do campo.

Já a magnetostricção total (λ_{total}), engloba ambas as magnetostricções lineares e é dada pela equação (1).

$$\lambda_{total} = \lambda_{long} - \lambda_{trans} \quad (1)$$

Vários outros estudos foram realizados com o intuito de descobrir materiais com altos valores de magnetostricção, entretanto, todos eles apresentam alguma limitação para ser utilizada em aplicações. Por exemplo, o térbio e o disprósio apresentam altas deformações, por volta de 10000 ppm, porém apresentam temperatura de Curie inferior à temperatura ambiente. Já as ligas de TbFe₂, DyFe₂ e SmFe₂ apresentam magnetostricção de 2600 ppm, 650 ppm e -2000 ppm, respectivamente. No entanto, estes materiais apresentam alta anisotropia magneto cristalina e por isso necessitam de altos campos magnéticos para atingir essas deformações gigantes ^{[7],[8]}.

Essa classe de materiais só começou a se tornar interessante do ponto de vista de aplicação por volta de 1970, quando o Naval Ordnance Laboratory (NOL) desenvolveu o Terfenol-D (Tb_{0.27-0.30}Dy_{0.73-0.7}Fe₂), uma liga composta de ferro, térbio e disprósio, que conseguia alcançar valores de até 1600-1700 ppm de magnetostricção em temperatura ambiente, para campos magnéticos menores que 1 Tesla. O mesmo é utilizado em diversas aplicações (como em sistemas de sonares, por exemplo), porém, sua fragilidade e custo limitam a sua utilização em algumas aplicações ^{[1],[2],[7]}.

Dessa forma, iniciou-se a procura por materiais magnetostrictivos com melhores propriedades mecânicas e sem a presença de elementos terras raras. O mesmo laboratório, o NOL, desenvolveu o GALFENOL, liga a base de ferro e gálio. Embora apresente uma magnetostricção moderada, da ordem de 200 ppm para o material policristalino com orientação preferencial, este possui baixos campos de saturação. Além disso, este material é mais barato que os que contêm terras raras e apresenta ótimas propriedades mecânicas, sendo muito semelhantes ao do aço ^[9].

O GALFENOL pode ser submetido à tração, compressão, torção, choque térmico e passar por processos de conformação mecânica (usinagem, laminação, extrusão, forjamento e soldagem). Além disso, devido à sua alta temperatura de Curie, estas ligas apresentam baixa variação das propriedades magnéticas com a variação da temperatura, assegurando que a deformação ocorra devido a estímulos magnéticos ou mecânicos e não térmicos ^{[1],[2],[10],[11]}.

A partir da descoberta do GALFENOL, vários estudos foram realizados para descobrir a porcentagem de gálio que geraria o maior valor de magnetostricção. A Figura 3 mostra a magnetostricção de ligas monocristalinas de ferro com gálio na direção [100], variando de 0% até 35% de gálio. Observa-se a existência de dois picos na magnetostricção em função da quantidade de gálio, sendo o primeiro por volta de 17% para amostras resfriadas ao forno e 19% para amostras resfriadas rapidamente e outro por volta de 27% de gálio ^{[1],[2],[12],[13]}.

Figura 3 – Variação da magnetostricção em função da quantidade de gálio no ferro em amostras monocristalinas (GALFENOL). Adaptada de ^[13].

O motivo pelo qual o Fe-Ga apresenta valores de magnetostricção elevado tem sido muito discutido na literatura. Uma das hipóteses, que já foi até mesmo comprovada experimentalmente, seria devido à formação dos “pares de gálio”.

Estes pares induzem grandes deformações nas proximidades das ligações do gálio com o ferro, provavelmente devido a um aumento da anisotropia magneto cristalina causada pelo alinhamento dos pares nas direções $\langle 001 \rangle$ ^{[12],[14]}.

Além disso, de acordo com simulações computacionais, a saturação dos pares de gálio acontecem por volta de 20% de gálio, que é a mesma concentração em que a estrutura desordenada A2 se transforma na ordenada D03 em baixas temperaturas ou B2 em altas temperaturas. Essas mudanças estruturais podem estar relacionadas com a saturação dos pares de gálio ^[15].

2.2 LIGA CONTENDO FERRO E ALUMÍNIO

A variação da magnetostricção para a liga de Fe-Al é mostradas na Figura 4.

Figura 4 – Em temperatura ambiente, magnetostricção de saturação nas direções cristalográficas [100] e [111], para ligas de Fe-Al, adaptado de ^[16].

No caso das ligas de Fe-Al, a magnetostricção não depende somente da composição química da amostra, mas também das fases formadas durante o resfriamento das mesmas.

Neste caso, a maior deformação medida aconteceu com 19% (atômico) de alumínio para um resfriamento nem muito rápido e nem muito lento, gerando a coexistência da fase desordenada A2 e da ordenada D03 ^[16].

A Figura 5 mostra a variação da constante de anisotropia magneto cristalina em função da quantidade de alumínio. Observa-se que o aumento da quantidade de alumínio diminui a constante da anisotropia magneto cristalina (K_1), facilitando a saturação magnética e magnetostrictiva do material, especialmente das ligas parcialmente ordenadas (presença simultânea de A2 e D03).

Figura 5 - Constante anisotrópica K_1 para ligas de Fe-Al em função da composição da liga, adaptado de ^[17].

Como neste trabalho será utilizado uma liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$, a proporção entre o Fe-Al é um pouco maior que 20% (já que parte do ferro é consumido para formar uma segunda fase de Fe_2B), dessa forma, é esperado que o material seja parcialmente ordenado (como já observado em trabalhos anteriores) e com baixa anisotropia magneto cristalina ^[4].

A liga de Fe-Al é interessante do ponto de vista econômico quando comparada ao Terfenol-D e ao GALFENOL, pois não utiliza terras raras e o preço do gálio é 7,5 vezes maior do que o do alumínio, ainda que os dispositivos não utilizem grandes quantidades de material ^{[9],[18],[19]}.

Existem trabalhos que documentam magnetostricções em Fe-Al de 40 - 99 ppm para amostras policristalinas e 150 ppm para monocristalinas (sem aplicação de força externa) ^{[18],[19],[20]}.

Para potencializar a magnetostricção dessas ligas, átomos pequenos são adicionados para modificar a solubilidade das fases A2 e D03, alterando a proporção entre as mesmas na liga produzida ^{[18],[19],[21]}.

A magnetostricção total de uma liga policristalina de $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{1-x}\text{B}_x$ foi elevada de 40 ppm ($x=0$) para 80 ppm com a adição de 2% de boro ($x = 2$) ^[19].

A Figura 6 mostra as micrografias para as ligas $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{1-x}\text{B}_x$ ($0 \leq x \leq 2$), variando a concentração de boro em passos de 0,5% ^[19]. As microestruturas mostraram que houve um crescimento dendrítico formado pelas fases Fe- α (A2) e Fe₃Al (D03) e a formação da fase Fe₂B na região interdendrítica.

Figura 6 - Micrografia das ligas Fe-Al dopadas com diferentes quantidades de boro (0%; 0,5%; 1,0%; 1,5% e 2,0%) ^[19].

Durante a solidificação, o boro consome o ferro da matriz para formar a fase Fe₂B, modificando a composição da liga e conseqüentemente, a fração volumétrica das fases da matriz ou dendritas (A2+D03). Amostras monofásicas destas fases na região de composição próxima a 20% de Al apresentam valores menores de magnetostricção do que as amostras com a presença de ambas as fases, conforme pode ser observado na Figura 4.

Foi mostrado recentemente que amostras com composição fixa de 20% de alumínio, apresentam os maiores valores de magnetostricção quando se adiciona por volta de 3% de boro, com 101 ppm e 82 ppm para a deformação total e longitudinal, respectivamente, como mostra a Figura 1 ^{[4],[18],[19]}.

Além disso, sabe-se que existe uma melhora significativa na ductilidade das ligas de Fe-Ga dopadas com boro, como mostra a Figura 7 ^[22].

Figura 7 - Gráfico de tensão por deformação de ligas com Fe-Ga, Fe-Ga-B e Fe-Ga-Cr. Adaptado de ^[22].

A adição de 1% de boro nas ligas binárias de Fe₈₃Ga₁₇ faz com a tensão de ruptura aumente de 351 MPa (liga sem boro) para 548 MPa, com um regime plástico iniciando em, aproximadamente, 446 MPa (3,56%) ^[22].

A melhora nas propriedades mecânicas ocorre devido ao refinamento dos grãos causado pelo boro durante a solidificação e à segregação da fase Fe₂B nos contornos de grão, aumentando a coesão dos mesmos e facilitando a movimentação das discordâncias ^[22].

Dessa forma, as tensões locais nos contornos são eliminadas e o escorregamento dos contornos de grão é favorecido, modificando de frágil para dúctil o tipo de fratura ^[22].

Devido à semelhança das microestruturas de Fe-Ga e Fe-Al com adições de boro, espera-se que os mesmos efeitos benéficos nas propriedades mecânicas observados no Fe-Ga ocorram no Fe-Al.

Tratamentos térmicos também podem ser usados para aumentar a magnetostricção de ligas Fe-Al, como já foi citado, para amostras contendo 19% e 25% de alumínio, as deformações totais foram de 20 ppm para 62 ppm e de 42 ppm para 50 ppm (respectivamente) após o tratamento térmico. As amostras que são tratadas após a sua

fabricação apresentam menor quantidade de defeitos e tensões internas, além de modificar a proporção entre as fases alfa (A2) e Fe_3Al (DO_3) ^{[18],[19]}.

2.3 EFEITO DA ORIENTAÇÃO CRISTALOGRÁFICA NA MAGNETOSTRICÇÃO

Além da composição da amostra, o método de produção da liga também tem forte influência na magnetostricção, pois a mesma é sensível à orientação cristalográfica devido à anisotropia magneto cristalina.

A anisotropia magneto cristalina é a propriedade do material ferromagnético pela qual os momentos magnéticos se orientam preferencialmente em algumas direções cristalográficas. Por exemplo, em materiais cúbicos como as ligas de Fe-Ga (GALFENOL), as de Fe-Al, e o ferro puro (que apresentam estrutura cristalina CCC), têm seus momentos magnéticos orientados preferencialmente nas direções $\langle 100 \rangle$ e possuem magnetostricção positiva. Já no níquel, que tem estrutura cristalina CFC (as direções preferenciais são as $\langle 111 \rangle$) e possui magnetostricção negativa.

A magnetostricção pode ser aumentada quando se produz amostras texturizadas, como monocristais, materiais deformados ou obtidos por solidificação direcional, caso a orientação preferencial gerada seja a de fácil magnetização ^[11].

A Figura 8 mostra as curvas de magnetostricção para a amostra de GALFENOL (17% at. de gálio) monocristalinas na direção $[100]$ (320 ppm), solidificadas direcionalmente na direção $[100]$ (170 ppm), extrudadas sem (60 ppm) e com tratamento térmico (30 ppm), mantendo sempre a tensão fixa em 28,1 MPa ^[11].

Figura 8 - Magnetostricção em função do campo magnético para amostras de GALFENOL obtidas por várias técnicas. Adaptado de ^[11].

A Figura 9 mostra os valores de magnetostricção para os cristais de Terfenol-D, orientados nas direções [112], [110] e [111] sobre diferentes tensões de compressão (30-60 MPa) e como já era de se esperar, o cristal orientado na direção [111], que é a direção de fácil magnetização para este material, foi o que apresentou o maior valor de magnetostricção, por volta 2050 ppm, seguido pelos cristais [110] e [112] (60 MPa) com 1850 ppm e 1750 ppm respectivamente ^[7].

Figura 9 – Curvas de magnetostrição para diferentes orientações cristalográficas. (1) [111], 20 MPa; (2) [110], 30 MPa; (3) [112], 60 MPa; (4) [112] 30 MPa ^[7].

2.4 EFEITO DA APLICAÇÃO DE TENSÃO SOBRE A MAGNETOSTRICÇÃO

Quando se aplica, por exemplo, uma tensão de compressão na direção [001] em ligas de Fe-Ga e Fe-Al (com estrutura CCC), a energia das direções basais ([100] e [010]) diminui e os domínios orientados paralelamente à força se deslocam para a base ^{[1],[2],[3],[7],[10],[16]}.

A aplicação de um campo magnético na direção [001] faz com que os domínios que apresentam os momentos orientados na direção basal, rotacionem de 90° para se alinhar na direção do campo magnético, entretanto, isso só acontece quando a força do campo magnético sobrepuser à força da anisotropia magneto cristalina (uma parcela desta é intrínseca do material, outra ocorre devido à aplicação da tensão de compressão e outra devido à microestrutura), podendo gerar grandes aumentos na magnetostrição, desde que o acoplamento spin-órbita seja eficaz ^{[1],[2],[3],[7],[10]}.

Conforme se aumenta o campo magnético, os domínios alinhados na direção do mesmo aumentam de tamanho devido à movimentação das paredes do domínio, até que todos apresentem uma direção muito próxima do campo magnético. A partir desse ponto, a magnetização e magnetostricção sofrem apenas pequenas variações com o aumento do campo magnético, devido à rotação forçada dos momentos individuais na direção do campo, atingindo assim a saturação magnética do material ^{[2],[10]}.

Já no caso das tensões de tração, os domínios magnéticos se alinham na mesma direção da força, dessa forma, se o campo magnético for aplicado paralelo à tensão, os domínios já estarão alinhados e a magnetostricção será pequena ^{[2],[10]}.

A influência da anisotropia magneto cristalina e das tensões de tração e compressão em função do campo magnético e para diferentes tensões constantes na magnetização e magnetostricção para uma amostra de GALFENOL altamente texturizada, podem ser vistas nas Figura 10 e Figura 11, respectivamente ^[2].

Nas curvas de magnetização, o aumento da tensão compressiva faz com que sejam necessários campos magnéticos maiores para atingir a saturação do material, já que esta tensão dificulta a movimentação dos domínios e ocasiona eventualmente um dobramento na curva de magnetização ^{[2],[11],[23]}.

Este dobramento pode ser mais facilmente observado na curva de susceptibilidade (Figura 10 (b)), já que o mesmo se manifesta na forma de dois picos, simétricos ao ponto onde não existe aplicação de campo magnético ^[23].

Figura 10 - Curvas de magnetização (a) e susceptibilidade (b) da liga de Fe_{81,6}Ga_{18,4}, para tensões mecânicas constantes. Adaptado de ^[23].

Figura 11 - Variação da magnetostrição em função do campo aplicado, para diversas tensões aplicadas na liga. Adaptado de ^[2].

Observa-se, de maneira análoga à magnetização, que a magnetostrição só deixa de apresentar valores não nulos a partir de certo valor de campo magnético, que aumenta com o aumento da tensão de compressão. Na Figura 11, por exemplo, este campo é de ~ 10 kA/m para a tensão aplicada de 63,71 MPa.

Esse comportamento também foi observado em uma amostra monocristalina de GALFENOL (19% de gálio) solidificada direcionalmente na direção [100]. A Figura 12 (a) mostra um "dobramento" da curva de indução magnética para uma liga de GALFENOL com 19% atômico de gálio ^[24].

Figura 12 - Indução magnética gerada por um campo magnético, para uma amostra monocristalina e solidificada direcionalmente na direção [100] de GALFENOL com 19% de gálio (a) e 24,7% de gálio (b), ambos em porcentagem atômica. Adaptado de ^[24].

Esse dobramento é atribuído à anisotropia magneto cristalina do GALFENOL. No caso das ligas que contenham menos de 20% de gálio, a constante de anisotropia magneto cristalina cúbica é positiva e alta (por volta de $17,5 \text{ kJ/m}^3$ para 19% de gálio), enquanto que para uma amostra contendo mais gálio é negativa e pequena ($-1,2 \text{ kJ/m}^3$ para uma amostra com 24,7% de gálio) ^[24].

Dessa forma, para que os momentos magnéticos possam rotacionar, o campo magnético precisa vencer a anisotropia magneto cristalina do material, sendo este comportamento evidenciado pela baixa permeabilidade no início das curvas de indução magnética. Assim que a energia do campo é suficiente para vencer a energia magneto cristalina, os momentos conseguem rotacionar mais facilmente e a permeabilidade magnética aumenta drasticamente ^[24].

De maneira análoga, como a constante de anisotropia da liga com 24,7% é pequena e negativa, o campo magnético "vence" facilmente a anisotropia e a permeabilidade magnética é constante do início ao fim da saturação magnética, não evidenciando nenhum dobramento ^[24].

Já no caso da magnetostricção, o aumento da tensão de compressão gera valores maiores de deformação e de maneira análoga a magnetização, a saturação magnética ocorre em campos magnéticos maiores ^{[2],[7],[10],[11]}.

A aplicação de tração apresenta um efeito maléfico para a magnetostricção, já que alinha os momentos magnéticos na mesma direção da força, assim, quando o campo magnético for aplicado, os momentos já estarão alinhados ao mesmo e a magnetostricção será pequena. Este efeito pode ser observado na Figura 10, para as curvas pontilhadas. ^{[2],[7],[10],[11]}.

Para um material magnético que será utilizado em sensores, a propriedade importante a ser determinada é a variação da indução magnética em função da aplicação da tensão mecânica, para diferentes campos magnéticos constantes.

A Figura 13 mostra as curvas de magnetização em função das tensões de compressão e tração aplicadas para uma amostra policristalina de GALFENOL altamente texturizada na direção de fácil magnetização $[100]$ ^[2].

Figura 13 - Variação da magnetização em função da tensão, para diversos campos magnéticos aplicados na liga. Adaptado de ^[2].

Como o interesse para sensores é a região linear das curvas, utilizam-se os campos magnéticos para determinar a faixa de atuação de interesse (que depende da tensão que se deseja medir) e assim, o valor da magnetização indicará qual a compressão aplicada ^[2].

2.5 TRANSDUTOR DE TENSÃO EM SINAL MAGNÉTICO/ELÉTRICO

Para a realização das medidas de magnetostricção quase-estáticas e dinâmicas, é necessária a utilização de um dispositivo que aplique campo magnético em conjunto com tensões mecânicas e ao mesmo tempo, possam ser medidas as propriedades magnéticas, no caso, a magnetização ou indução magnética e a magnetostricção ^[3].

Na Figura 14 é mostrado um tipo de transdutor de força para magnetização ^[3].

Figura 14 - Desenho esquemático do funcionamento de um sensor de deformação magnetostrictivo. Adaptado de ^[3].

O funcionamento desse tipo de sensor se baseia na utilização de duas bobinas, uma é chamada de bobina de excitação e a outra de bobina de detecção. A bobina de excitação gera um fluxo magnético no núcleo, que é o elemento magnetostrictivo, gerando uma indução magnética no mesmo. Já as bobinas de captura são as responsáveis por medir a indução magnética (B) gerada pela amostra (M) e pela bobina de excitação (H). Uma sonda Hall é colocada bem próxima da bobina de detecção, esta é responsável pela medição do campo magnético (H) que está atuando na amostra ^{[1],[3]}.

Quando o sensor é sujeito a uma força, as propriedades magnéticas do elemento magnetostrictivo variam e um novo valor de indução magnética é gerado na bobina de detecção. Dessa forma, com os valores de indução magnética, campo magnético e tensão mecânica aplicada, é possível gerar um gráfico do valor da magnetização pela tensão aplicada, como mostra a Figura 13 ^{[2],[3]}.

Esse tipo de sensor magnetostrictivo pode ser calibrado para medir tanto força quanto deformação e a sua sensibilidade está diretamente relacionada com a voltagem na bobina de detecção, assim, os resultados dependem tanto do projeto do dispositivo quanto da qualidade das amostras ^[3].

O número de espiras das bobinas de detecção e excitação, por exemplo, são de fundamental importância na sensibilidade do sensor, já que quanto maior o número de espiras em cada bobina, maior será a variação de fluxo magnético e a maior será a corrente de detecção, aumentando assim o sinal de saída, entretanto, grandes bobinas aumentariam o tamanho e o peso do sensor ^[3].

A Figura 15 mostra como a voltagem de detecção varia para um aço SAE 1018 (elemento magnetostrictivo) em função do número de espiras de detecção (a) e excitação (b), mantendo a frequência e a corrente constante (sem aplicação de força) ^[3].

Figura 15 – Variação da voltagem de detecção em função do número de espiras de detecção e excitação, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018 (frequência de 500 Hz e corrente de 4 mA rms). Adaptado de ^[3].

Existem diversos fatores que diminuem a voltagem de detecção, como por exemplo, as perdas devido à resistência das bobinas de excitação e detecção, à histerese associadas ao elemento magnetostrictivo e o vazamento do fluxo pelo circuito magnético ^[3].

Dessa forma, a frequência da corrente na bobina de excitação deve ser escolhida com cautela, pois o seu aumento gera maiores tensões na bobina de detecção até um determinado valor, a partir do qual, a geração das correntes parasitas se tornam tão altas que existe uma perda do fluxo magnético, como mostra a Figura 16 ^[3].

Figura 16 - Voltagem de detecção em função da frequência de excitação para diversas correntes de excitações, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018.

Adaptado de ^[3].

Para melhorar o desempenho do sensor, deve-se construir o núcleo do circuito magnético com chapas finas e com grãos orientados, para reduzir as correntes parasitas e diminuir o campo de desmagnetização ^[3].

A corrente também é um parâmetro importante, pois a tensão de detecção aumenta consideravelmente com a corrente, como mostra a Figura 17. Entretanto, o aquecimento das bobinas também deve ser levado em consideração, pois degrada as propriedades magnéticas dos materiais envolvidos.

Figura 17 - Tensão de detecção em função da corrente de excitação para diversas frequências, utilizado como elemento magnetostrictivo um aço 1018. Adaptado de [3].

2.6 SENSIBILIDADE DO TRANSDUTOR

A propriedade mais importante dos sensores é a “sensibilidade”, que é definida (no caso de um sensor de força) como a variação da tensão na bobina de detecção em relação à variação da força aplicada, conforme dado pela equação (2):

$$SF_n = \frac{\partial V_n}{\partial F_a} \quad (2)$$

Onde SF_n é a sensibilidade do sensor e $\frac{\partial V_n}{\partial F_a}$ é a variação da tensão de detecção em função da variação da força aplicada [3].

Em termos de propriedades físicas, esta equação corresponde à derivada da magnetização ou indução magnética em função da tensão mecânica aplicada, para cada campo magnético aplicado, como mostra a equação (3).

$$SF_n = \left. \frac{dB}{d\sigma} \right|_H \quad (3)$$

Diferentemente da frequência aplicada às bobinas de detecção, a frequência nas bobinas de excitação não afeta a sensibilidade do sensor significativamente, pois o aumento do fluxo magnético é balanceado pela perda das correntes parasitas, como mostra a Figura 18.

Entretanto, o uso de correntes maiores na bobina de excitação aumenta consideravelmente a sensibilidade do sensor, como mostra a Figura 19 ^[3].

Figura 18 - Sensibilidade à força para diversas frequências de excitação. Adaptado de ^[3].

Figura 19 - Sensibilidade à força para diferentes correntes de excitação. Adaptado de ^[3].

Para efeito de comparação, a Figura 20 mostra a curva de voltagem de detecção em função da força aplicada para um sensor magnetostrictivo e um extensômetro. O sensor magnetostrictivo é muito mais sensível do que o extensômetro para medir tensões, pois os mesmos apresentam uma voltagem de detecção por volta de 18 mV e 1 mV respectivamente, para uma aplicação de 444 N, como mostra a Figura 20 ^[3].

Já para o extensômetro estas voltagens são menores que 1 mV/N para a mesma faixa de forças aplicadas. Para atingir essa voltagem de detecção, foram utilizados 1500 e 1000 espiras para a bobina de excitação e detecção respectivamente, com a corrente e a frequência em 8 mA rms e 1000 Hz ^[3].

Figura 20 - Comparação da voltagem de detecção normalizada para um sensor de força magnetostrictivo e para um extensômetro, em função da aplicação da força. Adaptado de ^[3].

É importante enfatizar que a Figura 20 corresponde a um conjunto de dados sem amplificação e que existem pequenas flutuações causadas por ajustes imprecisos da corrente de excitação ^[3].

2.7 UM EXEMPLO DE APLICAÇÃO DE UM MATERIAL MAGNETOSTRICTIVO

Pode-se utilizar os materiais magnetostrictivos nas válvulas de injeção de combustível dos motores, como mostra uma patente da BOSCH ^[25].

A válvula de injeção de combustível (1) é constituída pela casa da válvula (2), que acomoda um atuador piezoelétrico ou magnetostrictivo (14), uma bucha (16), uma mola de compressão (16), uma agulha (9) e um tubo de alimentação de combustível (3), sendo ambos unidos por um elemento plástico (4) que possui um terminal de elétrico (5) conectado a linha de alimentação de energia do injetor de combustível. A Figura 24 mostra com mais detalhes os componentes da válvula de combustível ^[25].

Figura 21 - Desenho esquemático da seção axial de uma válvula de injeção de combustível. Adaptado de ^[25].

A mola de compressão (16) empurra o colar da bucha (15), e consequentemente, o atuador (14) e a bucha (13) são deslocados para baixo, fazendo com que a agulha (9) encoste o membro de fechamento (8) no corpo da base da válvula (6), criando uma base de selamento (32), dessa forma, o combustível não consegue chegar à abertura de descarga do pulverizador (11). A Figura 22 mostra a válvula de combustão fechada ^[25].

Figura 22 - Desenho esquemático da seção axial da ponta da válvula de injeção de combustível fechada. Adaptado de ^[25].

Para acionar o injetor de combustível (1), o atuador (14) é acionado pelo terminal elétrico (5), que expande e empurra o colar da bucha (15) contra a mola de compressão (16), levantando a agulha da válvula (9) ^[25].

Quando a agulha da válvula (9) levanta o membro de fechamento (8), ela desencosta do corpo da base da válvula (6) e a base de selamento (32) é aberta, deixando o combustível (40 e 41) passar pela abertura de descarga do pulverizador (11), como mostra a Figura 23 ^[25].

Figura 23 - Desenho esquemático da seção axial da ponta da válvula de injeção de combustível aberta. Adaptado de ^[25].

Assim, de acordo com o estímulo gerado no elemento magnetostrictivo, a agulha (9) irá se movimentar mais ou menos, controlando a quantidade e a distribuição do combustível (40 e 41) que passa pelas aberturas de descarga do pulverizador (11) ^[25].

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Esse tópico é dividido em duas partes, a primeira está relacionada à construção do dispositivo sensorial para obtenção das curvas de magnetização e magnetostricção em ensaios quase estáticos e a segunda parte cita quais instrumentos foram utilizados na aquisição das propriedades físicas de interesse.

3.1 DISPOSITIVO SENSORIAL

Neste item são descritos os materiais e os procedimentos utilizados na fabricação dos componentes do dispositivo sensorial mostrado na Figura 24.

Figura 24 - Desenho esquemático do dispositivo sensorial.

3.1.1 Núcleo magnético

Para a construção do núcleo magnético, utilizou-se de 33 chapas de ferro-silício de grãos orientados ($70 \times 43 \times 0,3$ mm) e com uma camada superficial de óxido. Estas chapas foram cedidas pela empresa TRANSFORMADORES JUNDIAÍ e são as mesmas chapas utilizadas na confecção de transformadores comerciais. Uma foto de duas destas chapas é mostrada na Figura 25.

Figura 25 – Fotografia das chapas de ferro-silício.

Usa-se a liga de ferro-silício com grãos orientados para reduzir as perdas do fluxo magnético, já que o mesmo consegue saturar magneticamente para baixos campos magnéticos, como mostra a Figura 26. Além disso, utiliza-se esse material na forma de chapas finas para reduzir as correntes parasitas, já que o material é metálico.

Figura 26 - Curva de indução magnética vs. Campo magnético aplicado, para uma chapa de grão orientado de ferro-silício e uma frequência de 60 Hz ^[26].

A magnetização das chapas de ferro-silício se aproxima da saturação magnética para baixos valores de campos magnéticos (abaixo de 1000 A/m), ou seja, considerando que a bobina tem 27 mm de comprimento e 1200 espiras, seria necessário apenas 0,0225A para saturar localmente o núcleo magnético. Isso é muito importante para o transdutor, já que o núcleo magnético é o responsável pela concentração do fluxo magnético gerado pelas bobinas de excitação e deve garantir que o campo magnético na região central do dispositivo, local onde se encontra o elemento magnetostrictivo, seja homogêneo.

3.1.2 Carretel

O carretel foi construído para dar suporte às bobinas de excitação e precisava ser de um material leve, isolante eletricamente e com boa resistência mecânica, por isso, foi utilizado um cilindro de nylon na confecção do mesmo.

3.1.3 Chapas de suporte para o núcleo ferromagnético

Para dar sustentação ao núcleo magnético, quatro chapas de titânio com 1,5 mm de espessura foram utilizadas.

3.1.4 Conformação

Uma fresadora universal da marca ROMI (Figura 27), modelo U-30, foi utilizada para cortar e dar acabamento nas chapas e no carretel.

Figura 27 – Fresadora universal ROMI U-30, utilizada na fabricação dos componentes do dispositivo sensorial.

3.1.5 Bobina de excitação e captura

A bobina de excitação foi enrolada pela empresa TRANSFORMADORES JUNDIAÍ utilizando um fio de cobre (AWG #26). O número de espiras dessas bobinas foi baseado em um trabalho de graduação que utilizava cerca de 1600 espiras ^[1].

Entretanto, devido ao espaço interno disponível do nosso transdutor, o número de espiras foi limitado à apenas 1200.

A bobina de captura foi bobinada no centro do elemento magnetostrictivo com um fio de cobre (AWG #37) e possuíam no mínimo 75 espiras, já que este foi o valor utilizado na literatura ^[1].

3.1.6 Elemento magnetostrictivo

Foram escolhidos dois materiais como elementos magnetostrictivos, o GALFENOL com composição $\text{Fe}_{81,6}\text{Ga}_{18,4}$, solidificado direcionalmente na direção de fácil magnetização e a liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$ solidificada direcionalmente, ambos os materiais na forma de barras cilíndricas.

O GALFENOL foi adquirido da ETREMA PRODUCTS INC. e é utilizado para validar o dispositivo criado, pois já existem diversos trabalhos que caracterizam o GALFENOL em situações quase estáticas ^{[1], [2], [10], [11]}.

A liga de FeAlB foi obtida por fusão à arco para gerar um lingote de 40 g, sendo posteriormente tratado termicamente em 1100 °C por 24 horas para homogeneização. Este lingote foi submetido a um forjamento rotativo a quente até atingir 6,3 mm de diâmetro. Após a deformação, o material foi solidificado direcionalmente utilizando a técnica Bridgman ^[27].

3.2 APARATO EXPERIMENTAL PARA MEDIDAS DE MAGNETIZAÇÃO E MAGNETOSTRICÇÃO

Nesse tópico serão descritos quais foram os instrumentos utilizados na aquisição das propriedades de interesse.

3.2.1 Extensômetro (“*Strain Gauge*”)

A deformação dos elementos magnetostrictivos foi medida com um extensômetro (fator de sensibilidade 2,17) do fabricante EXCEL SENSOR, feito com um fio metálico de constantan (350 ohms) em uma base de poliamida.

Devido ao fato do elemento magnetostrictivo ser cilíndrico, é necessário criar um entalhe de $10 \times 4 \times 0,5$, já que o extensômetro fica melhor colado em uma superfície plana. O entalhe pode ser visualizado na Figura 28.

Figura 28 - Elemento magnetostrictivo com entalhe.

A superfície do entalhe foi lixada com uma lixa de granulometria #220 e #2400 respectivamente e limpa com álcool etílico no ultrassom por 10 minutos. Esses procedimentos foram adotados para garantir uma superfície limpa de imperfeições e sujeiras, melhorando a aderência do extensômetro.

A partir disso, utilizou-se a cola LOCTITE 496 para colar o extensômetro no entalhe, pressionando o mesmo por 1 minuto após entrar em contato com o elemento magnetostritivo (tempo de pega da cola) e esperou-se 24 horas antes da realização dos testes, para garantir a cura total da cola, conforme indicado pelo fabricante da mesma.

A Figura 29 mostra o extensômetro colado na barra de GALFENOL.

Figura 29 – Bobina de captura e extensômetro colado na barra de GALFENOL.

PAREI AQUI

3.2.2 Ponte de Wheatstone

Para realizar a aquisição do sinal elétrico associado à deformação do extensômetro, utilizamos uma ponte de Wheatstone da National Instruments (NI 9237) em conjunto de um cabo RJ-50 para fazer a ligação entre a ponte e o extensômetro.

As medidas foram realizadas utilizando um extensômetro ativo e um extensômetro de referência (*“Dummy Gauge”*) para compensar a magneto resistência do extensômetro e variações de resistência do extensômetro devido a mudanças na temperatura ambiente.

Antes de cada medida, é realizado o balanceamento da ponte via software e a calibração usando uma resistência shunt.

Utilizamos 5 volts como voltagem de alimentação na ponte de Wheatstone, pois quanto maior a voltagem de alimentação da ponte, maior será o sinal de saída gerado pela deformação. Entretanto, deve-se tomar cuidado com o autoaquecimento do filamento resistivo do extensômetro, que pode causar variações indesejáveis nas medidas.

A Figura 30 mostra a fotografia da ponte NI 9237.

Figura 30 – Ponte de Wheatstone da National Instruments (NI 9237).

3.2.3 Fluxímetro

Para realizar a medição do fluxo magnético na bobina de captura, foi utilizado um fluxímetro da marca LakeShore, modelo 480. Para cada bobina, foi medido a área da amostra e o número de espiras, já que estes são dados de entrada para o equipamento integrar o fluxo magnético.

Caso a medida fosse realizada assim que o equipamento era ligado, uma variação da medida era observada, mesmo sem nenhum campo magnético aplicado (chamado de "drift"), assim, para evitar erros indesejáveis, o manual do mesmo recomenda deixar o equipamento aquecer antes da sua utilização e sempre inicializar o integrador após o fim de cada medida.

3.2.4 Fontes elétricas e eletroímã

Foram utilizadas dois tipos de fonte de corrente, a primeira é da marca LakeShore, modelo 642. A mesma pode fornecer até 70 A para um eletroímã da mesma marca, modelo EM4-HVA, que gera um campo magnético de 1,1 Tesla para uma separação de 38 mm entre os polos. Esta fonte foi utilizada somente nas calibrações do dispositivo e não participa de nenhum ensaio quase estático.

Para realizar as medidas quase estáticas, foi utilizada uma fonte de corrente da marca Tektronix, modelo PWS4602, já que a mesma é mais portátil e trabalha com tensões menores (2,5V).

3.2.5 Gaussímetro

Foi utilizado um gaussímetro da marca LakeShore, modelo 475 para medir o fluxo magnético gerado no eletroímã da LakeShore durante a calibração do dispositivo.

3.2.6 LabView

A aquisição dos dados da ponte de Wheatstone, do fluxímetro e do gaussímetro foi realizada pelo programa NI LabView 2012 versão 12.0. Além disso, o mesmo controlou as fontes de corrente, e conseqüentemente, o campo magnético aplicado à amostra.

Os programas utilizados para o controle e leitura dos equipamentos foram baseados em um programa cedido gentilmente pela Dr^a Clara Johanna Pacheco ^[28].

3.2.7 Máquinas de ensaio

Foi utilizada uma máquina universal de ensaio mecânico servo hidráulica, marca MTS e modelo 810M, para validar os valores de deformação medidos pelos extensômetros (ativo e referência) e uma máquina universal de ensaio mecânico eletromecânica, marca EMIC e modelo DL3000, para aplicar a força no ensaio quase estático.

3.2.8 Medidas quase estáticas

Ao todo, foram realizados 2 tipos de testes quase estáticos.

O primeiro se baseia em aplicar uma tensão de compressão na ausência de qualquer campo magnético e realizar as curvas de saturação magnética e magnetostricção, simultaneamente. Este teste é utilizado para medir a influência das tensões de compressão na magnetização e magnetostricção dos materiais.

Após o ensaio, o campo magnético era desligado, a máquina de ensaio (EMIC) aplicava uma força maior e os instrumentos (Ponte de Wheatstone e o fluxímetro) eram recalibrados. O ensaio começou com 500 N (16 MPa) e foi até 4500 N (144 MPa), com um passo de 500 N.

No segundo teste, a amostra é submetida à saturação magnética (na ausência de tensão mecânica) e o campo magnético é reduzido até o valor de interesse, onde era mantido constante até o fim do ensaio. Após esse processo, a máquina de ensaios aplicava de 0 N até 4500 N de força e o comportamento da magnetização era verificado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico é descrita a construção dos componentes do dispositivo sensorial, o procedimento de calibração (do extensômetro e da bobina de captura) e análise das medidas quase estáticas da liga de FeAlB e do GALFENOL.

4.1 COMPONENTES DO DISPOSITIVO SENSORIAL

A configuração adotada para a produção e construção do dispositivo sensorial foi baseada em um trabalho no qual o GALFENOL era caracterizado em situações quase estáticas e dinâmicas ^[1].

O dispositivo construído no presente trabalho pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31 – Fotografia do dispositivo sensorial sem o elemento magnetostrictivo.

O dispositivo sensorial é composto por um núcleo magnético, duas bobinas de excitação e duas chapas de suporte, como mostra a Figura 32 e já descrito no tópico materiais e métodos.

Figura 32 – Fotografia mostrando o dispositivo antes da montagem do mesmo (Figura 31).

4.1.1 Núcleo magnético

Para formar o núcleo magnético, as lâminas da liga Fe-Si foram sobrepostas até formar um paralelepípedo de 10 mm de altura e cortadas na forma de um “T”, produzindo metade do núcleo magnético. A Figura 33 mostra o desenho utilizado para a fabricação do mesmo.

Figura 33 – Desenho esquemático de metade do núcleo magnético.

A primeira tentativa de unir as chapas para a formação de uma única peça foi utilizando a cola TEKBOND 793 e pressionando com pesos de chumbo. Entretanto, as conformações mecânicas (como a retificação, os cortes centrais e os 3 furos) eram muito severas e acabavam por descolar as chapas.

Assim, criou-se um molde para produzir um conjunto parafusado de duas chapas de aço, com as lâminas de Fe-Si entre elas. Este conjunto tem a função de evitar a movimentação das chapas do núcleo magnético durante as conformações mecânicas, garantindo um ótimo acabamento. Após a sua produção, o conjunto parafusado foi esquadrejado, cortado e furado, produzindo as duas metades do núcleo magnético, como mostra a Figura 34.

Figura 34 – Fotografia do núcleo magnético desmontado.

4.1.2 Bobinas de excitação

Um carretel de nylon foi projetado e construído para auxiliar na fabricação das bobinas de excitação. O nylon foi escolhido por ser um material leve, resistente e bom isolante elétrico. As dimensões do carretel estão mostradas esquematicamente na Figura 35 e uma fotografia do carretel pronto na Figura 36.

Figura 35 – Desenho esquemático do carretel utilizado para as bobinas de excitação.

Figura 36 - Fotografia dos carretéis utilizados para as bobinas de excitação.

As bobinas de excitação são as responsáveis por gerar o campo magnético no núcleo magnético e devem possuir o maior número possível de espiras, porém, devido a limitações do espaço interno do dispositivo, só foi possível construir um carretel que acomodasse 1200 espiras. No entanto, este valor está bem próximo do valor ideal calculado na literatura para um dispositivo semelhante e com dimensões próximas ao construído no presente trabalho ^[1].

A fotografia das bobinas de excitação já enroladas, são mostradas na Figura 37.

Figura 37 – Fotografia das bobinas de excitação após serem enroladas nos carretéis.

4.1.3 Chapas de suporte para o núcleo ferromagnético

A função principal dessas chapas é de dar sustentação ao núcleo magnético e as mesmas apresentam as dimensões mostradas na Figura 38.

Figura 38 – Desenho esquemático das chapas de suporte.

A Figura 39 mostra uma fotografia das chapas de titânio depois de serem fabricadas.

Figura 39 – Fotografia das chapas de suporte.

4.1.4 Programas do Labview

Foram criados dois programas utilizando o software LabView.

O programa mostrado na Figura 40 foi o responsável por realizar a aquisição da indução magnética medida pelo fluxímetro (a), da deformação indicada pela ponte de Wheatstone (b) e da voltagem aplicada nas bobinas de excitação (c).

Figura 40 - Programa utilizado na aquisição de dados do fluxímetro (a), da ponte de Wheatstone (b) e da fonte de excitação (c).

Os dados foram aquisitados (em gráficos individuais) em função do tempo decorrido e posteriormente agrupados utilizando o software OriginPro 8 para gerar os gráficos de interesse.

A tensão elétrica nas bobinas de excitação foi controlada pelo programa mostrado na Figura 41. Para que o programa funcione corretamente, o usuário precisava colocar a "tensão final" a ser atingida (tensão que pode ser mantida constante durante o ensaio), a "tensão máxima" que a amostra será submetida (a tensão elétrica atinge esse valor para saturar magneticamente a amostra e depois retorna para o valor de "tensão final") e a taxa de variação da tensão elétrica (é a mesma tanto para a subida quanto para a descida).

Ambos os programas foram utilizados na realização dos ensaios quase estáticos descritos no tópico 3.2.8. e os detalhes da programação utilizada estão mostrados no Apêndice A.

Figura 41 - Programa utilizado no controle da tensão elétrica nas bobinas de excitação.

4.2 CALIBRAÇÃO

A calibração tem a finalidade de validar o sistema de medição da deformação e do fluxo magnético, garantindo que os valores medidos sejam os mais exatos e precisos possíveis.

4.2.1 Deformação sem aplicação de campo

A montagem de "um quarto de ponte, do tipo I" é facilmente realizada, já que duas resistências (R_1 e R_2) são internas ao NI9237 (Figura 30) e não precisam ser montadas, a R_3 é uma resistência externa chamada de NI9945 (350 ohms) e é utilizada para reduzir a quantidade de fios soldados e a última resistência (R_G) é o próprio extensômetro ("Strain Gauge") que está colado na amostra de interesse.

A Figura 42 mostra um modelo esquemático dessa configuração. É importante considerar a resistência do fio que faz a ligação entre o NI9237 e o extensômetro, já que esta pode causar variações consideráveis na medida.

Figura 42 – Modelo esquemático de “um quarto de ponte do tipo I”, mostrando a localização de cada uma das resistências da ponte. Adaptada de ^[29].

A Figura 43 mostra uma fotografia de todos os componentes que compõem essa configuração de ponte.

Figura 43 – Fotografia dos componentes de “um quarto de ponte do tipo I”.

Para validar os resultados obtidos, montou-se em uma barra de alumínio AA6005 “um quarto de ponte, do tipo I” e os valores de deformação medidos pelo extensômetro foram comparados com os de uma máquina de ensaios universal (MTS), que aplicava força suficiente para que as deformações variassem em intervalos de 200 ppm.

A Figura 44 mostra os resultados de deformação da MTS e do extensômetro, onde a MTS aumentava 200 ppm para cada ponto (unidade) do eixo "x".

O desvio padrão para uma célula de carga de 10kN é de 75 ppm.

Figura 44 – Comparação entre os valores de deformação obtidos por uma MTS e utilizando o extensômetro.

A Figura 44 apresenta boa concordância entre os valores medidos pelo extensômetro e pela célula de carga, onde somente a partir de 1600 ppm a medida deixa de ser linear.

Assim, se considerarmos que as deformações desse trabalho na melhor das hipóteses, não ultrapassam os 500 ppm, pode-se considerar válidas as deformações medidas pelo nosso método de medição.

4.2.2 Deformações com aplicação de campo magnético

Uma segunda calibração foi realizada (sem aplicação de força) para garantir que as deformações medidas devido à aplicação de um campo magnético eram verdadeiras. Os valores de magnetostricção medidos pelo nosso sistema foram comparados com os valores obtidos usando-se um microdilatómetro de capacitância ^[5].

Utilizou-se uma configuração com “um quarto de ponte do tipo I” e o extensômetro ativo foi colado em uma amostra de GALFENOL (18,4% atômico de gálio) adquirida da empresa ETREMA PRODUCTS INC. Para a medida do dilatômetro, foi cortado um

paralelepípedo com dimensões por volta de $2,2 \times 2,2 \times 3,0$ mm, da mesma barra de GALFENOL.

A comparação entre as deformações está mostrada na Figura 45.

Figura 45 – Comparação entre os valores de magnetostricção medidos pela ponte de capacitância e pelo extensômetro.

Como o elemento magnetostrictivo utilizado na medida com o extensômetro era uma barra de 16 mm de comprimento por 6 mm de diâmetro, já era de se esperar que o seu campo de saturação (H_{s1}) fosse menor quando comparado com o microdilatómetro (H_{s2}), já que o campo de desmagnetização da barra é praticamente nulo.

Porém, o valor de saturação da magnetostricção deveria ser o mesmo para ambas as medidas, o que não ocorreu, conforme pode ser observado na Figura 45.

Esta discrepância foi eliminada quando foi utilizada uma resistência de referência em “um quarto de ponte do tipo II”, para compensar o efeito do campo magnético sobre a resistência do extensômetro, conhecido como magneto resistência. Esta resistência de referência também compensa variações de resistência devido a variações de temperatura no extensômetro.

A montagem dessa configuração de ponte é mais complicada que com “um quarto de ponte do tipo I”, pois o conector NI9945 não pode ser usado e os fios precisam ser soldados para a construção da ponte.

Nessa configuração, as resistências R_1 e R_2 continuam dentro do NI9237, a R_3 corresponde ao extensômetro de referência e o R_4 é o extensômetro ativo. Além disso, para que a compensação ocorra de maneira adequada, o extensômetro R_3 e R_4 devem ser idênticos.

A Figura 46 mostra um desenho esquemático da configuração em que o extensômetro de referência é utilizado.

Figura 46 - Modelo esquemático de “um quarto de ponte do tipo II”, mostrando a localização de cada uma das resistências da ponte. Adaptada de ^[29].

Como já foi dito anteriormente, a falta do conector NI9945 faz com que a ligação dos fios do cabo RJ50 seja realizada de maneira manual. Esse cabo contém 10 fios, sendo composto por 2 fios para aplicar a corrente excitação da ponte (azul e roxo), 1 para medir a voltagem de saída (cinza), 2 para ligar a resistência shunt em R_3 (preto e marrom) e 2 para compensar a resistência do fio (vermelho e laranja). Os outros fios (verde, amarelo e branco) não necessitam ser ligados à ponte. A Figura 47 mostra o esquema de como os fios são ligados para formar essa configuração de ponte.

Figura 47 – Desenho esquemático mostrando a ligação dos fios em “um quarto de ponte do tipo II”. Adaptada de ^[29].

A Figura 48 mostra uma fotografia de todos os componentes que compõem essa configuração de ponte.

Figura 48 - Fotografia dos componentes de “um quarto de ponte do tipo II”.

Na Figura 49 são mostradas as curvas de magnetostricção, em função do campo magnético aplicado, para 4 medidas de deformação da mesma amostra de GALFENOL, sendo 3 dos ensaios feitos utilizando o extensômetro (para diferentes campos máximos aplicados) e uma medida realizada usando o microdilatómetro, conforme descrito anteriormente.

Figura 49 – Calibração da magnetostricção de uma amostra de GALFENOL (18,4% de gálio), medida por “um quarto de ponte do tipo II” e utilizando uma ponte de capacitância.

Do resultado apresentado na Figura 49, é possível observar que a configuração de “um quarto de ponte do tipo II”, nos possibilita obter valores da saturação da magnetostricção iguais aos obtidos pelo microdilatómetro, já que a magneto resistência do extensômetro ativo é compensada pelo extensômetro de referência.

4.2.3 Fluxo magnético

Com o intuito de verificar o funcionamento do fluxímetro, a bobina de captura também foi calibrada. Para isso, uma bobina com 72 espiras de um fio de cobre (AWG#37) foi bobinada em um cilindro de uma liga de alumínio AA6005, como mostra a Figura 50.

Figura 50 - Barra de uma liga de alumínio AA6005 com a bobina de captura.

A barra de alumínio foi colocada no eletroímã e a aquisição do campo magnético foi realizada pelo fluxímetro (ligada na bobina de captura) e pelo gaussímetro (utilizando uma sonda Hall), onde as medidas foram confrontadas ao fim do ensaio, como mostra a Figura 51.

Figura 51 - Comparação entre o fluxo magnético (fluxímetro) e o campo magnético aplicado (gaussímetro).

Como o ensaio ocorreu para uma liga de alumínio, era de se esperar que devido ao baixo valor de susceptibilidade do alumínio, o campo magnético medido pelo fluxímetro e pelo gaussímetro fosse igual. Entretanto, mesmo para baixos campos magnéticos (0,6T), os valores de campo magnético começaram a apresentar uma divergência considerável.

Essa diferença está associada à presença de ferro (0,35% atômico), na qual era esperado que tivesse pouca influência pela baixa quantidade.

Dessa forma, realizou-se o mesmo ensaio utilizando uma liga de Nb-Ti, (material não magnético). A Figura 52 mostra o resultado para o ensaio em questão.

Figura 52 - Comparação entre os valores de campo magnético medido pelo fluxímetro e gaussímetro.

Observa-se que os valores de campo magnético medidos pelo fluxímetro e pelo gaussímetro são muito parecidos, mesmo para altos campos magnéticos (próximos de 1,2 T), indicando que a utilização do fluxímetro e a construção da bobina de captura foram realizadas corretamente.

Além disso, montou-se o transdutor com a liga de FeAlB (Figura 53) para verificar a influência da taxa de subida da fonte de voltagem (Tektronix) nos valores medidos pelo fluxímetro.

Figura 53 - Fotografia do dispositivo sensorial completo com a amostra de FeAlB e bobina de captura.

Conforme se observa na Figura 54, o dispositivo sensorial criado permite utilizar taxas de incremento de voltagem de até 0,5 V/s sem que haja influência nos valores medidos do fluxo magnético.

Figura 54 - Influência da taxa de crescimento da tensão elétrica na medida da indução magnética, medida pelo fluxímetro.

4.2.4 Aquecimento das bobinas de excitação

Um problema observado no transdutor é o aquecimento das bobinas de excitação durante a realização dos ensaios quase estáticos, dependendo da corrente ou voltagem de excitação utilizada. O aumento da temperatura das bobinas de excitação aquece o núcleo magnético e o elemento magnetostrictivo. Como as propriedades magnéticas variam com a temperatura, este aquecimento pode interferir nos valores de magnetização e magnetostricção. Além disso, o aquecimento pode degradar o verniz isolante do fio e causar um curto circuito com o passar do tempo.

Dessa forma, mediu-se a voltagem mínima que poderia ser aplicada nas bobinas de excitação para que a mesma gerasse um campo magnético que saturasse o elemento magnetostrictivo e não aquecesse muito as bobinas.

Na Figura 55 é mostrado o gráfico da magnetização em função da voltagem e/ou corrente aplicada. Observa-se que para 20 V (0,6 A) a magnetização está quase completamente saturada e o aquecimento observado foi aceitável. Dessa forma, os primeiros testes quase estáticos ocorreram com no máximo 20 V (0,6 A), para que as bobinas de excitação saturassem magneticamente o elemento magnetostrictivo e evitasse o aquecimento das bobinas.

Figura 55 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem e/ou corrente aplicada (campo magnético).

4.3 TESTE QUASE ESTÁTICO.

A seguir são apresentados os resultados dos testes quase estáticos realizados nas ligas FeAlB e GALFENOL.

4.3.1. Liga de FeAlB

O primeiro ensaio quase-estático na liga de FeAlB foi realizado com uma taxa de voltagem de 0,2 V/s. A Figura 56 mostra a indução magnética em função da voltagem para várias tensões de compressão.

Figura 56 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão e para a taxa de incremento de voltagem de 0,2 V/s.

Como já era de se esperar, o aumento da tensão de compressão faz com que sejam necessários maiores valores de campos magnéticos para que a amostra consiga saturar magneticamente.

Como a tensão de compressão é aplicada na direção longitudinal da amostra, os momentos magnéticos tendem a ficar alinhados na direção radial, dessa forma, quanto maior for a tensão de compressão, maior deverá ser o campo magnético aplicado na direção longitudinal para que a amostra consiga saturar magneticamente.

Entretanto, para altas tensões de compressão (112 MPa), o campo magnético gerado pelas bobinas de excitação (com 20 V) não foi suficiente para saturar magneticamente o material, assim, o teste foi repetido utilizando-se 35 V nas bobinas, como mostra na Figura 57.

Por se tratar de uma voltagem alta para o diâmetro do fio, utilizou-se uma taxa de 1 V/s para evitar um superaquecimento da bobina.

Figura 57 - Indução magnética da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).

Observa-se que a tensão de 35 V foi suficiente para saturar magneticamente o material e que o comportamento da indução magnética foi muito parecido com o mostrado na Figura 56. Embora não exista diferença considerável entre os valores medidos, o resultado obtido com a taxa de 1 V/s apresenta um ruído maior.

Na Figura 58 é mostrado o gráfico da magnetostricção em função da voltagem aplicada, para vários valores de tensão compressiva aplicada. De maneira análoga à magnetização, a amostra não conseguiu atingir a saturação da magnetostricção para os valores mais altos de tensão compressiva (112 MPa).

Figura 58 - Magnetostricção da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 0,2 V/s).

Como era de se esperar, o aumento da tensão de compressão dificulta a rotação dos momentos magnéticos na direção do campo magnético, assim, são necessários campos magnéticos maiores para que a amostra atinja o máximo da sua deformação.

Além disso, as curvas apresentam muito ruído e dificultam a leitura correta da magnetostricção de saturação. Esse ruído pode estar relacionado com a máquina de ensaios EMIC, pois foi observado durante os ensaios que a força aplicada não é mantida constante durante todo o ensaio, ocorrendo variações de até 100 N (que corresponde a variações de ~ 3 MPa em tensão).

O ruído foi reduzido quando os ensaios ocorreram com uma taxa maior (1 V/s), como mostra a Figura 59.

Figura 59 - Magnetostricção da liga de FeAlB em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).

A magnetostricção de saturação média foi calculada utilizando-se doze valores medidos na região de saturação para cada tensão aplicada. Mais especificamente, os valores utilizados foram tomados entre -30 V e -35 V. As médias e os desvios padrões são mostrados na Tabela 1.

Observa-se que para as tensões de 48 MPa e 80 MPa obteve-se os maiores valores de magnetostricção $72,3 \pm 1,0$ ppm e $73,5 \pm 2,0$ ppm respectivamente. Entretanto, não se observa diferença nos valores de deformação para as tensões de 16 MPa (64 ± 2 ppm), 112 MPa (62 ± 2 ppm) e 144 MPa (60 ± 3 ppm).

A tensão de compressão força os momentos magnéticos a se alinharem na direção perpendicular à direção longitudinal da barra, tendendo a formar um único domínio próximo a esta direção quando uma tensão de compressão muito grande é aplicada. Ou seja, ela exerce uma força que dificulta o alinhamento dos momentos magnéticos na direção do campo magnético aplicado longitudinal à barra.

Os momentos magnéticos iniciam o movimento na direção do campo magnético somente quando a força supera a tensão de compressão. Sem a aplicação de tensão de compressão, os domínios estão orientados nas direções de fácil magnetização e nem todos os momentos estão perpendiculares à direção longitudinal da barra.

Tabela 1 - Magnetostricção para vários valores de tensão de compressão para a liga de FeAlB na região de saturação.

Magnetostricção (ppm)	Tensão mecânica aplicada (MPa)				
	16	48	80	112	144
Medida 1	65,5	75,4	68,0	60,3	58,1
Medida 2	65,5	73,9	73,4	59,2	60,5
Medida 3	62,6	73,8	74,5	57,4	60,8
Medida 4	64,0	73,1	75,9	60,9	56,1
Medida 5	66,2	72,7	74,4	60,8	57,3
Medida 6	61,6	72,3	74,5	61,0	57,4
Medida 7	63,1	73,1	75,1	61,5	60,7
Medida 8	61,0	72,1	71,1	66,3	61,5
Medida 9	64,1	72,3	73,1	62,4	62,4
Medida 10	65,7	72,0	71,0	63,0	61,0
Medida 11	65,8	71,3	75,3	63,5	63,6
Medida 12	67,0	70,3	70,9	61,6	63,7
Média	64	72	74	62	60
Desvio padrão	2	1	2	2	2

Dessa forma, ao se aplicar o campo magnético longitudinal em um material que está submetido à compressão, um número maior de momentos magnéticos irá rotacionar para a direção paralela ao campo, causando uma maior deformação do elemento magnetostrictivo.

Entretanto, tensões de compressão acima de 80 MPa causam a diminuição da magnetostricção. Este comportamento já havia sido reportado na literatura para uma liga de GALFENOL (24,7% e 29% de gálio), entretanto, não existe uma explicação para esse fenômeno. Assim sendo, existe uma tensão de compressão ótima que pode ser aplicada para aumentar a magnetostricção ^[24].

A Figura 60 mostra as curvas de indução magnética em função da tensão de compressão para vários campos magnéticos aplicados (tensão/corrente). Pode-se observar que há a redução da indução magnética com o aumento da tensão de compressão e esta propriedade é indicativo do potencial do material para ser utilizado como sensor de força.

Figura 60 - Indução magnética em função da tensão de compressão, para diferentes voltagens (correntes; campo magnético) nas bobinas de excitação.

Para a situação onde não há aplicação de tensão de compressão, após a saturação magnética do material em estudo, os momentos magnéticos tendem a permanecer alinhados ao campo magnético. Entretanto, se a aplicação da compressão superar a força causada pelo campo magnético, ela tenderá a desviar os momentos magnéticos da direção paralela à direção do campo, causando consequentemente a diminuição da magnetização.

Observa-se que para altos valores de voltagem (campo magnético), por volta de 35 V, a magnetização praticamente não muda, mesmo para altos valores de tensões de compressão, variando de 1,67 T (sem compressão nenhuma) para 1,37 T (para 157 MPa).

Isso ocorre, pois a força exercida pelo campo magnético gerado pelas bobinas de excitação é suficientemente forte e possibilita apenas uma pequena rotação dos momentos com componente na direção perpendicular ao campo. Cabe lembrar que esta dificuldade de movimentação dos momentos está associada ao aprisionamento das paredes de domínio, por exemplo, pela fase Fe_2B e à energia anisotrópica da fase que contém Fe e Al, mostrada na Figura 5.

Entretanto, para que a liga em estudo seja utilizada em aplicações como sensores é desejável que esta mudança seja a maior possível. Para quantificar esta variação, derivaram-se as curvas de magnetização em função da tensão de compressão, para determinar a sensibilidade do material, ou seja, o valor da variação da indução magnética em função da variação da tensão de compressão. As curvas das sensibilidades para todas as voltagens (campo magnético) aplicadas são mostradas na Figura 61.

Figura 61 - Sensibilidade da liga de FeAlB para diferentes voltagens de excitação (campos magnéticos).

Quanto maior for o valor da sensibilidade, maior será a variação da indução magnética medida pela bobina de captura quando a amostra for comprimida por alguma tensão de compressão. Entretanto, não é possível utilizar uma única voltagem de excitação para medir todas as tensões de compressão.

Assim, a Figura 61 é muito importante para a aplicação do material em estudo, pois mostra qual deve ser a tensão elétrica ótima para cada faixa de tensão de compressão.

Além disso, para a liga de FeAlB, quanto maior for a tensão de compressão, menor é a sensibilidade máxima da liga. Dessa forma, pode-se afirmar que essa liga tem uma maior sensibilidade para ser utilizada em menores tensões de compressão.

4.3.2. GALFENOL

Com o objetivo de ter uma comparação direta entre as propriedades piezomagnéticas do material FeAlB e o GALFENOL, foram realizadas as mesmas caracterizações realizadas na liga de FeAlB, utilizando-se o mesmo dispositivo e nas mesmas condições.

A Figura 62 mostra as curvas de magnetização para o GALFENOL, sobre diferentes tensões de compressão.

Figura 62 - Magnetostrição do GALFENOL em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).

De maneira análoga à liga de FeAlB, a magnetostrição de saturação foi calculada através da média dos valores de magnetostrição de saturação para voltagens aplicadas entre -30 e -35 V, sendo estes valores mostrados na Tabela 2.

Tabela 2 - Magnetostricção para vários valores de tensão de compressão para a liga de GALFENOL na região de saturação.

Magnetostricção (ppm)	Tensão mecânica aplicada (MPa)					
	0	15	30	45	60	80
Medida 1	208	214	221	208	203	172
Medida 2	209	214	220	209	200	168
Medida 3	208	213	220	210	199	165
Medida 4	209	214	220	207	195	163
Medida 5	210	213	224	206	197	162
Medida 6	210	214	223	205	197	157
Medida 7	208	211	222	209	202	169
Medida 8	210	213	221	206	199	170
Medida 9	207	211	222	209	200	164
Medida 10	210	215	221	208	197	161
Medida 11	211	215	224	210	197	161
Medida 12	209	217	223	208	197	158
Média	209	214	222	208	198	163
Desvio padrão	1	2	1	2	2	4

A Figura 63 mostra a indução magnética do GALFENOL em função da voltagem aplicada (campo magnético) para diferentes tensões de compressão.

Figura 63 - Indução magnética do GALFENOL em função da voltagem (campo magnético) para diferentes tensões de compressão (taxa de 1 V/s).

O valor da magnetostricção sem aplicação de compressão obtida para o GALFENOL foi em média de 209 ± 1 ppm. Observa-se que para valores de tensão compressiva acima de 45 MPa não é possível atingir a saturação da magnetostricção nem da indução magnética, mesmo utilizando à voltagem máxima nas bobinas de excitação de 35 V. A empresa ETREMA forneceu o valor para a magnetostricção do GALFENOL de 227 ppm com um campo magnético de 40 kA/m e tensão de compressão de 48 MPa. O valor máximo que obtivemos foi de 210 ± 2 ppm para a tensão de compressão de 45 MPa. O nosso resultado é próximo ao fornecido pelo fabricante do GALFENOL considerando que no nosso caso para 45 MPa a magnetostricção ainda não saturou. A não saturação do material está associado ao fato de que o campo magnético associado a 35 V no nosso caso é menor que 40 kA/m.

A Figura 64 mostra a comparação das curvas de magnetostricção para a liga de GALFENOL e do FeAlB.

Figura 64 - Comparação entre a magnetostricção do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direita), para várias tensões de compressão.

Observa-se que as curvas de magnetostricção do GALFENOL apresentam baixo ruído quando comparadas a do FeAlB. Possivelmente, o ruído é o mesmo para ambas as amostras, entretanto, a relação ruído/sinal é maior para a amostra de FeAlB, deixando a curva com uma aparência pior que a do GALFENOL.

Como já esperado, os valores de deformação para o GALFENOL foram muito superiores aos do FeAlB, porém a amostra de FeAlB conseguiu saturar mesmo para altíssimos valores de tensão de compressão (144 MPa), sem apresentar nenhum patamar linear no início do ensaio.

Já o GALFENOL, não conseguiu saturar para tensões maiores que 60 MPa e as curvas apresentam uma "resistência" (mostrada como um patamar linear) no início da aplicação do campo magnético. Isto significa que a anisotropia magneto cristalina do GALFENOL é bem mais alta que da liga de FeAlB estudada neste trabalho, pois o GALFENOL necessita de campos magnéticos muito mais altos para saturar, para um mesmo valor de tensão de compressão aplicada. Em primeira análise, este não poderia ser um efeito de aprisionamento das paredes de domínio já que o GALFENOL é em princípio monofásico e a liga de FeAlB apresenta a segunda fase Fe_2B .

A Figura 65 mostra a comparação entre os valores de indução magnética do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direita), para diferentes tensões de compressão.

Figura 65 - Comparação entre a indução magnética do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direita), para várias tensões de compressão.

De maneira semelhante aos gráficos da magnetostricção, é observado um patamar linear no início da magnetização do GALFENOL, entretanto, esse comportamento não foi observado para a amostra de FeAlB. Isso indica mais uma vez que a anisotropia magneto cristalina desta liga é menor que a do GALFENOL. De fato, na Figura 5, o valor máximo da constante anisotrópica para o FeAl com 20% de Al, é de 20 kJ/m^3 , podendo diminuir dependendo do grau de ordenamento da amostra. Já o GALFENOL apresenta uma constante anisotrópica de $\sim 35 \text{ kJ/m}^3$ para a liga com 18% de Ga^[30].

A Figura 66 mostra a comparação entre as curvas de indução magnética em função das tensões de compressão, para a amostra de GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direita).

Figura 66 - Comparação da variação da indução magnética pela compressão, do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão.

Observa-se que, para as mesmas tensões elétricas, a tensão de compressão tem uma influência maior na liga de GALFENOL do que para a liga de FeAlB.

Isso pode ser observado quando comparamos a diferença dos valores da indução magnética com 0MPa e 80MPa.

Para verificar a o real potencial dessas ligas em aplicações sensoriais, as curvas da Figura 66 foram derivadas, gerando assim os valores de sensibilidade de cada liga, como mostra a Figura 67.

Figura 67 - Comparação da sensibilidade do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direta), para várias tensões de compressão.

Ao contrário do FeAlB, a sensibilidade do GALFENOL se manteve praticamente constante para todas as tensões de compressão.

Pode-se observar que a amostra de GALFENOL obteve uma sensibilidade maior do que o da liga de FeAlB para tensões de compressão menores que 10 MPa.

Entretanto, a partir de 10 MPa, a sensibilidade de ambas as amostras são bem próximas, como mostra a Figura 64. Acima de 10 MPa a sensibilidade do GALFENOL foi da ordem de 0,020 T/MPa (0,16 A.m/N) e da liga de FeAlB foi de 0,012 T/MPa (0,09 A.m)/N).

Figura 64 - Comparação da sensibilidade do GALFENOL (esquerda) e do FeAlB (direita), para tensões de compressão maiores que 10 MPa.

Se analisarmos que esse foi o primeiro levantamento de ensaios quase estáticos da liga de FeAlB obtida por solidificação direcional, pode-se afirmar que a liga de FeAlB tem grande potencial para aplicações sensoriais, já que a liga utilizada neste trabalho, $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{98}\text{B}_2$, não é a que apresenta os maiores valores de magnetostricção ^[4].

Já é conhecido que a liga $(\text{Fe}_{0,8}\text{Al}_{0,2})_{97}\text{B}_3$ é a que apresenta os maiores valores de magnetostricção, portanto, a utilização da liga com a melhor composição e o processamento adequado, utilizando solidificação direcional a fim de gerar textura na direção de fácil magnetização, poderá aperfeiçoar as propriedades deste material ^[4].

4.4 APRIMORAMENTOS NECESSÁRIOS NA DETERMINAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

Observa-se nas curvas de magnetização, que a permeabilidade relativa dos materiais é modificada com a variação das tensões mecânicas, isso significa que conforme a tensão de compressão aumenta, a susceptibilidade magnética diminui e o campo interno na amostra não é verdadeiramente constante e diminui gradativamente à medida que a tensão aumenta.

Dessa forma, seria necessária a correção do campo magnético durante o ensaio, através da modificação da corrente nas bobinas de excitação, garantindo um campo magnético constante durante o ensaio.

Outra observação importante está relacionada com a variação da tensão de compressão durante os ensaios. Durante a aplicação do campo magnético, a amostra modifica as suas dimensões e consequentemente a força aplicada, dessa forma, é necessário uma máquina de ensaios que consiga compensar essa variação e manter constante a força aplicada.

Inicialmente, iria-se usar a máquina de ensaios universal MTS para aplicar a força de compressão durante os ensaios quase estáticos, já que a mesma consegue manter constante a força aplicada, entretanto, devido a problemas técnicos no equipamento, foi utilizado a EMIC (que não consegue fazer esse tipo de correção). Por isso, durante os ensaios, foi observado variações de até 100N que corresponde a ~ 3 MPa. Portanto, a utilização da máquina MTS tornaria as medidas mais precisas.

Nos trabalhos futuros, iremos realizar simulações computacionais utilizando o software COMSOL, para tentar aperfeiçoar o nosso transdutor e calcular o campo magnético dentro do dispositivo. Não foi possível realizar a simulação neste trabalho, entretanto, já se iniciou alguns mapeamentos do nosso dispositivo.

A Figura 68 mostra o desenho (com a mesma dimensão do dispositivo real) utilizado na simulação computacional utilizando o COMSOL e os materiais utilizados nos dados de entrada.

Considerou-se que as bobinas (a) eram feitas de cobre e a atmosfera (d) de ar. Como não temos os dados de entrada suficiente para simular o GALFENOL e o FeAlB, os dados do núcleo magnético (b) e do elemento magnetostrictivo (c) foram iguais ao do ferro puro.

Figura 68 - Desenho em 3 dimensões utilizado para a simulação computacional utilizando o software COMSOL. Consideraram-se as bobinas (a) de cobre, o núcleo magnético (b) e o elemento magnetostrictivo (c) de ferro puro e a atmosfera de (d) de ar.

Como estávamos interessados no campo magnético dentro do dispositivo, utilizou-se uma malha fina no núcleo magnético e no elemento magnetostrictivo, como mostra a Figura 69.

Figura 69 - Malha fina utilizada na simulação computacional.

A partir das condições descritas acima e utilizando uma condição estacionária, realizou-se a primeira simulação computacional da distribuição do campo magnético no transdutor (Figura 70), onde os campos maiores (acima de 1,3 T) são representados na cor vermelha e os menores (abaixo de 0,5 T) na cor azul.

Figura 70 - Mapeamento magnético indicando a densidade de fluxo (T) no circuito magnético.

5. PROXIMOS PASSOS

- Simulação computacional do campo magnético no transdutor.
- Correção do campo magnético interno da amostra durante os ensaios quase-estáticos.
- Utilização de uma máquina universal de ensaios mecânicos que mantenha a força aplicada constante durante os ensaios.
- Realização dos ensaios quase-estáticos sobre tensões de tração, ao invés de compressão.
- Realização de ensaios dinâmicos (tensão mecânica oscilante).

6. CONCLUSÃO

No presente trabalho foi construído com sucesso um transdutor capaz de medir variações de magnetização (M) e magnetostricção (λ) em materiais ferromagnéticos macios (doces) em função de campo magnético aplicado (H) (voltagem - V) e tensões mecânicas (σ).

O sistema permite medir curvas de M vs V e λ vs V para σ constante e também M vs σ e λ vs σ para V constante. Especialmente, a partir das curvas M vs σ para V constante e λ vs V para σ constante, pode-se obter a sensibilidade do material para atuar como sensor, $\frac{dM}{d\sigma}\bigg|_V$ ou ainda como atuador $\frac{d\lambda}{dV}\bigg|_\sigma$. Ou seja, a partir de agora, além de desenvolver novos materiais magnetostrictivos, teremos como efetivamente medir o potencial de aplicação destes para serem usados como sensores e atuadores, dependendo do caso.

Para o desenvolvimento do transdutor foi necessária a montagem do módulo de medida de magnetostricção por extensometria. O sistema de medidas disponível anteriormente, o dilatômetro de capacitância, permitia somente a medição de amostras pequenas e de formato limitado, sem acesso para aplicação de força. Cabe ressaltar que este módulo do transdutor já foi usado pelo aluno Vagner de Oliveira Machado em sua dissertação de mestrado defendida em janeiro de 2014 ^[27].

Com o transdutor construído foi possível caracterizar um material desenvolvido pelo nosso grupo, uma liga de FeAlB para avaliar o real potencial deste material e comparar com o GALFENOL. Ambas as ligas apresentam sensibilidades $\frac{dM}{d\sigma}\bigg|_V$ bem próximas acima de 10 MPa. A sensibilidade do GALFENOL foi da ordem de 0,020 T/MPa (0,16 A.m/N) e da liga de FeAlB foi de 0,012 T/MPa (0,09 A.m/N).

Considerando que a liga de FeAlB não é a liga com as melhores propriedades neste sistema, há um campo para a continuidade de desenvolvimento deste material, utilizando-se a composição adequada e também o processamento adequado para o desenvolvimento de textura no material.

REFERÊNCIAS

1. WALKER, T. **Sensing behavior of GALFENOL (FeGa) alloys under dynamic conditions**. [S.l.]: The Ohio State University. 2011.
2. ARJUR, M. **Force and torque sensing with GALFENOL alloys**. [S.l.]: The Ohio State University. 2009.
3. KLEINKE, D.; URAS, M. H. A magnetostrictive force sensor. **Review of Scientific Instruments**, v. 65, p. 1699, 1994.
4. BORMIO-NUNES, C.; DIAS, M. B.; GHIVELDER, L. High magnetostriction of the polycrystalline alloy ($\text{Fe}_{0.8}\text{Al}_{0.2}$). **Journal of Alloys and Compounds**, v. 574, p. 467-471, 2013.
5. ROTTER, M. et al. A miniature capacitance dilatometer for thermal expansion and magnetostriction. **Review of Scientific Instruments**, v. 69, p. 2742, 1998.
6. JOULE, J. P. **On a new class of magnetic forces**. Manchester: [s.n.]. 1841.
7. MEI, W.; OKANE, T.; TAKATERU, U. Magnetostriction of Tb-Dy-Fe crystals. **Journal of Applied Physics**, v. 84, p. 6208, 1998.
8. MAGNETIC properties of metals: d-elements. Berlin: Verlag, 1991.
9. Alfa aesar. Disponível em: <<http://www.alfa.com/EN/GP140W.PGM>>. Acesso em: 05 jul. 2013.
10. WUN, F. Magnetostriction of stress-annealed Fe-Ga and Fe-Ga-Al alloys under compressive and tensile stress. **Journal of Intelligent Material Systems and Structure**, v. 17, p. 117, 2006.
11. KELLOGG, R. A. et al. Quasi-static transduction characterization of GALFENOL. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 16, p. 471, 2005.
12. CULLEN, J.; ZHAO, P.; WUTTING, M. Anisotropy of crystalline ferromagnets with defects. **Journal of Applied Physics**, v. 101, p. 123922, 2007.
13. CLARK, A. E. et al. Extraordinary magnetoelasticity and lattice softening in bcc Fe-Ga alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 93, p. 8621, 2003.
14. RUFFONI, M. P. et al. Direct measurement of intrinsic atomic scale magnetostriction. **Physical Review Letters**, v. 101, p. 147202, 2008.
15. PADUANI, C.; BORMIO-NUNES, C. Density functional theory study of Fe_3Ga .

- Journal of Applied Physics**, v. 109, p. 33705, 2011.
16. HALL, R. C. Single crystal anisotropy and magnetostriction constants of several ferromagnetic materials including alloys of NiFe, SiFe, AlFe, CoNi, and CoFe. **Journal of Applied Physics**, v. 30, p. 816, 1959.
 17. CHIKAZUMI, S. **Physics of Ferromagnetism**. [S.l.]: Oxford science publications.
 18. MEHMOOD, N. et al. Magnetostriction of polycrystalline Fe_{100-x}Al_x (x=15, 19, 25). **Journal of Magnetism and Magnetic Materials**, v. 322, p. 1609-1612, 2010.
 19. BORMIO-NUNES, C. et al. Magnetostriction of the polycrystalline Fe₈₀Al₂₀ alloy doped with boron. **Journal of Alloys and Compounds**, v. 539, p. 226-232, 2012.
 20. CLARK, A. E. et al. Temperature dependence of the magnetostriction and magnetoelastic. **Journal of Applied Physics**, v. 103, p. 07B310, 2008.
 21. CLARK, A. E. et al. Magnetostriction of ternary Fe–Ga–X (X = C,V,Cr,Mn,Co,Rh) alloys. **Journal of Applied Physics**, v. 101, p. 09C507, 2007.
 22. GAO, X. et al. Effect of B and Cr on mechanical properties. **Materials Transactions**, v. 50, p. 1959-1963, 2009.
 23. MAHADEVAN, A.; EVANS, P. G.; DAPINO, M. J. Dependence of magnetic susceptibility on stress in textured polycrystalline Fe_{81.6}Ga_{18.4} and Fe_{79.1}Ga_{20.9} GALFENOL alloys. **Applied Physics Letters**, v. 96, 2010. ISSN doi:10.1063/1.3280374.
 24. ATULASIMHA, J.; FLATAU, A. B.; CULLEN, J. R. Analysis of the effect of gallium content on the magnetomechanical behavior of single-crystal FeGa alloys using an energy-based model. **Smart Materials and Structure**, 17, 2008. 8.
 25. STIER, H. **Fuel injection valve**. US 6,631,854 B1, 03 ago. 2000.
 26. Central de Núcleos Siliciosos. Disponível em: <<http://cnscores.com>>. Acesso em: 12 Jun. 2014.
 27. MACHADO, V. D. O. **Estudo das propriedades magnetostrictivas da liga (Fe_{0,80}Al_{0,20})97B3**. Escola de Engenharia de Lorena - USP. Lorena. 2013.
 28. PACHECO, C. J. **Sensores de campo magnético à fibra óptica com redes de Bragg**. [S.l.]. 2011.
 29. HOW is temperature affecting your strain measurement accuracy? Disponível em:

<www.ni.com>. Acesso em: 22 jun. 2011.jun. 2011.

30. RAFIQUE, S. **Magnetic anisotropy of Fe_{1-x}Ga_x alloys**. [S.l.]: University of Maryland. 2003.
31. CHOOSING the right strain-gauge for your application. Disponível em: <www.ni.com>. Acesso em: 06 jul. 2006.
32. METAL strain gauges. Disponível em: <www.ni.com>, Acesso em: 13 abr. 2009.
33. MEASURING strain with strain gages. Disponível em: <www.ni.com>. Acesso em: 28 set. 2012.
34. STRAIN gauge configuration types. Disponível em: <www.ni.com>. Acesso em: 06 out. 2006.

Figura 72 - Diagramas de fluxo referentes à aquisição (A), organização (B) e exibição (C) dos dados. O diagrama mostrado em (D) foi utilizado para apagar os gráficos entre os ensaios quase estáticos.

A seguir, será mostrado o diagrama de fluxo do programa que controlava a fonte de corrente (Figura 41). A Figura 73 mostra como o programa calcula o tempo de subida até a voltagem máxima ("Tempo 1") e o tempo de descida até a voltagem final ("Tempo 2"), assim, o número total de iterações que o programa irá realizar é a somatório dos tempos.

Figura 73 - Diagrama de fluxo referente ao cálculo do tempo de subida até a voltagem máxima e de descida até a da voltagem final.

Através da variável "Voltagem inicial", o valor da tensão elétrica desejada é enviado para a fonte de corrente, como mostra a Figura 74.

Figura 74 - Diagrama de fluxo que envia o valor da tensão elétrica desejada para a fonte de corrente.

O valor numérico da "Voltagem inicial" é somado ou subtraído da taxa ("Taxa"), dependendo da resposta gerada pela condição mostrada no retângulo vermelho. Este diagrama de fluxo é mostrado na Figura 75.

Figura 75 - Diagrama de fluxo que controla a subida da tensão elétrica nas bobinas de excitação.

Quando o número de iterações que ocorreram ("Interacões") for menor que o tempo necessário para atingir a tensão elétrica máxima ("Tempo 1"), a condição mostrada no retângulo vermelho não é satisfeita e a resposta é falsa ("False"), assim, o valor numérico da variável "Voltagem inicial" será somada do valor atribuído à variável "Taxa" e a tensão elétrica nas bobinas de excitação irá aumentar.

Entretanto, quando o número de iterações ("Interacões") for maior que o tempo necessário para atingir a tensão elétrica máxima ("Tempo 1"), a resposta será verdadeira ("True") e o valor numérico da "Voltagem inicial" será subtraído da variável "Taxa", diminuindo a tensão elétrica nas bobinas de excitação. O diagrama de fluxo para a condição verdadeira ("True") está mostrado na Figura 76.

Figura 76 - Diagrama de fluxo que controla a descida da tensão elétrica nas bobinas de excitação.