

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

**Caracterização e Monitoramento Remoto  
Aplicado a um Sensor Magnetoelástico**

**Alessandra Felizari**

Dissertação para obtenção do título de mestre em Tecnologia e  
Ciência dos Materiais  
Área de concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre, 2016.

**Alessandra Felizari**

**Caracterização e Monitoramento Remoto  
Aplicado a um Sensor Magnetoelástico**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais – PPGEM, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Thomas Gabriel Rosauo Clarke,  
PPGEM-UFRGS, Brasil.

Porto Alegre, 2016.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Rui Vicente Oppermann

ESCOLA DE ENGENHARIA

Diretor: Prof. Dr. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Vice-diretor: Carla Schwengber ten Caten

Programa de pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de  
Materiais PPGEM

Coordenador: Prof. Dr. Carlos Pérez Bergmann

Coordenador substituto: Prof. Dr. Afonso Reguly

Alessandra Felizari

**Caracterização e Monitoramento Remoto  
Aplicado a um Sensor Magnetoelástico**

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

---

Prof. Dr. Thomas G. R. Clarke

---

Prof. Dr. Telmo R. Strohaecker

Banca examinadora:

Prof. Dr. Jeferson Vieira Flores – UFRGS - Porto Alegre, Brasil

Dr. Ricardo Callegari Jacques – UFRGS - Porto Alegre, Brasil

Dr. Toni Roger Schifelhain de Lima – UFRGS - Porto Alegre, Brasil

## DEDICATÓRIA

Dedico ao meu avô, um homem audaz, positivo, multidisciplinar, que foi uma grande inspiração.

Ao meu pai, por me estimular a curiosidade científica.

À Camila e à minha mãe que sempre com palavras doces, transmitiram-me força.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador Prof. Thomas, que disponibilizou a grande oportunidade de me inserir no laboratório, e que durante essa trajetória depositou confiança sobre mim com muita paciência. Sem dúvida esse período foi de grande formação para a minha experiência cognitiva e interpessoal.

Agradecer ao Prof. Telmo (in memoriam) pela oportunidade de bolsa, o qual, pelo histórico e atual prestígio em âmbito nacional e internacional, proporcionou com maestria soluções inovadoras em projetos de pesquisas e serviços, que unem uma equipe multidisciplinar dentro do LAMEF.

A motivação diária, eu devo à Prof. Alina, que admiro muito, e que disponibilizou de um grandioso apoio técnico. Sou grata pelas variadas experiências culturais compartilhadas, que sempre me trouxeram palavras alegres, acolhedoras e de luta.

Ao Ricardo, parceiro de projeto que me acrescenta muita experiência técnica, e que ao longo deste período revelou-se um grande amigo.

A todos os colegas do LAMEF e do grupo GEND, pelo convívio diário e troca de experiências. Mas principalmente aos que contribuíram no desenvolvimento deste projeto, Allan, Thiago, Pará, Giovanni, Henrique, Ale Xará, João, Sonaldo, Montana e Lúcio, Alberto, Conrado e Vanessa.

Aos meus amigos, que me incentivaram e deixaram a vida mais leve durante essa caminhada.

Acredito que as implicações do conhecimento científico precisam ser dedicadas ao povo. O que me motiva na pesquisa científica é ter a possibilidade de responder algumas destas perguntas.

*“queremos saber  
o que vão fazer  
com as novas invenções  
queremos notícia mais séria  
sobre a descoberta da antimatéria  
e suas implicações  
na emancipação do homem  
das grandes populações  
homens pobres das cidades  
das estepes, dos sertões (...)”  
(GIL, Gilberto)*

## RESUMO

Uma vasta gama de sensores são aplicados no mercado atual na busca pela melhoria de processos e produtos. Há um grande crescimento em novos sistemas que possam apresentar recursos que técnicas convencionais não apresentam. A busca por uma nova plataforma de sensoriamento surge a partir do interesse em identificar e controlar parâmetros ambientais isolados. Esta pesquisa em área incipiente no Brasil mostra o desenvolvimento de um sensor a partir de um material inteligente (*smart material*), que por definição, possui uma ou mais propriedades que podem sofrer mudanças significativas a partir de um estímulo externo. O presente trabalho é baseado na investigação de uma fita de material magnético amorfo, que ao exibir propriedades magnéticas e elásticas pelo efeito da magnetostricção, permite o monitoramento remoto de fenômenos físico-químicos do ambiente em que estiver exposta. O desenvolvimento deste sensor tem finalidade no monitoramento sem fio de solicitação mecânica, e alteração do tipo de fluido presente em um dado ambiente. O estudo e avaliação do sensor contou com técnicas de caracterização experimentais e de simulação. São apresentados sistemas e ensaios capazes verificar as ressonâncias do modo de vibração puro da amostra a partir de medidas ópticas e elétricas, quando submetidos a variação de fenômenos físicos. Os resultados indicam a dependência do efeito direto ao estímulo na ação externa do campo magnético em decorrências das características do material.

Os resultados quantificados e qualificados na correlação entre os métodos utilizados, justificam a aplicação do *smart material* no sensoriamento de viscosidade e carregamento aplicado em ambientes isolados. Em consequência das discussões apresentadas para as curvas comportamentais na variação dos parâmetros físico-químico a plataforma de sensoriamento é validada.

Palavras-chave: sensor magnetostrictivo; materiais ferromagnéticos; caracterização óptica; caracterização elétrica; frequência de ressonância; sensor de viscosidade; sensor sem fio; sensor de filme fino



## ABSTRACT

New amorphous magnetic materials have magnetic and elastic properties which allows the identification and control of environmental parameters remotely. This work was based in the investigation of a magnetoelastic thin strip, widely used as anti-theft device. In this study it was discussed the employment of this material as a sensor capable identify an environmental change through magnetoelasticity. In order to characterize the strips it was employed several techniques, namely: finite element modeling of the vibrational modes, electromagnetic impedance and laser interferometry. It was presented an analysis of the displacement of the longitudinal modes. The knowledge of the vibration mode allowed the sensor electric characterization when subjected to environmental changes. According to the sample dimensions under magnetic field, test systems were developed in order to perform optic and electric measurements. A proper parameter adjustment of the power supply allowed the determination of the fundamental and higher order resonance frequencies. The magnetostrictive behaviour of the anti-theft strips is related to the Young modulus where the vibration frequency is inversely proportional to the length of the strip. Studies showed that the strip performance is also related to many other parameters, such as the mechanical and electromagnetic properties and the environment to which it is exposed. The strips here presented are largely employed as sensor for temperature, pressure, density, mas variation, viscosity and flux velocity mainly because their wireless capabilities. The data from the polarization field are a section of the knowledge required to better investigate the best performance of the sensor. The sensor characterization through several techniques applied in viscous media and under pressure raise some issues. However, the construction of some devices allowed the application of different values of viscosity and pressure upon the magnetized strip. This made the results interpretation less complex. The resonances were observed in the experimental data and mathematical modellin. Calibration curves were defined to make the results interpretation easier. Previously applied and studied techniques which cover the characterization and behaviour of the material provide valid justifications for the implementation of remote sensors made of amorphous metallic strips. The results presented here justify the application of the analysed amorphous strip as a viscosity and pressure sensor in isolated enviroments

Keywords: magnetostrictive sensor, ferromagnetic materials, optical characterization, electric characterization, resonance frequency, viscosity sensor, wireless sensor, thin film sensor.

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

T	é a tensão mecânica
c	constante rigidez elástica,
$c^H$	constante rigidez elástica com H constante
e	constante piezomagnética efetiva
$\mu^S$	constante permeabilidade com S constante
$\epsilon_{cc}$	deformação com campo magnético estático
$\vec{H}_{cc}$	campo magnético estático
$\vec{B}_{cc}$	indução sob campo magnético estático
$S^H$	matriz de compliance elástica com campo magnético constante
D	matriz do acoplamento magnetomecânico constante usada como propriedade do material
d	matriz do acoplamento magnetomecânico constante usada como propriedade do material
$\epsilon_{ca}$	deformação com campo magnético dinâmico
$\vec{H}_{ca}$	campo magnético dinâmico
$\vec{B}_{ca}$	indução sob campo magnético dinâmico
$D^T$	matriz transposta do acoplamentomagneto mecânico constante usada como propriedade do material
$d^T$	matriz transposta do acoplamentomagneto mecânico constante usada como propriedade do material
$T_{cc}$	tensão mecânica sob campo magnético estático
$T_{ca}$	tensão mecânica sob campo magnético dinâmico
$\mu_\sigma$	permeabilidade magnética em tensão constante, matriz de permeabilidade magnética
B	densidade de fluxo magnético tesla (T), ou weber por metro quadrado ( $Wb/m^2$ )
H	campo magnético àmpere por metro (A/m) ou oersted (Oe).
$\mu$	permeabilidade $4\pi \cdot 10^{-7} H/m$
$B_0$	densidade do fluxo no vácuo
E	campo elétrico
D	são e deslocamento elétrico
J	densidade de corrente.
$\vec{A}$	vetor de potencial magnético
$\vec{B}$	densidade de fluxo
$\mu_r$	permeabilidade relativa
$\mu_0$	permeabilidade no vácuo

M	magnetização
$\chi_m$	susceptibilidade magnética adimensional
$\epsilon$	constante permissividade do meio
$\sigma$	condutividade elétrica do meio constante de
T	é a tensão mecânica
c	constante rigidez elástica,
$c^H$	constante rigidez elástica com H constante,
e	constante piezomagnética efetiva
$\mu^S$	constante permeabilidade com S constante
$R \pm j X$	em coordenadas retangulares
$ Z , \theta$	magnitude da impedância elétrica e ângulo de fase
$\omega L$	reatância
$R_s$	resistência do enrolamento.
$C_p$	capacitância parasita
SRF	self-resonant frequency
$L_m$	indutância medida
Q	fator de qualidade ou mérito
$X_L$	reatância indutiva
$X_C$	reatância capacitiva
L	indutor
C	capacitor
R	resistor
$\omega$	frequência angular
f	frequência
$Z_s$	impedância elétrica da fonte
J	número imaginário
M	mútua indutância
i	corrente elétrica
$f_\xi$	frequência de ressonância de uma oscilação amortecida de uma fita livre
$R_e$	resistência dada pelas correntes parasitas
$L_s$	indutância desacoplada
$Z_m$	impedância de movimento componente complexa de movimento referente à impedância
$Z_{\text{sensor}}$	impedância do sensor ME ao subtrair a impedância da bobina sensora
k	coeficiente de acoplamento magnético
$\omega_0$	frequência natural
$\omega$	frequência de ressonância
$\xi$	coeficiente de amortecimento
$L_s$	indutância desacoplada
$\Delta\omega$	pequena banda de frequências

$l$	comprimento
$\lambda$	comprimento de onda mecânica
$v$	velocidade de grupo de uma onda longitudinal acústica
$E$	módulo de elasticidade
$\rho$	densidade
$\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$	vetores unitários
$H_z$	campo magnético ao longo da direção z
$B_z$	indução magnética ao longo da direção z
$f^B$	frequência onde a indução B é constante
$E_H$	módulo de Young do sensor magnetostricção sob um campo magnético
$E_M$	módulo de Young sem o efeito do campo externo
$H_{A\sigma}$	campo magnético reduzido de anisotropia
$\lambda_s$	saturação da magnetostricção
$M_s$	saturação da magnetização
$f_H$	frequência de ressonância do sensor sob campo magnético
$f_1$	frequência de ressonância do sensor sem efeito de um campo magnético externo
$\mu_0$	permeabilidade $4\pi 10^{-7} \frac{H}{m}$
$n$	número de voltas da bobina
$r$	raio da bobina
$h_0$	campo magnético uniforme caso limite para interpolação nula
$b_0$	indução uniforme caso limite para interpolação nula
$\mu_\sigma$	permeabilidade com tensão constante
$f_r'$	frequência próxima da ressonância
$H_{CC_{\min}}$	campo magnético estático de polarização mínimo
$H_a$	campo de anisotropia
$f_r$	frequência de ressonância
$f_a$	frequência de anti-ressonância
MEF	método de elementos finitos
$I_{cc}$	corrente contínua/corrente de polarização
$I_{ca}$	corrente alternada
$x, y, z$	direções x, y, z

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Características e propriedades gerais do Metglas®2826MB3 (METGLAS, 2013).....	29
Tabela 2 MEF características da malha.....	59
Tabela 3 Valores de Freq. fundamental, 3ª harmônica e banda para os meios ar, água e óleo submetidos à uma pequena variação de campo estático .....	88
Tabela 4 Variabilidade das quatro fitas em função do coeficiente de acoplamento magnetoelástico e velocidade do som nos três meios empregados .....	90
Tabela 5 Ressonâncias em torno da terceira harmônica, sem carregamento para meios diferentes .....	92

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Dependência da magnetostricção no campo magnético (escala do H é logarítmica) (CULLITY, GRAHAM 2009) .....	25
Figura 2 Curva de magnetização para metais de transição em função da temperatura de Curie. (KITTEL, 2006) .....	27
Figura 3 Esquemático da deformação e deslocamento para a) frequência de ressonância, b) frequência < frequência de ressonância, c) frequência > frequência de ressonância (ZHANG et al, 2013).....	32
Figura 4 Circuito equivalente elétrico disponível no analisador de impedâncias (HARUTA, 2000) .....	34
Figura 5 Resposta em frequência típica de um indutor (HARUTA, 2000) .....	35
Figura 6 Circuito elétrico equivalente composto por fonte e bobina indutivamente acoplada com sensor ME (CHAI et al, 2013) .....	36
Figura 7 Velocidade do som (círculo preenchido) e coeficiente de acoplamento (círculo vazado) de uma fita sensora Metglas <sup>TM</sup> 2826 M em função de um campo magnético de polarização aplicado. (SCHMIDT, 2000). .....	39
Figura 8 Frequência de ressonância Metglas 2826 MB em função do campo magnético estático aplicado com dimensões de 38.1mm x 12.7mm x 30.5µm. (SCHMIDT, 2000) .....	40
Figura 9 Esquema de representação do deslocamento para uma corrente elétrica em baixa frequência de operação para um transdutor de Terfenol-D (HALL, 1994) .....	41
Figura 10 Calibração da frequência de ressonância em função do comprimento do sensor (SHEN, 2010) .....	44
Figura 11 Esquemático do setup experimental de medida da frequência de ressonância de um sensor magnetoelástico através de dispositivos que medem vibrações. Adaptada de (SCHMIDT, GRIMES, 2001) .....	46
Figura 12 Resposta transiente do sinal de saída da interação do sensor ME com a bobina sensora (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000) .....	47
Figura 13 Frequência de ressonância 2826MB de dimensões 5 mm x 40 mm x 30 µm (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000) .....	48
Figura 14 O esquemático desenhado demonstra o princípio de operação de um sensor magnetostrictivo. Um campo magnético de amplitude fixa é aplicado ao sensor utilizando bobinas de Helmholtz e uma bobina sensora utilizada na captação da ressonância. Adaptada de (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000) .....	50
Figura 15 Sensor na forma de um filme fino magnetostrictivo imerso em um líquido e localizado entre dois planos fixos (STOYANOV, GRIMES, 1999).....	51

Figura 16 Frequência de ressonância em função da pressão, para duas ligas e suas respectivas espessuras (STOYANOV, GRIMES, 1999) .....	52
Figura 17 Sensor fixado em uma linha de vibração nodal em medidas de pressão sendo uma solução na forma conhecida de vibração a qual define uma linha transversal nodal em $x=L/2$ . (STOYANOV, GRIMES, 1999) .....	53
Figura 18 Fluxograma geral dos procedimentos experimentais .....	54
Figura 19 Fluxograma procedimentos das caracterizações .....	56
Figura 20 Fluxograma procedimentos das aplicações .....	57
Figura 21 Representação esquemática do conjunto bobinas de Helmholtz vista frontal e superior .....	60
Figura 22 Configuração mecânica da interferometria no ponto de medição .....	62
Figura 23 Vista superior da disposição dos cabeçotes dos lasers em relação à amostra .....	64
Figura 24 Exemplo de sinais temporais adquiridos dos lasers segundo eixo A e B na posição mais extrema da fita .....	65
Figura 25 Fluxograma para a consulta remota dos sinais .....	65
Figura 26 Circuito elétrico do conjunto de bobinas de Helmholtz para medidas elétricas .....	67
Figura 27 Comportamento da impedância da bobina sensora na banda de frequência de 40k a 230kHz .....	68
Figura 28 Conjunto composto por encapsulamento e fita magnetoelástica envolvido por bobina sensora em medidas de impedância elétrica .....	69
Figura 29 Suporte 5 pontos de pressão .....	70
Figura 30 Exemplo de resposta magnitude e fase para as frequências a) fundamental e b) terceiro harmônico para $H_{ac} = 9,05$ A/m e $H_{cc} = 561$ A/m .....	71
Figura 31 Frequência de ressonância e antirressonância em função $H_{ac}$ quando a amostra está sujeita a um $H_{dc}$ de 561 A/m .....	71
Figura 32 Curva do campo magnético vs corrente contínua medidas para caracterizar o conjunto de bobinas de Helmholtz .....	73
Figura 33 Modo de Young com deformações a) simétrica 55.9kHz e b) assimétrica 111.4kHz c) simétrica 165.7kHz .....	75
Figura 34 Resposta temporal ao deslocamento no eixo X, com varredura no comprimento da fita T.B. 6 ciclos e 56kHz .....	76
Figura 35 Resposta temporal ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 2 ciclos e 170kHz .....	77
Figura 36 Resposta em frequência ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 6 ciclos e 56kHz .....	78
Figura 37 Resposta em frequência ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 2 ciclos e 170kHz .....	78

Figura 38 Comparação simulado x medido para o deslocamento no eixo X com excitação de 56kHz 6 ciclos .....	80
Figura 39 Comparação simulado x medido para o deslocamento no eixo X com excitação de 170kHz 2 ciclos .....	80
Figura 40 Variação da frequência de ressonância fundamental e amplitude do sinal em função da corrente contínua aplicada .....	82
Figura 41 Impedância em função da primeira banda de frequências nos meios ar, água e óleo .....	83
Figura 42 Impedância em função da segunda banda de frequências nos meios ar, água e óleo .....	84
Figura 43 Velocidade do som e coeficiente de acoplamento da fita no ar, em função de um campo estático aplicado .....	85
Figura 44 a) coeficiente de acoplamento magnetoelástico e b) velocidade do som para meios ar, água e óleo em uma pequena variação do campo estático .....	87
Figura 45 Efeito na frequência de ressonância e anti-ressonância do modo puro de vibração para meios ar, água e óleo a) frequência fundamental e b) harmônica .....	88
Figura 46 Variabilidade das quatro fitas em função do meio ao comportamento do a) coeficiente de acoplamento magnetoelástico e b) velocidade do som .....	89
Figura 47 Banda de fr x com carregamento aplicado à cinco áreas de pressão no meio ar .....	91
Figura 48 ar e água, 2ª banda de fr x com carregamento aplicado à cinco áreas da fita .....	92



## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	19
2. OBJETIVOS .....	21
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
3.1 Magnetostricção .....	24
3.1.1 Efeito $\Delta E$ .....	25
3.1.2 Materiais magnetostrictivos .....	26
3.1.3 Equações constitutivas da magnetostricção.....	27
3.2 Sensores magnetostrictivos .....	28
3.3 Métodos de caracterização e análise.....	31
3.3.1 Método de Elementos Finitos (MEF).....	31
3.3.2 Circuito equivalente elétrico e medida de impedância .....	33
3.3.3 Circuito equivalente para estudo da magnetostricção .....	36
3.4.4 Impedância magnética, coeficiente de acoplamento e velocidade da onda.....	37
3.4 Efeito do campo magnético .....	45
3.5 Medidas com Bobinas de Helmholtz.....	46
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	54
4.1 Simulação por método de elementos finitos .....	58
4.2 Caracterização do sistema de medida com bobinas de Helmholtz .....	59
4.3 Avaliação da impedância.....	66
4.3.1 Características das medidas de impedância .....	66
4.3.2 Circuito elétrico equivalente do sistema de sensoriamento .....	67
4.3.3 Desenvolvimento de bobinas sensoras e suporte do experimento.....	68
4.3.4 Desenvolvimento do sistema para aplicação sob variação de viscosidade e carga... 69	
4.3.5 Configuração do ensaio.....	70
5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
5.1 Caracterização por simulação do método de elementos finitos .....	74
5.2 Caracterização por interferometria a laser .....	75
5.2.1 Comportamento do deslocamento para uma resposta temporal .....	76
5.2.2 Comportamento do deslocamento para uma resposta em frequência .....	77
5.2.3 Comparação entre medida e simulação.....	79

5.3 Caracterização por medidas de impedância elétrica .....	81
5.3.1 Comportamento da frequência de ressonância.....	81
5.3.2 Comportamento da frequência de ressonância em função da viscosidade do meio	82
5.3.3 Comportamento em função do coeficiente de acoplamento magnético e velocidade do som.....	85
5.4 Comportamento diante da variação de viscosidade e carga no monitoramento das vibrações .....	86
5.4.1 Coeficiente de acoplamento magnético e velocidade do som em função da viscosidade .....	86
5.4.2 Ressonâncias do modo longitudinal em função da viscosidade .....	87
5.4.3 Influência da viscosidade e pressão no comportamento das vibrações.....	90
6.0 CONCLUSÕES.....	94
7.0 REFERÊNCIAS.....	95

## 1. INTRODUÇÃO

Este trabalho propõe a pesquisa do estado da arte, a caracterização e as aplicações dos sensores magnetostrictivos projetados. Os materiais utilizados são magnéticos amorfos, que tem sido amplamente explorados pela sua resposta instantânea diante da variação do campo magnético. A fita amorfa magnetostrictiva, ao ser magnetizada, apresenta uma resposta a um comportamento de deformação mecânica do material, explicada pela conversão entre a energia magnética em energia elástica e vice-versa. Essa resposta ao campo magnético aplicado sofre alterações devido a uma série de variáveis. Assim, surge o potencial de aplicações no monitoramento destas. A partir do comportamento na variação da frequência de ressonância em resposta a excitação magnética, as fitas são destinadas à detecção e medidas físicas de parâmetros como: densidade, viscosidade, pressão, temperatura, materiais, velocidade de fluxo de fluido, módulo elástico de filmes finos, etc. Estudos publicados mostram resultados aplicando a fita ao sensoriamento físico e químico, e em diferentes agentes bio-químicos, medidas de pH em soluções aquosas, detecção de umidade, gases, etc. O desenvolvimento das mais variadas técnicas de sensoriamento encontradas atualmente é explicado por permitir o controle e garantir medidas seguras para aplicações que possam comprometer um processo ou produto.

A busca pelo estado da arte revela resultados bem sucedidos por intermédio da construção de sistemas que possibilitam o controle da fonte de excitação e detecção dos sinais analisados. Em virtude da disponibilidade de equipamentos e da construção de sistemas no laboratório para o desenvolvimento do sensor, neste trabalho são propostas múltiplas caracterizações exitosas aplicadas a uma amostra magnetostrictiva. São realizadas técnicas ópticas e elétricas para obter os deslocamentos e frequências aplicadas em função das deformações resultantes das ressonâncias correspondentes às frequências principais. Adicionalmente, métodos de elementos finitos são aplicados no comportamento vibracional do modo puro, determinado pelas propriedades do material e dos fenômenos mecânicos e magnéticos envolvidos.

Análises na frequência, superposição do campo magnético e métodos matemáticos, permitem identificar parâmetros físicos importantes para o sensoriamento em função do ambiente em que a fita possa estar envolvida. Neste trabalho, parâmetros como o coeficiente de acoplamento magnetoelástico e a velocidade do som fornecem informações importantes para indicar as propriedades magnéticas e elásticas do sensor. Para as aplicações no monitoramento de ambientes externo com as fitas, são propostas pesquisas preliminares através do desenvolvimento de arranjos de sensores em uma disposição da fita entre camadas das estruturas de cabos ou tubos transportadores de petróleo. A demanda se encontra em um

sensor que seja capaz de detectar tais alterações no alagamento dessas estruturas em um estado de permeação de gases ou líquidos sob pressão.

Na identificação de propriedades físicas e químicas de algum material ou sistema através de técnicas robustas e precisas, as tecnologias atuais como sensoriamento por fibra óptica e ondas acústicas mostram ótimo desempenho. Entretanto, são restringidas a ambientes onde possam haver conexões físicas ligadas ao sensor. Em contrapartida, a aplicação do sensor magnetostrictivo possibilita acesso remoto e robusto para condições ambientais variáveis, capazes de propor medidas de solução imediata.

As etiquetas antifurto comerciais investigadas para controle de fatores ambientais exibe-se como um excelente objeto de pesquisa pelas numerosas aplicações e vantagens que sustentam esta pesquisa. Entre os fatores de interesse, destacam-se a grande sensibilidade na miniaturização de sensores permitindo a inserção em locais obstruído (onde não possa haver contato direto). Os sensores mostram condições de aplicação em ambientes que apresentam risco para as pessoas e ao meio ambiente, em técnicas de inspeção e por fatores econômicos.

## **2. OBJETIVOS**

### **ESPECÍFICOS**

- \* Desenvolver metodologia e infraestrutura para a caracterização do sensor magnetoelástico;
- \* Verificar a eficiência da utilização de sensores anti-furto para a aplicação como sensores para detecção de solicitação mecânica;
- \* Caracterizar o comportamento do sensor;
- \* Avaliar os melhores parâmetros para o monitoramento de viscosidade e de esforço mecânico (compressão).

### **PRINCIPAL**

- \* Desenvolver um sensor magnetoelástico para monitoramento remoto de solicitação mecânica e alteração de tipo de fluido presente em um dado ambiente, com foco na detecção de fluidos com grande variação de viscosidade.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é brevemente fundamentado no conhecimento teórico e prático sobre a magnetostricção, necessários para as caracterizações que envolvem métodos de elementos finitos, interferometria a laser e análise da impedância até a interpretação dos resultados.

São abordados tópicos relevantes dentro do efeito magnetostrictivo direto, como as variáveis magnéticas, mecânicas, campo magnético e a deformação resultante produzida. São introduzidas as variáveis magnéticas e mecânicas para um determinado campo magnético aplicado, ou indução magnética, que produz uma deformação mecânica resultando no efeito magnetostrictivo direto. As variáveis estudadas também envolvem o efeito inverso, por exemplo quando uma deformação mecânica induz um campo magnético. Uma relação entre as constantes elásticas, magnéticas e piezoelétricas, através de equações constitutivas, possibilitam um melhor entendimento da física envolvida na magnetostricção.

Neste trabalho são ressaltadas informações que vinculam o efeito magnetostrictivo e o comportamento do modo de vibração longitudinal. Características dos materiais magnetostrictivos como o efeito do módulo de elasticidade, e parâmetros de investigação do comportamento das ressonâncias, coeficiente de acoplamento magnético, velocidade do som e circuitos equivalentes se tornam importantes para o conhecimento dos efeitos de um sensor magnetostrictivo.

Para os fundamentos do magnetismo uma influência atrativa e repulsiva sobre os corpos, através de um fenômeno pelo qual os corpos manifestam uma força, a presença do campo magnético (H) afeta em maior ou menor grau todas as substâncias (CALLISTER, 2002; JILES, 1998; CULLITY, GRAHAM 2009). Para os materiais ferrimagnéticos em exemplo magnetocerâmicos, o acoplamento dos momentos magnéticos é mostrado invertido em relação aos materiais ferromagnéticos, como o ferro, cobalto, níquel e vários metais terras raras (CALLISTER, 2002, JILES, 1998). O comportamento magnetoelástico das fitas de ferro, cobalto e níquel independentemente do campo magnético aplicado, mostram uma ordenação de longo alcance para os seus momentos magnéticos. Essa disposição, é apresentada devido a forte interação entre os elétrons dos átomos relativos a camada incompleta. (O'HANDLEY, 2000). É vasta a aplicação na indústria do materiais ferromagnéticos e ferrimagnéticos pelas suas propriedades magnéticas. Esses materiais são encontrados na forma de ímãs permanentes, núcleos de motores e transformadores. É vasta a aplicação de aços no mercado, devido as características mecânicas e ao valor agregado. (BAIOTTO, 2011).

A indução magnética, ou densidade de fluxo magnético (B), representa a magnitude da força do campo interno de uma substância quando submetida a um campo magnético (H) externo aplicado. As unidades tesla (T) ou weber por metro quadrado ( $\text{Wb/m}^2$ ) representam a indução magnética, ou densidade de fluxo (B), e o campo magnético é representado por

àmpere por metro (A/m) ou oersted (Oe). A indução magnética, remete a magnitude da força do campo, ao submeter o material a um campo externo aplicado (H). A curva de magnetização representa o efeito da resposta que materiais magnéticos apresentam para uma determinada B, quando exposto a um H. (CALLISTER, 2002; JILES, 1998; CULLITY, GRAHAM 2009)

A curva de histerese de um material pode ser traçada, a partir da exposição do material investigado a um campo magnético alternado. A resultante de indução magnética (B), conforme conceituado anteriormente, é a soma entre o campo H aplicado com o campo do material magnetizado (M) (BOHN, F 2009). Durante a magnetização, o movimento das paredes de domínio e a rotação da magnetização resultam em uma média de contribuições de diversos mecanismos em frações da estrutura dos domínios. O crescimento dos domínios em relação aos vetores de magnetização, que estão mais próximos da direção do campo aplicado, passa a ser a condição necessária para que as paredes de domínio inicialmente se desloquem. Desse modo, na existência de uma variação gradual da direção de magnetização, será definida uma parede que limita a região (CULLITY, GRAHAM 2009; BOHN, 2009).

A rotação da magnetização é o fenômeno mais importante na magnetização (BOHN, 2009). Mesmo que se altere o campo externo, se os momentos estão alinhados na direção do campo H aplicado, não há alterações da magnetização de saturação ( $M_s$ ). E a magnetização remanente ( $M_r$ ) pode ocorrer após a saturação (BOHN, F 2009). A permeabilidade relativa do material varia em determinadas condições como campo magnético, temperatura e histórico magnético e esse é um padrão dos materiais ferromagnéticos (JILES, 1991).

Um material que encontra-se em estado desmagnetizado dispõe de domínios aleatoriamente orientados uns em relação aos outros, apresentando uma somatória global nula (JILES, 1991; BOHN, 2009; BOHN, 2005). No caso do ferro, em uma estrutura cúbica de corpo centrado, a magnetização ocorre ao longo de uma das direções de fácil magnetização nas arestas da estrutura. (BOHN, 2009)

A energia livre magnética faz parte do entendimento do processo de magnetização. Uma desordem na rede dos materiais ferromagnéticos como no aparecimento de discordâncias, flutuações na composição, separação de fases, inclusões, rugosidade, deformações da rede, grãos em policristais, precipitados, alterações na forma de partículas do material, em geral tornam a análise da energia mais difícil. (BERTOTTI, 1998). A estrutura de domínios magnéticos é uma consequência de uma composição de energias diferentes, onde a energia magnetostática é a principal responsável pelo aparecimento dos domínios. (BOHN, 2009; BERTOTTI, 1998; KITTEL, 1949).

As fitas de filme fino amorfas ferromagnéticas possuem estruturas de domínios e distribuições de anisotropias devido ao processo em que são produzidas chamado de *melt spinning* (TORMENS, 2014). As fitas amorfas magneticamente moles podem se enquadrar em duas estruturas de acordo com (TEJEDOR E HERNANDO, 1980; KACZER, 1970, apud MOSCON, 2009) com domínios largos e direção de fácil magnetização no plano da fita, ou com domínios estreitos e magnetização no eixo de fácil perpendicular ao plano da fita.

Uma forma de explicar a origem da anisotropia como a principal contribuição da energia magnetostática surge do campo desmagnetizante com sentido contrário à magnetização, ou seja, a descontinuidade normal da magnetização, encontrada nos contornos da amostra. Contribuições anisotrópicas para a energia podem ser originadas da disposição dos momentos magnéticos que refletem na simetria da rede em uma cristal magnético (JACKSON, 1962). Uma orientação preferencial de magnetização é encontrada ao longo de alguma direção fixa em uma amostra com um eixo ferromagnético ou anti-ferromagnético. Porém, essa principal característica da anisotropia magnética pode ser alterada na presença de um campo H, no direcionamento da M através da energia magnetocristalina nos eixos cristalográficos de fácil e difícil magnetização. (SÁ, 2010; COEY, 2009, KITTEL, 1949).

### 3.1 Magnetostricção

Joule, ao mostrar que uma barra de ferro aumentava o comprimento quando magnetizada longitudinalmente por um campo fraco, descobriu o efeito magnetostrictivo. Villari descobriu o efeito inverso, um fenômeno recíproco que a partir de deformações ao submeter o metal magnético sob tensões mecânicas, mostrava variação de campo magnético (H) (LEE, 1955). O efeito inverso da magnetostricção é fortemente dependente da tensão aplicada, e resultados práticos podem mostrar as propriedades dos materiais, como a permeabilidade, tamanho e o formato do *loop* de histerese (CULLITY, 2009).

Por definição, a magnetostricção ( $\lambda$ ) é a razão entre a variação do comprimento ( $\Delta l$ ) pelo comprimento da barra (l) como mostra a Equação 1. O fenômeno pode ser causado por uma tensão mecânica aplicada, respondendo, através de um alongamento, ou seja, uma deformação magnética induzida. (CULLITY, GRAHAM 2009).

$$\lambda = \frac{\Delta l}{l} \quad \text{Equação 1}$$

A origem do efeito é explicada pela energia de anisotropia magnetocristalina que relacionada as direções preferenciais de magnetização aos eixos cristalográficos restringe a rotação do momento magnético local do acoplamento spin-órbita. A magnetostricção de modo direto está ligada à energia magnetostática do material que resulta na variação das dimensões do material ferromagnético e inicia na interação spin-órbita dos átomos. A medida que a amostra é sujeita à um campo externo inicia a interação que resulta na variação nas dimensões do material. (BOHN, 2009). Algumas características da magnetostricção que variam o tamanho da amostra relacionam mudanças na estrutura de domínios, por exemplo, com um movimento de 90°, com a rotação da magnetização, com a nucleação e com a aniquilação de domínios.



De outro modo, um cristal magnetizado no eixo difícil implica no movimento das paredes de  $180^\circ$  e  $90^\circ$  e na rotação da magnetização (CULLITY, GRAHAM 2009).

Levando em consideração uma amostra em forma de haste, são reproduzidos efeitos magnetostrictivos além do modo longitudinal, como por exemplo torção e flexão. A magnetostricção ocorre em todas as substâncias puras. No entanto, mesmo em substâncias magnéticas fortes, o efeito geralmente é pequeno. Substâncias fracamente magnéticas permitem que seja observado o efeito magnetostrictivo sob campos magnéticos altos, porém o efeito é ainda menor. O valor da magnetostricção longitudinal na saturação pode ser positivo, negativo e nulo em algumas ligas. A magnetostricção geralmente ocorre durante a rotação dos domínios onde o valor do alongamento corresponde ao aumento da magnetização e do campo magnético. Na saturação, conforme Figura 1, a  $\lambda$  para algumas ligas pode assumir valores positivos, negativos e nulo com dependência da temperatura. Em materiais com estrutura poli cristalina para medir a magnetostricção, uma alternativa é realizar uma média das contribuições dos domínios de diferentes grãos. Os valores de magnetostricção de saturação podem ser adquiridos se forem medidos ambos  $\Delta L$  e o campo magnético aplicado na direção do comprimento (CULLITY, GRAHAM 2009)

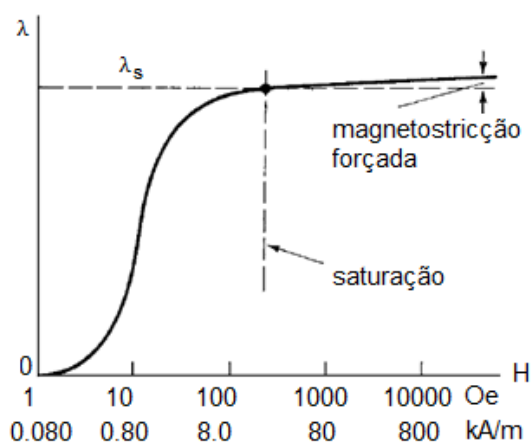


Figura 1 Dependência da magnetostricção no campo magnético (escala do H é logarítmica) (CULLITY, GRAHAM 2009)

### 3.1.1 Efeito $\Delta E$

Uma deformação magnetoelástica é um caso de deformação extra, onde o movimento de deslocamento e deformação da estrutura em que átomos de carbono em um ferro movem-se nas posições preferenciais e se apresentam de várias formas. Em especial o efeito  $\Delta E$  é normalmente associado como um módulo defeito, onde qualquer mecanismo presente pode contribuir com uma deformação extra (deformação inelástica) adicionalmente à deformação

elástica. (CULLITY, GRAHAM 2009). Outra consequência da magnetostricção é a dependência do módulo de Young ( $E$ ) do material magnético no estado de magnetização. Quando uma amostra originalmente desmagnetizada é levada à saturação, o módulo aumenta em uma quantidade de  $\Delta E$  (CULLITY, GRAHAM 2009).

Uma consequência da magnetostricção é a mudança aparente no módulo de elasticidade, dependente do estado de magnetização, e que resulta em uma mudança de frequência de ressonância. A resposta é conhecida como efeito  $\Delta E$ , e demonstra que a frequência de ressonância de uma fita magnetostrictiva muda significativamente com o campo  $H$  estático aplicado. (SCHMIDT, 2000; CULLITY, GRAHAM 2009).

O módulo elástico ( $E$ ) não depende somente dos graus de magnetização, mas também da tensão mecânica (ou deformação) e da resistência da anisotropia presente. Se  $\Delta E$ , por exemplo, é medido de uma curva de tensão-deformação convencional, o nível de tensão mecânica será razoavelmente alto e a medida de  $\Delta E/E$  será pequena. No entanto,  $\Delta E$  pode ser medido através de uma frequência de ressonância de uma amplitude de vibração pequena. Mesmo que o nível de tensão mecânica seja muito baixo, o valor de  $\Delta E/E$  pode ser muito grande. (CULLITY, GRAHAM 2009)

Ao expor a amostra a campos magnéticos altos, o material se torna magneticamente saturado onde a amplitude de vibração sofre uma queda, sendo que a alteração na frequência de ressonância é normalmente designada como efeito  $\Delta E$  (GRIMES et al., 2011). Uma mudança no módulo de elasticidade, dependendo do estado de magnetização, resulta em uma mudança de frequência de ressonância. (SCHMIDT, 2000)

### **3.1.2 Materiais magnetostrictivos**

Os materiais ferromagnéticos caracterizam-se por possuírem uma magnetização espontânea, sem necessidade de campo magnético aplicado abaixo da temperatura de Curie. Materiais ferromagnéticos compostos em uma liga podem alcançar consideráveis valores de magnetostricção e mostrar dependência na magnetização da saturação com a temperatura (CULLITY, GRAHAM 2009).

Na década de 60, estudos mostraram materiais com magnetostricção constituídos de terras raras e ferro, apresentando altos deslocamentos em baixas temperaturas. A associação dos metais de transição (como Ni, Co, Fe) com os terras raras (como disprósio, térbio e samário) em uma liga geram um aumento na temperatura de Curie. Para DyFe (disprósio e ferro) e TbFe (térbio e ferro), deformações magnetostrictivas altas também podem ser adquiridas ao aumentar a temperatura (CLARK, 1972). Para o composto TbFe<sub>2</sub>, por exemplo, uma alta anisotropia magnética foi observada com grande dependência da direção em que foi medida. Comercialmente o Terfenol-D é um material extremamente utilizado como transdutor

pelos altos valores de magnetostricção. (DAPINO, 2004) Na Figura 2, tem-se a curva da variação da magnetização de saturação  $M_s$  para Fe, Co e Ni em função das suas temperaturas de Curie (1043 K, 1388 K e 627 K). (KITTEL, 2006).

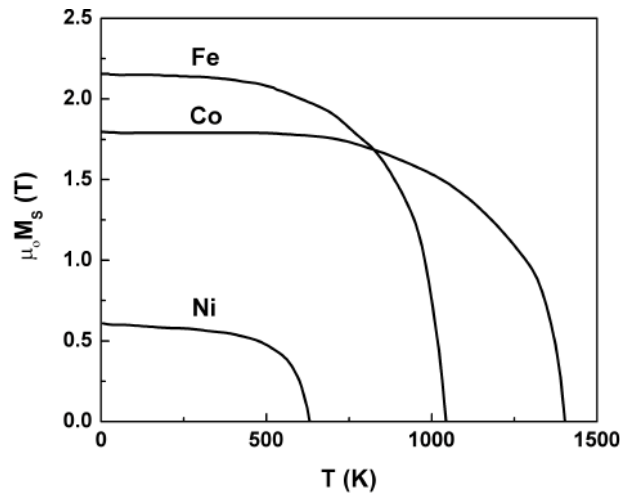


Figura 2 Curva de magnetização para metais de transição em função da temperatura de Curie. (KITTEL, 2006)

A presença de um campo magnético transversal e aplicação de um tratamento térmico permitem que sejam encontradas anisotropias normais ao eixo da extensão da fita. A geometria da fita propicia a criação de domínios com orientação perpendicular ao eixo do comprimento (O'HANDLEY, 2000). Ligas amorfas contendo Fe e Co são encontradas com frequência (TORMENS, 2014), por exemplo, no uso como sensores de posição (BARANDIARAN, GUTIERREZ, 1997), em marcadores anti-furto (RYAN, 1997) e em sensores de deformação (MITCHELL, DEMOYER, VRANISH, 1986) etc. Anisotropias normais ao eixo da extensão da fita podem ser encontradas diante da aplicação de um tratamento térmico na presença de um campo magnético transversal. Em função da geometria, são criados domínios com orientação perpendicular ao eixo do comprimento. (O'HANDLEY, 2000, TORMENS, 2014; LACHEISSERIE, 1982; BARANDIARAN, GUTIERREZ, 1997).

### 3.1.3 Equações constitutivas da magnetostricção

As equações constitutivas para efeito magnetostrictivo associam o efeito piezoelétrico e piezomagnético com as equações elétricas, mecânicas, e magnéticas. Seguem as Equações 2, 3 e 4 que descrevem estes efeitos. (LONNGREN et al, 2007; RIBICHINI, 2011).

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}, \quad \text{Equação 2}$$

$$T = cS \quad \text{Equação 3}$$

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Equação 4}$$

As constantes  $\epsilon$ , e  $\sigma$  são, respectivamente, a permissividade do meio e a condutividade elétrica do meio (JILES, 1991; SAUTBEKOV, 2011).

O estudo da magnetostricção geralmente envolve uma dinâmica elástica e magnética e as propriedades do material piezomagnético. Tal como cerâmicas piezomagnéticas, materiais magnetostrictivos polarizados podem ser tratados como piezomagnéticos acima de uma faixa linear de operação. O conjunto de Equações 5 e 6 foi retirado da tabela de comparação entre equações piezomagnéticas e piezoelétricas e explicam esse fenômeno. (IEEE Std 319, 1990)

$$T = c^H S - e_t H \quad \text{Equação 5}$$

$$\vec{B} = eS + \mu^S H \quad \text{Equação 6}$$

Onde,  $T$  é a tensão mecânica,  $S$  é a deformação, e as constantes  $c$ ,  $c^H$ ,  $e$ ,  $\mu^T$  significam rigidez elástica, rigidez elástica com  $H$  constante, piezomagnética efetiva e permeabilidade com  $S$  constante (IEEE Std 319, 1990). Ao levar em consideração que o campo elétrico possa substituir o campo magnético, as equações piezoelétricas podem ser associadas às equações com o acoplamento magnetostrictivo (RIBICHINI, 2011).

### 3.2 Sensores magnetostrictivos

Um instrumento de sensibilidade básico é criado a partir da variação na frequência de ressonância em função da mudança do meio em que o sensor esteja exposto. A capacidade em responder a uma mudança de ambiente reflete em abrangentes aplicações como na detecção e nas medidas físicas de parâmetros como pressão (GRIMES, KOUZOUNDIS, 2000), temperatura (JAIN, GRIMES, 2001), densidade, viscosidade (LANDAU, 1986; LOISELLE, 2000; KOUZOUNDIS, GRIMES 2000), velocidade de fluxo de fluido (GRIMES, 2000) e módulo elástico de filmes finos (SCHMIDT, GRIMES, 2001).

O sensor magnetoelástico utilizado por (TORMENS, 2014), por exemplo, foi utilizado como plataforma de sensoriamento no estudo do comportamento da secagem de materiais cerâmicos através de uma fita magneticamente mole com composição aproximada de  $Fe_{45}Ni_{45}Mo_7B_3$  (porcentagem em peso). Algumas propriedades e características são citadas na Tabela 1, conforme folha de dados do material Metglas®2826MB3. (TORMENS, 2014) indica

que ao utilizar o método de elementos finitos, (LIANG, MORSHED , PROROK, 2007) calcularam a razão de *poisson* em 0,33 no estado correspondente de deformação de um Metglas®2826MB3.

Tabela 1 Características e propriedades gerais do Metglas®2826MB3 (METGLAS, 2013)

<b>Características e propriedades gerais</b>	<b>Unidade</b>	<b>Valor</b>
<b><i>Eletromagnéticas</i></b>		
Magnetostricção de saturação	Pm	12
Temperatura de Curie	C	353
Indução de saturação	T	0,88
<b><i>Físicas</i></b>		
Espessura	µm	29
Densidade	g/cm <sup>3</sup>	7,9
Resistência à tração	GPa	1-2
Módulo de elasticidade	GPa	100-110
Fator de laminação	%	>75
Expansão térmica	ppm/°C	11,7
Temperatura de cristalização	°C	410

Técnicas magnéticas, ópticas e acústicas proporcionam o monitoramento das características de ressonância na avaliação do sensor (LANDAU, 1896). Vários parâmetros podem ser detectados através de uma análise na intenção de identificar a camada de contato exposta à absorção de moléculas. Em destaque entre as vantagens que as fitas apresentam, temos a excelente aplicação onde uma sonda direta ou contato elétrico com elementos de detecção não são viáveis. O comportamento das vibrações longitudinais de uma fita para a frequência e amplitude do sinal dependem do comprimento ( $l$ ), elasticidade ( $E$ ) e densidade ( $\rho$ ) (LANDAU, 1896). Procedimentos de monitoramento envolvidos filmes finos no sensoriamento apresentam resposta a parâmetros químicos, físicos e bio-químicos da cobertura da fita para variadas massas (BAIMPOS et al, 2010), microorganismos (ONG et al, 2001), humidade (GRIMES, 2000), sais (BOUROPOULOS et al, 2005), pH [CAI et al, 2000) e concentração de gases (GRIMES, KOUZOUZIS, 2000; GRIMES ET AL, 2011).

Os fenômenos governados pelas interações magnetomecânicas, e as equações aplicadas a uma onda estacionária nas condições de contorno de vibrações para uma fita livre, fazem parte das soluções relacionadas ao campo magnético e da indução magnética (SCHMIDT, GRIMES, 2001). Uma representação para a impedância elétrica de uma bobina magneticamente acoplada à fita é apresentada em (HATHAWAY, SPANO, 1984).

Alguns tipos de ligas como (Metglas 2826MB, 2013) são apresentadas nesse trabalho em aplicações como sensores magnetostrictivos a partir de fitas de filme fino produzidas a com ligas amorfas ferromagnéticas, como por exemplo  $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$  (Metglas 2826MB, 2013). Dimensões de aproximadamente 40mm x 6 mm x 25 $\mu$ m são largamente utilizadas como fitas indicadoras antifurto em sistemas de segurança. Os sistemas de segurança acustomagnético contém uma fita magnetostrictiva, juntamente com um elemento magnético, alojados em um suporte de polímero. O invólucro de polímero têm o propósito de manter o elemento magnetoelástico livre e o elemento magnético preso através de um filme de polímero, além de proteger os filmes finos do ambiente externo (P.I. SIEGEL, 2000; P.I. ANDERSON III, 1985).

A invenção propõe que o elemento magnético na forma de folha magnética seja polarizado com alinhamento norte e sul e que uma variação no campo magnético estático forte implica em uma mudança no tamanho estrutural do filme magnetostrictivo. Ao expor as fitas de filme fino a um campo variante no tempo, produz-se uma vibração longitudinal nesses sensores que por sua vez geram ondas elásticas. (P.I. SIEGEL, 2000; P.I. ANDERSON III, 1985). (GRIMES et al, 2011), em seus estudos, estabelecem que a relação de 5:1 (entre o comprimento e a largura da fita) alcança medidas com ondas mais puras evitando excitar outros modos de vibração da fita.

A proposta de criar fitas baseadas nos conceitos acústico e magnético e operar em baixas frequências tendem a minimizar interferências de outros dispositivos eletrônicos. A tecnologia é estabelecida na excitação de ondas de rádio onde o ressonador vibra na mesma frequência que o receptor, transmitindo um sinal idêntico ao detectar o sinal, iniciando um alarme. (RYAN, 1997)

(LANDAU, 1896) estabelece que, para um sensor magnetostrictivo de massa ( $m_0$ ), com frequência inicial ( $f_0$ ) submetido a um pequeno carregamento de massa ( $\Delta m$ ) na sua superfície, revela uma redução na frequência de ressonância conforme a Equação 7. A alteração na banda de frequências ocorre conforme a Equação 8. (LANDAU, 1896). Além da alteração na resposta a uma mudança no carregamento, uma mudança na viscosidade ou densidade do meio cria um efeito de amortecimento na vibração do sensor. A Equação 8 mostra que a frequência de ressonância ( $\Delta f$ ) está relacionada à viscosidade ( $\eta$ ) e à densidade ( $\rho_1$ ) do meio envolvente onde  $\tau$  é a espessura do sensor magnetostrictivo e  $\rho_s$  é a densidade do sensor (Stoyanov, 2000).

$$\Delta f = -f_0 \frac{\Delta m}{2m_0} \quad \text{Equação 7}$$

$$\Delta f = \frac{\sqrt{\pi f_0}}{2\pi \rho_s \tau} \sqrt{\eta \rho_1} \quad \text{Equação 8}$$

### **3.3 Métodos de caracterização e análise**

Neste capítulo são abordados estudos e técnicas atuais utilizadas na caracterização de materiais magnetostrictivos. As técnicas abordadas contam com os métodos de simulação por elementos finitos, de impedância elétrica, e de análise da resposta do sinal. O efeito do campo magnético para o conjunto de bobinas de Helmholtz é apresentado adicionalmente a conceitos de análise dos circuitos equivalentes elétricos e magnetoelásticos pertinentes para a identificação do comportamento do sensor investigado.

#### **3.3.1 Método de Elementos Finitos (MEF)**

As aproximações numéricas são uma saída extremamente valiosa para resolver problemas dinâmicos em consequência da complexidade do equacionamento (para condições iniciais e de contorno sem solução analítica exata) (RUIZ, 2006).

Uma aproximação numérica por elementos finitos tem como objetivo dividir o sistema investigado reduzindo a complexidade das geometrias em um elemento do problema (chamado domínio) ou em vários elementos finitos (chamados subdomínios). As soluções numéricas são aproximadas ao resultado a partir de um conjunto discreto de nós, contraditoriamente às soluções analíticas exatas que resultam em um comportamento de um sistema para qualquer ponto. Um sistema que possui uma solução contínua, através do método de elementos finitos passa a ter uma solução discreta em nós, e pode ser dividido basicamente em três etapas (pré-processo, tipo de solução e pós-processo) (RUIZ, 2006).

A etapa do pré-processo conta com a definição da geometria, do tipo de elemento (fluido ou sólido), da análise do problema (em duas ou em três dimensões), do material e das equações. As constantes que caracterizam o material são incluídas no software. Por exemplo, em uma analogia com elementos piezoelétricos, são dadas como entradas a matriz elástica, as matrizes piezoelétricas e a permissividade. Após a divisão do sistema investigado em elementos finitos, são fixadas as condições de contorno mecânicas e elétricas para o exemplo com piezoelétricos. Na etapa da solução para uma análise dinâmica são resolvidos os sistemas de equações para o problema em função de uma excitação harmônica. Para finalizar, a etapa do pós-processo traz os resultados a partir dos valores nodais que permitem o cálculo de funções e valores associados aos elementos depois de adquiridos os valores dos graus de liberdade (deslocamento e potencial elétrico) em função da frequência e do tempo (RUIZ, 2006).

O programa Comsol Multifísico explorado nesse trabalho permite modelar com precisão materiais magnetostrictivos e dispositivos que requerem acoplamento de fenômenos

(eletromagnéticos, mecânicos e acústicos) com modelos 2D e 3D gerados usando corrente alternada e corrente contínua (CA e CC) (COMSOL, 2016). Inicialmente, para modelar materiais magnetostrictivos em um modelo de acoplamento multifísico, é necessário o conhecimento das equações magnetostrictivas (acopladas em termos da tensão mecânica, da deformação, do campo magnético e da indução magnética) e as suas respectivas constantes (SLAUGHTER et al, 2009; BENATAR, GABRIEL, 2005).

A simulação com elementos finitos do primeiro modo de vibração longitudinal implementada por (SHEN, WEN, 2009) para uma fita magnetoelástica de filme fino apresenta alterações no formato da direção do comprimento da fita. A interação magnetoelástica mostra a característica de um sinal com deslocamentos de magnitude máxima nos extremos que decrescem até o centro.

O movimento gerado pela magnetostrictão conforme a Figura 3 a b e c pode ser visto em frequências próximas da ressonância, e harmônicas pares e ímpares. A fita livre se comporta como um atuador, e pode se mover ao longo das direções no comprimento com o movimento controlado pela frequência de operação. Na Figura 3 a verifica-se que a região central da fita não é alterada, sendo esta uma resposta característica de uma deformação simétrica. No entanto uma deformação magnetostrictiva assimétrica é apresentada pela Figura 3 b e c, para uma excitação com um campo magnético alternado e frequência diferente da frequência de ressonância, onde uma força de fricção ao longo da direção do comprimento é aplicada (ZHANG et al, 2013). Através de técnicas de modelamento, são investigadas formas para amplificar o sinal de deslocamento obtido nos atuadores projetados a partir de materiais piezolétricos/magnetostrictivos (SLAUGHTER et al, 2009; BENATAR, GABRIEL, 2005).

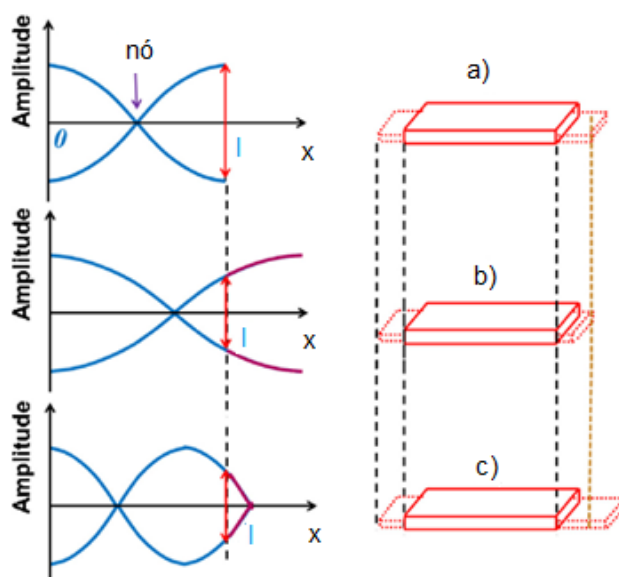


Figura 3 Esquemático da deformação e deslocamento para a) frequência de ressonância, b) frequência < frequência de ressonância, c) frequência > frequência de ressonância (ZHANG et al, 2013)



### 3.3.2 Circuito equivalente elétrico e medida de impedância

Caracterizar circuitos eletrônicos e materiais empregados na fabricação de componentes através da impedância de um circuito equivalente é um importante parâmetro na análise do comportamento dos dispositivos (HARUTA, 2000). Associar um circuito equivalente elétrico a um sistema com comportamento semelhante (um oscilador) é uma ferramenta comum que permite facilitar a análise de um dispositivo a partir de associações com componentes passivos (como resistores, indutores e capacitores) de acordo com a faixa de frequências desejada. (BUTTERWORTH, SMITH, 1931; XUE, LI, YANG, 2012).

Representada como uma quantidade complexa na frequência, a impedância ( $Z$ ) é geralmente definida como a total oposição que um dispositivo ou circuito apresenta ao fluxo de uma corrente alternada. O vetor de impedância é constituído por uma parte real (resistência,  $R$ ) e uma parte imaginária (reatância,  $X$ ), expressada através da forma de coordenadas retangulares (como  $R \pm jX$ ), ou na forma polar (como magnitude  $|Z|$  e ângulo de fase  $\theta$ ). Algumas outras relações recíprocas para a impedância podem ser realizadas se matematicamente conveniente. (HARUTA, 2000). Em medidas de impedância em uma banda entre baixa e alta frequência, é comum utilizar-se do método de ponte auto balanceada. Basicamente, para uma impedância complexa no dispositivo sob teste, é necessário conhecer a tensão elétrica (medida em volts,  $V$ ) do sinal aplicado no DUT (*device under test*), e a corrente que flui através dele (HARUTA, 2000).

Ao conectar o dispositivo sob teste (DUT) ao analisador de impedância, uma corrente elétrica oscilante é gerada e imediatamente cria um campo magnético externo oscilante. Dependendo das características do DUT utilizado para um circuito magneticamente acoplado, a frequência de ressonância provoca uma alteração no fluxo magnético no DUT e uma mudança na impedância do circuito de medição. (HARUTA, 2000). Uma variação da impedância média leva em conta a impedância interna do analisador ( $Z_s$ ) e a carga. Essa técnica permite que sejam escolhidos modelos de circuitos equivalentes de acordo com as características do sinal de saída (a partir da amplitude de pico de frequência, de vale, e da largura da banda, etc) (HARUTA, 2000).

As características de ressonância do sensor magnetoelástico (ME) podem ser detectadas pelo acoplamento de mútua indutância de magnetização interna, ou seja, através da interação da indução magnética entre o material ME e a bobina (BUTTERWORTH, SMITH, 1931; XUE, LI, YANG, 2012). Em geral, a indutância mútua cresce com alterações do fluxo magnético produzido pelas características da bobina sensora e do sensor ME. (CHAI et al, 2013). O circuito elétrico equivalente da Figura 4 é uma das possíveis configurações que os medidores de impedância oferecem, e é composto por um indutor com efeitos parasitas ( $L$ ), uma resistência de enrolamento ( $R_s$ ) e uma capacitância parasita em paralelo ( $C_p$ ) (HARUTA, 2000).

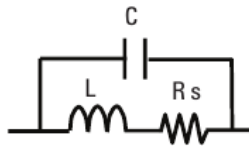


Figura 4 Circuito equivalente elétrico disponível no analisador de impedâncias (HARUTA, 2000)

A medida da impedância complexa do DUT utiliza uma fonte que gera uma frequência com nível do sinal de saída variável. O teste do nível de sinal aplicado ao dispositivo pode ser calculado a partir da impedância da fonte e da impedância do DUT. O resistor da fonte é conectado em série com o DUT e há uma queda de tensão elétrica. Logo, ao conectar o DUT, um divisor de tensões elétricas mostra que a tensão elétrica no DUT é dependente do valor do resistor de fonte e do valor de impedância do DUT (HARUTA, 2000).

### Medidas com corrente contínua de polarização

Adicionalmente à fonte de corrente alternada uma corrente de polarização (*bias*) com saída regulada pode ser aplicada ao DUT independentemente do valor de resistência. Medidores de impedância de precisão, como por exemplo Agilent 4294, possuem uma função avançada para um modo fonte de corrente contínua que proporciona saída regulada. A corrente de polarização aplicada é mantida em um valor ajustado independente da resistência de corrente contínua do DUT. A forma mais apropriada para medir um comportamento indutivo utiliza uma fonte de corrente *bias* de saída. Porém, geralmente não é suficiente para polarizar o indutor nos níveis necessários. Dessa forma, uma solução ao aplicar uma alta corrente de polarização CC ao DUT é usar uma fonte externa ou um adaptador específico. (HARUTA, 2000)

Para medir a impedância elétrica do um circuito da Figura 4, (HARUTA, 2000) disponibiliza as Equações 9 e 10 equivalentes a um indutor com efeitos parasitas.

$$Z_{el} = \frac{R_s}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R_s^2} + j \frac{\omega L \left(1 - \omega^2 LC - \frac{C R_s^2}{L}\right)}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R_s^2} \quad \text{Equação 9}$$

Os valores de L, somente quando o indutor tem baixa resistência ( $R_s \ll \omega L$ ) e baixo valor de capacitância ( $1/\omega C \gg \omega L$ ). Maiores detalhes sobre os circuitos e as suas equações equivalentes podem ser encontrados no handbook dos medidores de impedância elétrica da Agilent escrito por (HARUTA, 2000).

$$L_s = \frac{X}{\omega} = \frac{L(1 - \omega^2 LC - \frac{CR_s^2}{L})}{(1 - \omega^2 LC)^2 + \omega^2 C^2 R_s^2} \quad \text{Equação 10}$$

Quando  $\omega^2 C^2 R_s^2 \ll 1$  e  $\frac{CR_s^2}{L} \ll 1$ , logo  $L_s \cong \frac{L}{1 - \omega^2 LC}$

Se a reatância ( $\omega L$ ) cair para baixas frequências, a impedância elétrica mínima deverá ser determinada pelo valor da resistência do enrolamento ( $R_s$ ). A capacitância parasita ( $C_p$ ) é a principal causa da resposta em frequência do indutor em altas frequências. A existência de  $C_p$  pode ser reconhecida a partir do ponto de ressonância SRF (*self-resonant frequency*) na região frequências mais elevadas. Em SRF, o indutor exibe a máxima impedância elétrica porque o paralelo da ressonância ( $\omega L = 1/\omega C_p$ ) é dado por  $C_p$ . Após SRF o ângulo de fase da impedância ( $\theta$ ) torna-se um valor negativo (em torno de  $-90^\circ$ ) pois a reatância capacitiva de  $C_p$  passa a ser dominante. A resposta em frequência do indutor em medidas no modo Ls-Rs (indutor série e resistor série) é mostrado na Figura 5 a e b. (HARUTA, 2000)

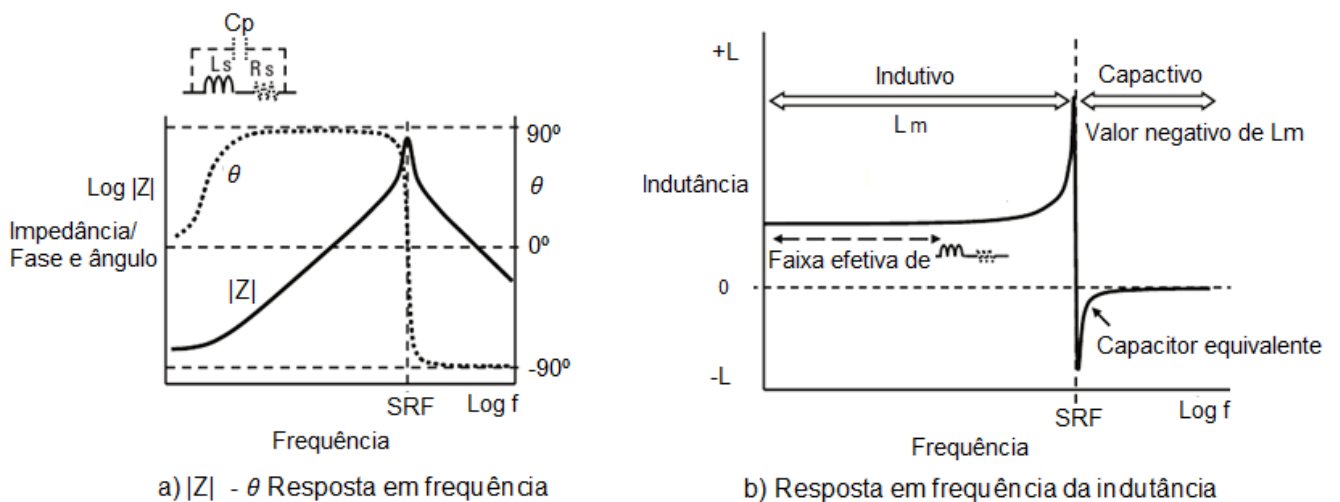


Figura 5 Resposta em frequência típica de um indutor (HARUTA, 2000)

O efeito da ressonância é explicado pela medida da indutância ( $L_m$ ), que cresce rapidamente ao se aproximar de SRF. Nas frequências acima de SRF, uma indutância negativa é mostrada porque  $L_m$  é calculado a partir do vetor de reatância capacitiva (oposto ao vetor indutivo). O fator de qualidade (ou mérito Q) fornece a informação sobre a medida da pureza da reatância com menor resistência possível definida como uma taxa de energia armazenada e dissipada pelo componente ( $X_s/R_s$ ) sendo uma unidade sem dimensão. O valor de  $L_m$  passa a ser maior para um dispositivo com alto fator de qualidade (HARUTA, 2000).

A reatância pode tomar a forma indutiva ( $X_L$ ) e a capacitiva ( $X_C$ ) sendo representado por  $X_L = \omega L$  (ou  $X_L = 2\pi fL$ ) e  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  (ou  $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ). A frequência de interesse ( $f$ ) é

geralmente expressada pela frequência angular ( $\omega$ ) ou na relação  $2\pi f$ . Logo, a definição da impedância elétrica para um circuito RLC (resistor-indutor-capacitor) é apresentada pela Equação 11 (Haruta, 2000):

$$Z_{RLC} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad \text{Equação 11}$$

### 3.3.3 Circuito equivalente para estudo da magnetostricção

Um circuito equivalente, considerando os efeitos magnético e elástico, pode ser adotado para o estudo do princípio de funcionamento dos sensores magnetostrictivos. O circuito elétrico equivalente com funcionamento a partir do acoplamento indutivo entre um sensor ME e as bobinas (de excitação e recepção do sinal) é apresentado na Figura 6. A malha I apresenta uma fonte que, através da tensão elétrica (V) e da impedância elétrica da fonte ( $Z_s$ ) são conectados a malha II por meio dos nós “a” e “b” (extremidades da bobina). A malha III mostra que a bobina está indutivamente acoplada ao sensor ME através de  $j\omega M$ . (BUTTERWORTH, SMITH, 1931; XUE, LI, YANG, 2012; CHAI et al, 2013)

A análise conta com um circuito RLC série da bobina ( $R_2, \frac{1}{j\omega C_2}$  e  $j\omega L_2$ ) acoplado magneticamente com o circuito RLC série do sensor ME ( $R_3, \frac{1}{j\omega C_3}$  e  $j\omega L_3$ ). Onde  $j$  é a unidade do número imaginário,  $M$  é a mútua indutância e  $\omega$  é a frequência angular  $i_1, i_2$  e  $i_3$  correspondem às correntes de cada malha. (BUTTERWORTH, SMITH, 1931; XUE, LI, YANG, 2012; CHAI et al, 2013)

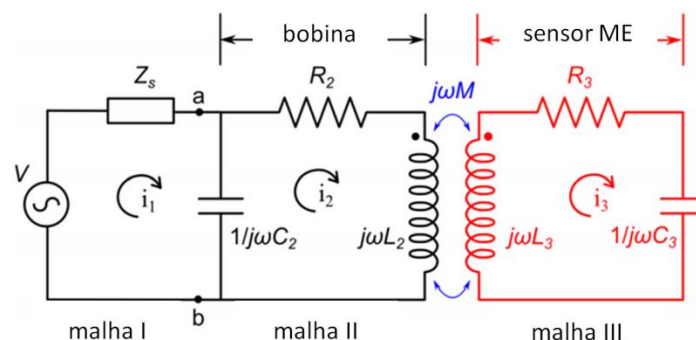


Figura 6 Circuito elétrico equivalente composto por fonte e bobina indutivamente acoplada com sensor ME (CHAI et al, 2013)

A medida que a mútua indutância cresce, a impedância da ressonância magnetoelástica resulta na vibração do sensor. O sinal depende principalmente da impedância de carga. Ao elevar a mútua indutância é possível alcançar melhores sinais de amplitude do conjunto. (CHAI et al, 2013) A representação da impedância do sensor ME (impedância do movimento), ao subtrair a impedância do solenóide vazio, pode ser expressada como mostrado na Equação 12 (MUNGLE et al, 2008; CHAI et al, 2013):

$$Z_{sensor} = R_e + j\omega L_s + \frac{j\omega L_s \frac{4}{\pi^2} k^2 \omega_0^2}{\omega\omega_0 - \omega^2 + j\xi\omega - j\frac{\xi}{2}\omega_0 + \frac{\xi^2}{4}} \quad \text{Equação 12}$$

Onde  $R_e + j\omega L_s + Z_m$  representam respectivamente a resistência dada pelas correntes parasitas, a indutância desacoplada e a componente complexa de movimento. A impedância de movimento é expressada em termos do coeficiente de acoplamento magnetoelástico ( $k$ ), da frequência natural do sensor ( $\omega_0$ ), da frequência de ressonância ( $\omega$ ), do coeficiente de amortecimento ( $\xi$ ) e da indutância desacoplada ( $L_s$ ). (MUNGLE et al, 2008; CHAI et al, 2013). Não existe um equivalente para a componente  $Z_m$  em termos de resistores, capacitores e indutores ideais, porém é possível fazer uma aproximação com um circuito similar RLC paralelo restringindo uma banda de frequências (MUNGLE et al, 2008).

#### 3.4.4 Impedância magnética, coeficiente de acoplamento e velocidade da onda.

A Equação 13 mostra a impedância sob um campo magnético uniforme aplicado em toda a extensão da amostra. As constantes dependem da configuração da bobina em função das frequências de ressonância e anti-ressonância, da velocidade do som ( $v$ ) do coeficiente de acoplamento magnético ( $k$ ), e do fator de interpolação ( $\zeta$ ) (HATHAWAY, SPANO, 1984):

$$Z_{mag} = j\omega (\text{constante}) \mu_T \left( \frac{k^2(1-\zeta) \frac{\tan(\frac{\omega a}{v})}{(\frac{\omega a}{v})} + (1-k^2)}{-\zeta k^2 \frac{\tan(\frac{\omega a}{v})}{(\frac{\omega a}{v})} + 1} \right) \quad \text{Equação 13}$$

As deduções do parâmetro  $\zeta$  correspondentes aos casos limites de indução uniforme e campo magnético uniforme, como  $\zeta = 0$ ,  $h_0 = 0$ , de tal modo que quando  $\zeta = 1$ ,  $b_0 = 0$  são reduzidas na expressão da Equação 14: (HATHAWAY, SPANO, 1984; SCHMIDT, 2000)

$$\zeta = h_0 / (|h_0| + |b_0| / \mu_\sigma) \quad \text{Equação 14}$$

O  $k$  é um importante parâmetro que define a eficiência da conversão da energia dos materiais ME e possui a capacidade de descrever a performance de um transdutor. (VAN DER BURGT, 1953) definiu o coeficiente magnetoelástico como uma fração da energia convertida (magnética para energia elástica e vice-versa). A partir da seleção de um campo magnético apropriado (ultrapassando o campo de anisotropia), o  $k$  *quasi-estático* usualmente expressa a mais alta eficiência na transformação da energia sendo dependente da  $M$  e das propriedades do material (LACHEISSERIE, 1993; HATHAWAY, SPANO, 1984; apud O'DELL, 1982). As melhores propriedades magneto-mecânicas são encontradas em materiais com altas constantes de magnetostricção, baixas anisotropias (SAVAGE, SPANO, 1982) e sem tensionamento (SCHMIDT, 2000).

Para uma amostra magnetoelástica oscilante uma solução harmônica para  $B$  e  $H$  pode se tornar mais simples com uma equação que utiliza os parâmetros  $k$  e  $\zeta$  como parte da solução (HATHAWAY, SPANO, 1984). A questão se remete ao quão bem ajustada deve estar a Equação 13 na medida da impedância. O procedimento usual é identificar quando  $Z$  é infinita (corresponde a frequência de ressonância) ou  $Z$  é zero (a frequência anti-ressonância). Nos casos limites (onde  $\zeta$  é assumido como zero ou unitário) a relação destas duas frequências é suficiente para extrair um único valor de  $k$ . (HATHAWAY, SPANO, 1984, SCHMIDT, 2000)

No caso apresentado por (HATHAWAY, SPANO, 1984), é necessária a seleção de uma frequência próxima da ressonância ( $fr'$ ) para determinar  $\zeta$ . A introdução de  $\zeta$ , é vista somente como um primeiro passo numa simples aproximação das suposições de campo  $H$  e indução  $B$  uniformes. A flexibilidade das suposições de indução magnética e campo uniformes são essenciais para a compreensão do comportamento de fitas com alto acoplamento magnético. (HATHAWAY, SPANO, 1984) concluem que pode ser esperado um alto acoplamento magnetomecânico em fitas longas, onde as medidas sejam capazes de detectar a 3ª harmônica.

O coeficiente efetivo de acoplamento magnético na direção de  $z$ , em resposta ao campo magnético direcionado em  $z$ , e o fator de interpolação para as variações longitudinais da indução e do campo magnético, são descritas em (SCHMIDT, GRIMES, 2001; HATHAWAY, SPANO, 1984; CLARK, 1980; MEEKS, HILL, 1983). Uma relação constitutiva para a frequência de ressonância e anti-ressonância é derivada a partir da Equação 15a e b da impedância, (SCHMIDT, 2000)

$$\tan\left(\frac{\omega_{ra}}{v}\right) = \frac{1}{(k^2)\zeta} \left(\frac{\omega_{ra}}{v}\right) \quad \text{Equação 15 a}$$

$$\tan\left(\frac{\omega_{aa}}{v}\right) = \frac{k^2-1}{(1-\zeta)k^2} \left(\frac{\omega_{aa}}{v}\right) \quad \text{Equação 15 b}$$

Para uma investigação da ressonância mecânica ( $z = +a$ ) leva-se em conta uma tensão mecânica harmônica nas extremidade de uma barra. Dependentes do  $k$  e das condições de contorno magnéticas (representada por  $\zeta$ ), a frequência de ressonância magnetoelástica pode desviar significativamente da frequência de ressonância mecânica. O termo  $\omega/v = l/\lambda$ , utilizado para as condições de ressonância nas Equações 15 a e b refere-se ao sensor de comprimento  $l$  para o comprimento de onda mecânica  $\lambda$ . (SCHMIDT, 2000).

A equação 15 a mostra que a velocidade do som não pode ser determinada a partir apenas da frequência de ressonância a menos que os valores exatos de  $k$  e  $v$  sejam conhecidos. No entanto, usando medidas da primeira e segunda ordem das frequências de ressonância e anti-ressonância, os parâmetros  $v$ ,  $k$ , e  $\zeta$  podem ser resolvidos numericamente. Cálculos mostram que fitas sensoras MetglasTM 2826 MB com variação de campo de polarização coincidem nas frequências de ressonância magnetoelásticos e mecânica (SCHMIDT, 2000). A Figura 7 mostra a velocidade do som ( $v$ ) e o coeficiente de acoplamento ( $k$ ), que foram computados de medidas em função de uma variação no campo magnético estático.

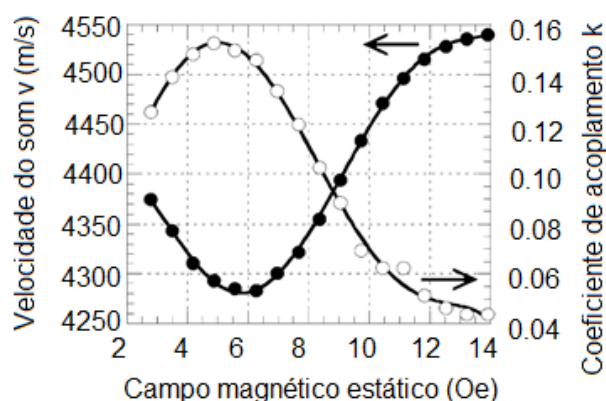


Figura 7 Velocidade do som (círculo preenchido) e coeficiente de acoplamento (círculo vazado) de uma fita sensora MetglasTM 2826 M em função de um campo magnético de polarização aplicado. (SCHMIDT, 2000).

No crescimento de um campo magnético estático aplicado (HCC) para uma investigação da frequência fundamental de vibração, observa-se uma mudança da frequência de ressonância explicada pelo efeito  $\Delta E$ . A Figura 8 mostra a variação da frequência de ressonância para um sensor em função do campo magnético estático aplicado. Uma alteração na ressonância pode ser causada por uma mudança no módulo  $E$  dependente do estado de magnetização. Após um processamento térmico ou magnético, sob tensão mecânica ou distúrbios de campo magnético, uma fita ME mostra influência na frequência de ressonância mínima. (SCHMIDT, 2000, CULLITY, 1972; BOZORTH, 2003). Ao aproximar os valores de campo de polarização ( $H_{cc}$  mínimo) ao campo de anisotropia  $H_a$ , ocorre a frequência de

ressonância mínima (LIVINGSTON, 1982) enquanto o coeficiente de acoplamento magnetoelástico atinge um valor máximo. (BURGT, 1953; WUN-FOGLE et al, 1988)

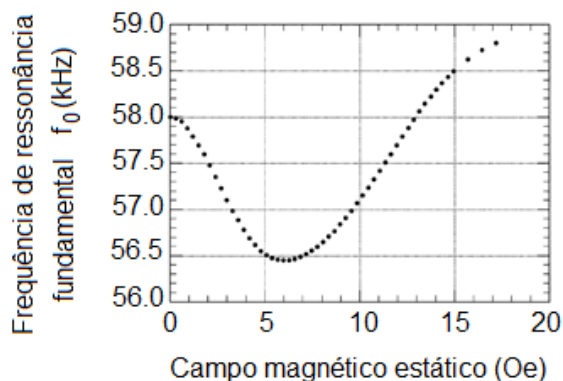


Figura 8 Frequência de ressonância Metglas 2826 MB em função do campo magnético estático aplicado com dimensões de 38.1mm x 12.7mm x 30.5 $\mu$ m. (SCHMIDT, 2000)

Uma determinação precisa da velocidade do som dentro do sensor requer que a magnetização permaneça constante durante a medição. Uma mudança da anisotropia magnética no material do sensor através de tensões induzidas pela cobertura do sensor, resistência do revestimento ou de alterações dimensionais, resultam em uma mudança do  $H_{cc}$  mínimo que pode garantir as maiores relações  $k$  e  $v$ . (WUN-FOGLE et al, 1988) O fator de desmagnetização está relacionado com a geometria da amostra e mostra influência da anisotropia para sensores com diferentes relações dimensionais. (AHARONI, 1996)

Uma característica linear dos dados indica que, para uma frequência ressonante mínima, os sensores têm o mesmo estado de magnetização e, portanto, a mesma velocidade do som ( $v$ ). Diversos fatores tais como a anisotropia magnética (MEEKS, HILL, 1983), tensão residual (WUN-FOGLE, 1988), temperatura (JAIN et al, 2000), pressão (SAVAGE, SPANO, 1982), e o fator de desmagnetização (AHARONI, 1998) do sensor tem uma influência sobre a frequência de ressonância (CULLITY, 1972). Transdutores geralmente não operam com altos valores de amplitude de corrente (em baixas frequências de excitação). Logo, para baixos valores de amplitude uma relação linear pode ser modulada para o deslocamento em função da corrente. A corrente alternada deve ser dimensionada a tal ponto que não cause interferência cíclica na curva de histerese do campo magnético estático em função da indução magnética (SCHMIDT, 2000; HALL, 1994).

Para uma faixa de sinais médios mesmo em baixas frequências o efeito da histerese magnética assume-se como uma relação elíptica entre a corrente e o deslocamento, até mesmo em baixas frequências. Os efeitos dinâmicos tendem ser acentuados nos cantos dos loops de histerese com o crescimento da frequência. O modelo linear é apresentado pela Figura 9 para o deslocamento em função da corrente elétrica (HALL, 1994)



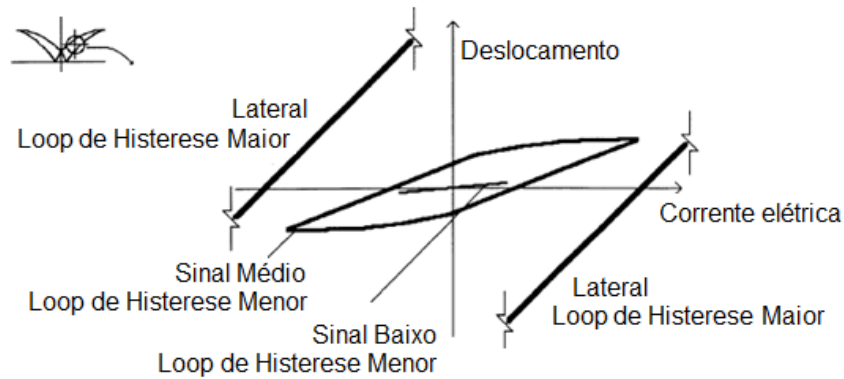


Figura 9 Esquema de representação do deslocamento para uma corrente elétrica em baixa frequência de operação para um transdutor de Terfenol-D (HALL, 1994)

Se um campo magnético HCC estacionário é sobreposto em um pequeno campo magnético HAC, estas vibrações ocorrem próximas ao modo linear em sincronia com a frequência de excitação controlando a excitação de ondas acústicas dentro da amostra (INOUE, FUJII, MIYAMA, 1983). As vibrações das amostras são maiores se as frequências de excitação coincidem com as características de ressonância acústica da amostra. (SCHMIDT, 2000). Uma amostra magnetoelástica polarizada responde com um comportamento próximo ao linear “*quasi-piezo*”, ou seja, habilidade de transformar uma energia elástica em magnética e vice-versa quando magneticamente polarizada. (IEEE Std 319, 1990).

A magnetostricção pode ser modelada por equações constitutivas que geralmente não são lineares (ENGDAHL, 2000). É possível realizar uma aproximação das equações magnetostrictivas constitutivas por analogias com a piezoelectricidade (onde o campo elétrico é substituído pelo campo magnético) (RIBICHINI, 2011)

Equações 16 e 17 constitutivas para o campo magnético estático (RIBICHINI, 2011):

$$\epsilon_{cc} = s^H T_{cc} + D \overline{H}_{cc} \quad \text{Equação 16}$$

$$\overline{B}_{cc} = D^T T_{cc} + \mu^T \overline{H}_{cc} \quad \text{Equação 17}$$

Equações 18 e 19 constitutivas para o campo magnético dinâmico (RIBICHINI, 2011)

$$\epsilon_{ca} = s^H T_{ca} + d \overline{H}_{ca} \quad \text{Equação 18}$$

$$\overline{B}_{ca} = d^T T_{ca} + \mu^T \overline{H}_{ca} \quad \text{Equação 19}$$

$\vec{H} = 0\hat{i} + 0\hat{j} + H_z\hat{k}$ , logo  $\vec{H} = H_z$ . Para um material isotrópico consideramos que as deformações ocorrem em todas as direções ( $\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0$ ) com volume constante (considerando uma magnetostricção isovolumétrica). O propósito é de selecionar o ponto de operação na curva de magnetização onde um campo HCC sobreposto à um campo HAC (de intensidade muito inferior) são aplicados através do conjunto de bobinas ao sensor (RIBICHINI, 2011).

A operação dos sensores é baseada na excitação de uma onda elástica longitudinal estacionária. A velocidade de fase de uma onda elástica e a frequência de ressonância são dependentes da densidade e do módulo de Young, e do coeficiente de Poisson do sensor (STOYANOV, GRIMES, 1999). A velocidade de grupo de uma onda longitudinal acústica ( $v$ ) conforme a Equação 20 é representada pela raiz de uma razão entre do módulo de elasticidade ( $E$ ) e a densidade ( $\rho$ ). (SCHMIDT, GRIMES, 2001)

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad \text{Equação 20}$$

A análise padrão para o formato da fita vem de uma suposição unidimensional de que, se a secção transversal é suficientemente pequena comparado com o comprimento da amostra, o modo mecânico dominante será uma oscilação longitudinal simples. Ao aplicar as condições de contorno para um sensor vibrando livre, as soluções para a indução magnética e o campo magnético para o sensor são: (HATHAWAY, SPANO, 1984)

O ajuste das Equações 42 a e b para uma medida precisa da impedância está em identificar as mais baixas frequências as quais as expressões assumam-se (infinita e zero) através das frequências de máximo e mínimo da impedância medida (respectivamente  $f_r$  e  $f_a$ ). O procedimento detalhado por (HATHAWAY, SPANO, 1984; SCHMIDT, 2000) indica que seja escolhida uma frequência próxima da ressonância definida analiticamente pela Equação 13 da impedância em função das relações de frequências  $f_r/f_a$  (ressonância fundamental/anti-ressonância fundamental) e  $f_r/f_r'$  (ressonância fundamental/ressonância terceira harmônica), assumindo que o parâmetro de interpolação não varia significativamente com a frequência e que o campo magnético e a indução magnética permanecem constantes por toda a faixa de frequências. Maiores detalhes como as condições experimentais as condições experimentais do solenóide e da amostra para um campo magnético uniforme  $H$  são discutidas em (MODZELEWSKI et al, 1981) bem como as correntes parasitas, que podem variar o campo magnético ao longo do comprimento no interior da fita.

$$H_z = \left[ h_0 \cos\left(\frac{\omega z}{v}\right) + H_0 \right] e^{j\omega t} \quad \text{Equação 21 a}$$

$$B_z = \left[ b_0 \cos\left(\frac{\omega z}{v}\right) + B_0 \right] e^{j\omega t} \quad \text{Equação 22 b}$$

A identificação das frequências (ressonância e anti-ressonância) referentes a impedância medida para o modo fundamental e o terceiro harmônico nas quais as Equações 21a e b são infinita e zero, e as deduções para a determinação dos parâmetros  $k$ ,  $\nu$ , e  $\zeta$  que correspondem aos casos limites de indução uniforme e campo magnético uniforme, não serão abordadas neste trabalho, porém, podem ser encontrados com detalhes em (SCHMIDT, 2000).

A frequência de ressonância (onde o maior deslocamento e velocidade ocorrem) depende do tipo de excitação e do controle por corrente (corrente não varia) onde a ressonância será próxima a frequência onde o campo  $H$  é constante. O controle pode ocorrer através da tensão elétrica constante onde a ressonância será atingida quando a impedância for mínima para a frequência onde a indução  $B$  é contante. (SCHMIDT, 2000) indica em sua tese que as relações das frequências são suficientes para extrair um único valor de  $k$  onde as Equações 21a e b são soluções válidas. (SCHMIDT, 2000) mostra que os parâmetros  $k$ ,  $\nu$ , e  $\zeta$  podem ser calculados através de uma solução numérica assumindo que sejam homogêneos para toda a amostra (independente da frequência) a partir das medidas experimentais das frequências fundamentais de ressonâncias e anti-ressonância e ressonância da terceira harmônica para uma amostra magnetoelástica.

O estudo dos modos de vibração para barras finas baseia-se nas condições de geometria e campo magnético que estas são submetidas, e apresentam a vibração na primeira ordem da frequência de ressonância. O modo longitudinal para uma barra na configuração de ponte (extremos fixos), ou na configuração com extremos livres se comportam de acordo com as expressões matemáticas que refletem o comportamento magnetostrictivo através da Equação 23 (ponte) e para a equação 23 b é considerada uma viga (com um dos extremos livre e o outro fixo). Este conjunto de equações correspondem ao primeiro modo longitudinal de vibração. (TIMOSHENKO, YOUNG, 1955; TONG, 1960; LIANG et al, 2007).

$$f_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad f_1 = \frac{1}{4l} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \qquad \text{Equação 23 a e b}$$

As equações apresentadas são em geral reflexões de uma barra vibrando no modo longitudinal para uma barra de secção retangular considerando um módulo elástico isotrópico. (LIANG et al, 2007) A barra pode ser considerada como um plano-deformação expressado pela Equação 24 se a espessura e a largura forem muito pequenas comparadas ao comprimento, onde  $\nu$  é o coeficiente de Poisson,  $E$  o módulo de Young: (LANDAU, LIFSHITZ, 1986; BLEVINS, 1979; LIANG et al, 2007):

$$E_{\text{plano deformação}} = \frac{E}{E(1-\nu^2)} \qquad \text{Equação 24}$$

(LIANG et al, 2007), através de resultados experimentais para uma liga METGLAS2826MB ( $\nu$  próximo de 0,33), identificaram que a velocidade da onda acústica foi

influenciada pelo coeficiente de Poisson para um comportamento módulo biaxial ou tensão-plano dominante. Logo a frequência natural de vibração para uma tira livre é dada pela Equação 25 a e sob condições de extremos fixo-livre pela Equação 25 b.

$$f_1 = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)}} \quad f_1 = \frac{1}{4l} \sqrt{\frac{E}{\rho(1-\nu)}} \quad \text{Equação 25 a e b}$$

Onde  $\rho$  e  $\nu$  são considerados constantes teoricamente e  $E$  é constante quando  $H = 0$  (condição em que a frequência teórica do sensor recém fabricado é calculada) sendo proporcional ao inverso do comprimento do sensor. (SHEN, 2010) mostra experimentalmente através da Figura 10, que utilizando a Equação 25 a, os valores se aproximam da previsão teórica. Esta apresenta a resposta a mudança de frequência de ressonância do sensor magnetoelástico em função da variação do comprimento. A variação de  $500\mu\text{m}$  até  $5\text{mm}$  de comprimento onde dez sensores foram utilizados para cada comprimento com parâmetros (ressonância, densidade e módulo elástico) conforme a folha de dados (HONEYWELL, 2008) e Poisson por (LIANG et al 2007).

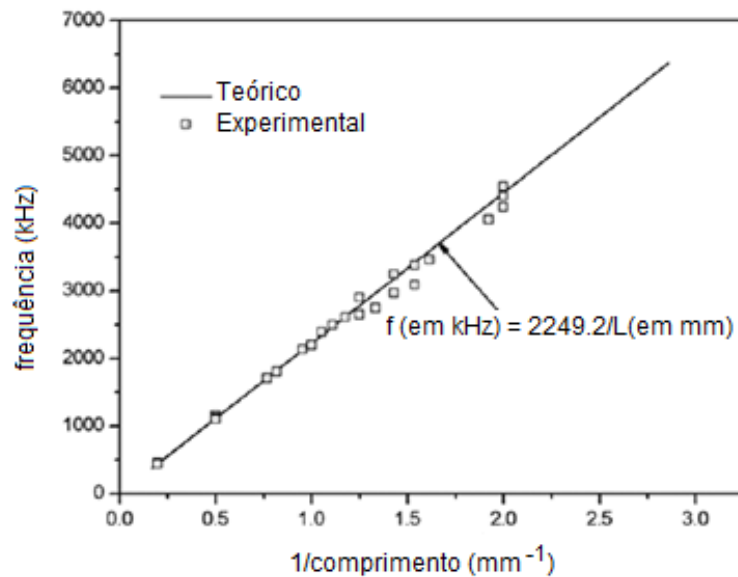


Figura 10 Calibração da frequência de ressonância em função do comprimento do sensor (SHEN, 2010)

### 3.4 Efeito do campo magnético

O comportamento da ressonância do sensor monitorada através da magnitude e fase depende do campo magnético estático externo aplicado que muda o acoplamento da magnetização e a elasticidade do material do sensor causando uma magnetização interna do material magnetostrictivo, alterando o seu estado estável original. (LIVINGSTON, 1982; PEROV et al, 2007) A mudança na magnetização altera o módulo de Young do sensor magnetostrictivo como descrito por (LIVINGSTON, 1982) na Equação 26.

$$\frac{1}{E_H} = \frac{1}{E_M} + \frac{9\lambda_s^2 H^2}{M_s H_{A\sigma}^3} \quad \text{Equação 26}$$

Onde  $E_H$  é o módulo de Young do sensor magnetostrictivo (sob um campo magnético H),  $E_M$  é o módulo de Young sem o efeito do campo externo (por exemplo na saturação da magnetização),  $H_{A\sigma}$  é o campo reduzido de anisotropia,  $\lambda_s$  é a saturação da magnetostricção e  $M_s$  é a saturação da magnetização (SHEN, 2010). A relação entre  $H_{A\sigma}$  e H é descrita por (LIVINGSTON, 1982) na Equação 27.

$$M = M_s \frac{H}{H_{A\sigma}} \quad \text{Equação 27}$$

Substituindo as equações da susceptibilidade magnética, e da magnetização na Equação 28, tem-se:

$$\frac{1}{E_H} = \frac{1}{E_M} + \frac{9\lambda_s^2 H^2 \chi^3}{M_s^4} \quad \text{Equação 28}$$

Substituindo  $E_H$  na equação da frequência de ressonância correspondente ao modo longitudinal de vibração da fita livre tem-se a frequência de ressonância do sensor sob um campo magnético H (SHEN, 2010). A relação entre as frequências de ressonância do sensor,  $f_H$  (sob campo magnético) e  $f_1$  (sem efeito de um campo magnético externo) conforme a Equação 29 é função da magnetização e da susceptibilidade do material do sensor para o primeiro modo longitudinal. (SHEN, 2010)

$$f_H = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{E_M}{\rho(1-\nu)} \left(1 + \frac{9E_M \lambda_s^2 H^2 \chi^3}{M_s^4}\right)^{-1}} = \left(1 + \frac{9E_M \lambda_s^2 H^2 \chi^3}{M_s^4}\right)^{-1/2} f_1 \quad \text{Equação 29}$$

Na investigação de um sensor magnetoelástico para detecção de bio-agentes, (SHEN, 2010) utilizou elementos finitos para projetar e desenvolver um sensor magnetoelástico livre. O

comportamento teórico e medidas experimentais são descritos a partir das investigações das curvas M-H de diferentes geometrias sob influência do H no comportamento da ressonância na investigação da melhor sensibilidade do sensor nos meios ar e água. (SHEN, 2010) conclui que para menores dimensões do sensor a sensibilidade cresce.

### 3.5 Medidas com Bobinas de Helmholtz

As oscilações mecânicas de um sensor magnetostrictivo remoto podem ser excitadas utilizando um campo magnético variável no tempo (GRIMES et al, 1999). Oscilações mecânicas devido ao efeito da magnetostricção causam uma mudança do fluxo magnético no material e podem ser detectadas através de um conjunto de bobinas de captação. Vários dispositivos podem medir as vibrações como mostrado na Figura 11, um microfone (para detecção da onda acústica), na indução (através de bobinas), ou através da amplitude da modulação de um feixe de laser refletido pela superfície do sensor (SCHMIDT, GRIMES, 2001).

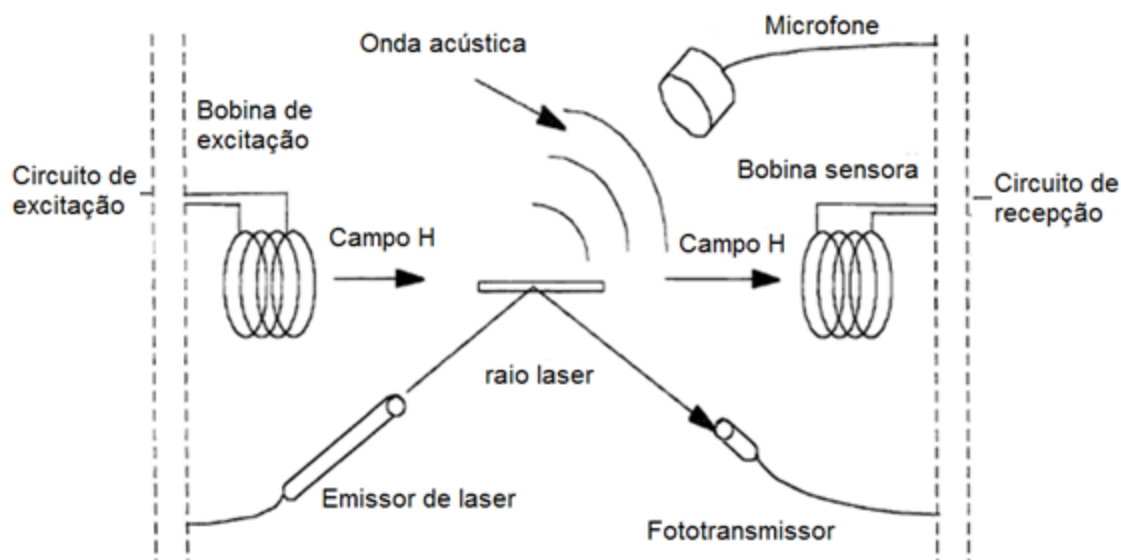


Figura 11 Esquemático do setup experimental de medida da frequência de ressonância de um sensor magnetoelástico através de dispositivos que medem vibrações. Adaptada de (SCHMIDT, GRIMES, 2001)

Para estabelecer um campo magnético na amostra, geralmente são usadas bobinas de Helmholtz (COEY, 2009; CULLITY, GRAHAM 2009), principalmente pela facilidade de acesso à amostra que esta geometria apresenta para medições de vibrometria e impedância elétrica (TORMENS, 2014). A Equação 30 estabelece o campo magnético que pode ser determinado

pelas bobinas onde  $\mu_0$  é a permeabilidade ( $4\pi 10^{-7} \frac{H}{m}$ ),  $n$  é o número de voltas da bobina,  $i$  é a corrente, e  $r$  o raio da bobina. (COEY, 2009; CULLITY, GRAHAM 2009).

$$H = \frac{8\mu_0 ni}{5\sqrt{5}r} \quad \text{equação 30}$$

A operação desses dispositivos na magnetização uniforme da amostra é baseada na excitação de bobinas aplicando um pequeno campo AC em paralelo a um campo CC muito forte com o propósito de selecionar o ponto de operação na curva de magnetização do sensor. O HCC também pode ser fornecido através de um filme fino magneticamente duro adjacente ao sensor. (STOYANOV, GRIMES, 1999).

A excitação do HAC com as bobinas de Helmholtz pode ser realizado com sinal de pulsos contínuo, por exemplo senoidal, ou com o formato *tone burst*, que mostra características ajustáveis como taxa de repetição das componentes, máxima amplitude do sinal na frequência de interesse, e a largura de banda ajustável do espectro inversamente proporcional ao número de ciclos (GENERAL RADIO COMPANY, 1965).

Pode ser feita uma analogia da excitação das fitas magnetoelásticas com uma campainha, uma vez que em uma martelada a energia cinética é convertida em energia elástica, o resultado será uma deformação mecânica no martelo e uma queda da amplitude do sinal com o tempo. Conforme a Figura 12, embora muitas frequências sejam geradas por uma martelada, frequências diferentes da ressonância são rapidamente amortecidas (GRIMES, KOUZOUDIS, 2000).

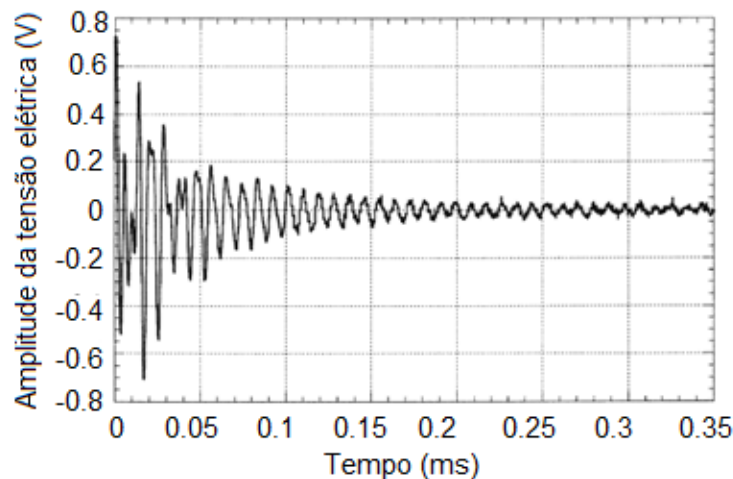


Figura 12 Resposta transiente do sinal de saída da interação do sensor ME com a bobina sensora (GRIMES, KOUZOUDIS, 2000)

Uma fácil determinação da frequência emitida pela onda sonora é realizada geralmente através de uma transformada de Fourier. Esta ferramenta matemática trabalha na conversão

de sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência. A transformada de Fourier para um sinal característico de tensão elétrica aplicado na bobina sensora (para um fluxo magnético variável no tempo) permite determinar as ressonâncias do sensor (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000). O interesse é maior na magnitude do sinal de resposta comparado com a fase, pois através da magnitude determina-se a frequência de ressonância (pela localização do pico), e também permite o cálculo do fator de qualidade (a partir da metade da potência da largura de banda) (ZENG et al, 2004). A ressonância apresentada em 58,264kHz da Figura 13 teve medidas realizadas no meio ar com temperatura ambiente. (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000). O sensor magnetoelástico foi exposto a um campo dinâmico de 50mOe gerado por um par de bobinas de Helmholtz (de 50cm de diâmetro e 16 voltas) e uma bobina sensora (localizada entre o conjunto de solenóides concêntricas de 15 x 15cm e 200 voltas). (STOYANOV, GRIMES, 1999).

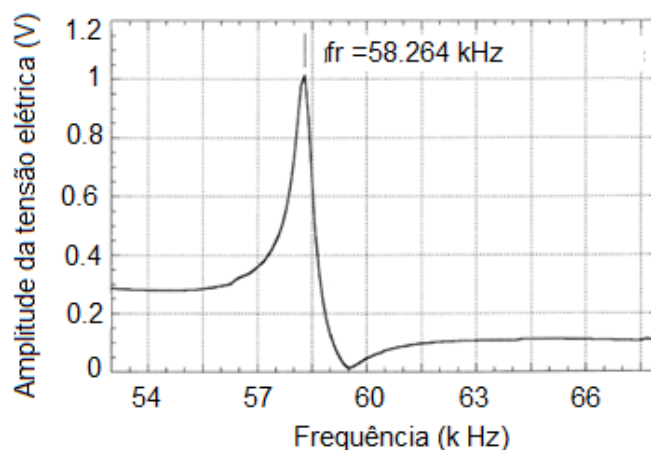


Figura 13 Frequência de ressonância 2826MB de dimensões 5 mm x 40 mm x 30  $\mu$ m (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000)

A fita com liga Metglas 2826MB localizada dentro da bobina sensora apresenta dimensões de 5 mm x 40 mm x 30  $\mu$ m e composição  $Fe_{40}Ni_{38}Mo_4B_{18}$  com uma anisotropia para um campo magnético de aproximadamente 6.5Oe. Fitas com estas características apresentadas são fabricadas por *rapid melt-quenching* (JILES, 1991) onde um campo magnético estático é orientado no comprimento da fita. (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2000; TORMENS, 2014).

As oscilações mecânicas geradas pelo campo magnético e pela indução magnética podem ser descritas de forma adequada por uma onda estacionária nas condições de contorno de um sensor livre. A frequência ressonante característica do padrão de vibração dos sensores magnetostrictivos permite que os sensores sejam monitorados remotamente (sem o uso de conexões físicas diretas ou fios), tornando viável a medição dos parâmetros ambientais de difícil acesso (GRIMES, KOUZOUUDIS, 2011). A deformação e a tensão são descritas em



termos do deslocamento na direção do eixo longitudinal, através de equações que expressam o estado magnético através do padrão de vibração (SCHMIDT, GRIMES, 2001).

A velocidade de fase da onda elástica sofre alterações em decorrência da frequência de ressonância mostrar dependência da densidade, do módulo de Young e do coeficiente de Poisson (STOYANOV, GRIMES, 2011). A mudança de velocidade ocorre em meio a fatores como rugosidade (LACHEISSERIE, 1982) e presença de tensões na superfície (HEUSLER et al, 1988) e pressão (GRIMES, KOUZODIS, 2000; JAIN, CAI, GRIMES, 2001). Quando o sensor é imerso em um líquido, ocorre humedecimento da superfície (CRC HAND. CHEM. PHYS, 1975). Para a interpretação dos deslocamentos das ressonâncias são observados alguns fatores como: a força de ligação interfacial, molecular (STOYANOV, GRIMES, 2011), energia da superfície livre e a densidade do líquido (BRADBURY, 1981).

Em aplicações da fita magnetoelástica na detecção de bactérias e esporos em meios líquidos, o procedimento usual é determinar a mudança na resposta em frequência do sensor quando submerso no meio. Na teoria das vibrações, a frequência de ressonância de uma fita livre para uma oscilação amortecida ( $f_{\xi}$ ) pode ser representada pela Equação 31 (THOMSON, 1988):

$$f_{\xi} = f_1 \sqrt{1 - \xi^2} \quad \text{Equação 31}$$

Onde  $f_1$  é a frequência de ressonância no ar e  $\xi$  é a razão de amortecimento. No meio líquido a interação entre o meio e o sensor causa o amortecimento da oscilação. Nesse caso  $\xi < 1$ , então  $f_{\xi} < f_1$  havendo um decréscimo na frequência do sinal. (WUN-FOGLE, 1988)

A Figura 14 mostra um sensor sendo monitorado remotamente através de uma bobina sensora onde o meio é quimicamente absorvido pela camada e muda a frequência de ressonância do sensor. O filme magnetostrictivo possui um lado liso e um lado ligeiramente rugoso (SHEN, WEN, 2009) onde a frequência de ressonância é alterada de acordo com a absorção da camada pelo meio envolvido (GRIMES, KOUZODIS, 2000).

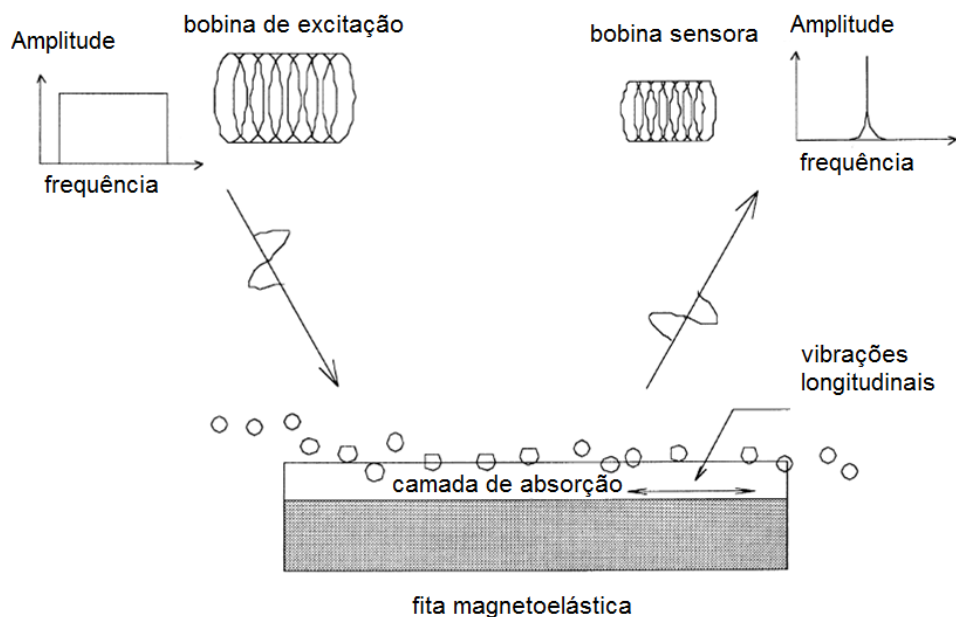


Figura 14 O esquemático desenhado demonstra o princípio de operação de um sensor magnetostrictivo. Um campo magnético de amplitude fixa é aplicado ao sensor utilizando bobinas de Helmholtz e uma bobina sensora utilizada na captação da ressonância. Adaptada de (GRIMES, KOUZOUNDIS, 2000)

Em medidas que envolvem a variação de viscosidade, o sinal da resposta de saída deve ter uma boa relação-sinal-ruído devido ao alto fator de amortecimento. A melhor sensibilidade do sensor magnetoelástico é apresentada no meio ar em uma comparação com meios com maior viscosidade como água e óleo (SHEN, 2010).

O campo magnético ideal pode ser novamente calculado levando em conta o fator de amortecimento do sinal, com objetivo de polarizar o sensor, para a máxima sensibilidade da resposta nos meios aos quais for submetido (SCHMIDT, GRIMES, 2001). A sensibilidade do sensor é determinada pelas suas dimensões se os parâmetros  $E$ ,  $\nu$ , e  $\rho$  se mantiverem constantes (SHEN, 2010). São fortemente investigadas técnicas com intuito de amplificar o sinal do deslocamento obtido por atuadores projetados em base a materiais piezolétricos e magnetostrictivos (SHEN, WEN, 2009, LIANG et al, 2007).

Por exemplo para um sensor livre usado em busca da maior a sensibilidade à massa exposta em uma aplicação para agentes biológicos um fator de calibração foi calculado. A conversão de deslocamentos em frequências de ressonância equivalentes à variação das cargas de massa permitiu que uma inclinação da curva característica do sinal fosse criada (BAIMPOS, 2010).

A seguir, é mostrado um modelo teórico baseado na vibração longitudinal de uma tira fina, homogênea e magnetostrictiva imersa em um líquido na presença de forças externas (LANDAU, LIFSHITZ, 1986). A apresentação da Figura 15 mostra que as vibrações no plano são proporcionadas por uma excitação de um campo magnético AC ao propagar um onda transversal fora da superfície do ressoador. (STOYANOV, GRIMES, 1999).

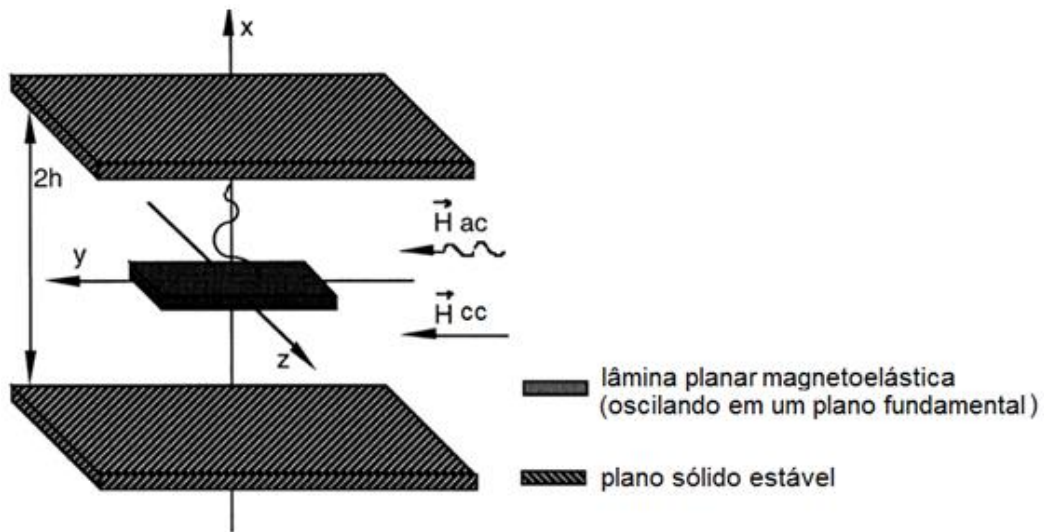


Figura 15 Sensor na forma de um filme fino magnetostrictivo imerso em um líquido e localizado entre dois planos fixos (STOYANOV, GRIMES, 1999)

Quando um sensor vidro metálico plano com superfície perfeitamente lisa é imerso em um líquido, ondas cisalhantes são criadas no meio, dadas pela vibração do sensor. A vibração gera um amortecimento com força oposta as oscilações do sensor e alteram a frequência de ressonância juntamente ao fator de mérito do sensor. Entretanto, estas vibrações são mais pronunciadas em frequências específicas correspondentes a ressonâncias mecânicas. A frequência de ressonância de um sensor magnetostrictivo desloca-se linearmente dado o carregamento (STOYANOV, GRIMES, 1999).

No modelo de (STOYANOV, GRIMES, 1999) foi descrita uma expressão para a velocidade do fluido em função da distância do plano de vibração que descreve um movimento de um fluido incompressível, limitado por duas superfícies com orientação paralela infinita, onde uma das superfícies é fixa e a outra oscila no seu plano (BRADBURY, 1981). Uma onda elástica transversal é gerada na superfície de vibração que se propaga no fluido no sentido do plano estável. A tensão de cisalhamento (ou força de fricção) por unidade de área de vibração do plano é relacionada com taxa de deformação cisalhante. Nos testes, são buscadas as ressonâncias pela sua maior amplitude bem como o local onde o pico da frequência de ressonância ocorre, a fim de descobrir o deslocamento de frequência sofrido sob um controle de temperatura devido a dependência da viscosidade (GRIMES et al, 1999).

(GRIMES et al, 1999), através de uma tomografia da superfície do sensor, apresenta evidências de irregularidades para uma rugosidade média da área na superfície da face mais áspera da fita magnetostrictiva exposta ao ar durante o processo de têmpera. Encontraram-se irregularidades na superfície em uma macro escala nas amostras (como buracos de 2 até 3  $\mu\text{m}$ ), que poderiam contribuir com as viscosidades mais elevadas, através do aprisionamento

de parte desse fluido (massa depositada sobre a fita). A linearidade apresentada pelas curvas de viscosidade e deslocamento em frequência garantem uma excelente performance, após uma calibração apropriada (ONG et al, 2001). Para calcular uma variação de frequências é necessário tomar conta do volume de fluido aprisionado na superfície do material e da massa da fita magnetostrictiva. Em contrapartida, pode-se realizar uma calibração empírica na determinação da viscosidade, evitando assim a necessidade de determinar o volume de fluido preso na fita (STOYANOV, GRIMES, 1999). (STOYANOV, GRIMES, 1999) mostra uma relação entre a frequência de ressonância e a pressão para ligas de diferentes espessuras conforme a Figura 16, onde a pressão de ar e densidade são linearmente relacionados (CRC HANDBOOK CHEM. PHYS., 1975).

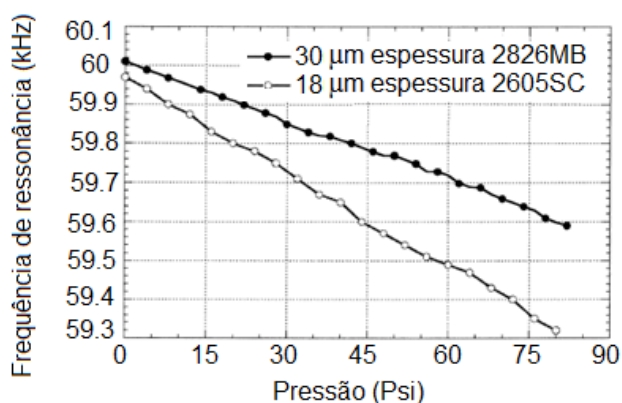


Figura 16 Frequência de ressonância em função da pressão, para duas ligas e suas respectivas espessuras (STOYANOV, GRIMES, 1999)

Em decorrência do resultado do teste com pressão em que o sensor foi arrastado contra as paredes da câmara resultando em medidas falsas, foi alocado no interior da superfície do suporte de pressão e fixado (*clamped*) pelo meio em uma linha de vibração nodal. Para evitar a interferência com a flexão elástica do sensor, os dois extremos da fita são livres. e (STOYANOV, GRIMES, 1999) conforme mostra a Figura 17.

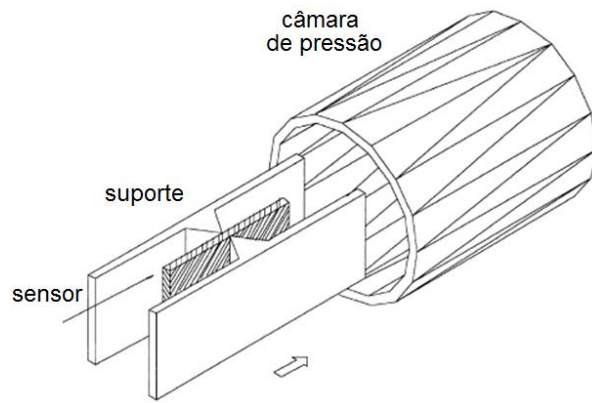


Figura 17 Sensor fixado em uma linha de vibração nodal em medidas de pressão sendo uma solução na forma conhecida de vibração a qual define uma linha transversal nodal em  $x=L/2$ . (STOYANOV, GRIMES, 1999)

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental envolve o sensor vidro metálico amorfo, que possui propriedades magnetostrictivas, isto é, converte a energia magnética em energia elástica e vice-versa. O princípio operacional principal baseia-se em uma excitação a partir de uma combinação de campo magnético estático e dinâmico, para uma oscilação ajustada em uma banda de frequências específica de trabalho do sensor. Os procedimentos tem por objetivo, através de medidas elétricas e ópticas, ser capaz de detectar ressonâncias relativamente baixas da ordem de kHz nos sensores magnetoelásticos.

O diagrama de blocos da Figura 18 apresenta a metodologia deste trabalho baseada na caracterização e aplicação do sensor.

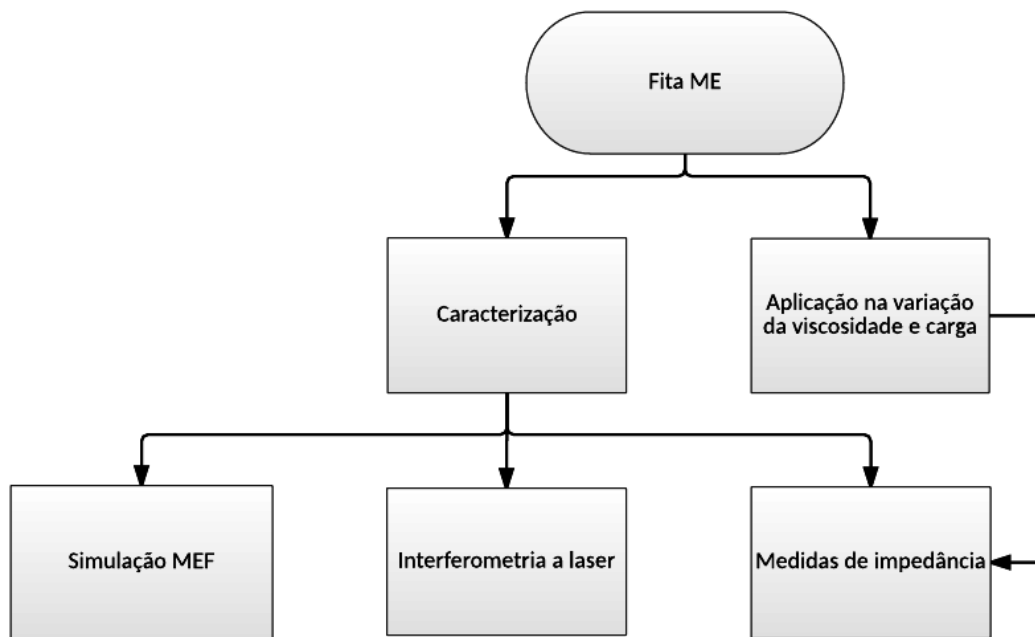


Figura 18 Fluxograma geral dos procedimentos experimentais

Primeiramente, para as etapas experimentais, foram utilizadas quatro fitas de liga ferromagnética (codificadas como: ME01, ME02, ME03 e ME04), com geometria de 37mm x 6mm x 29 $\mu$ m, e raio de curvatura de 9mm em torno do maior eixo. As quatro fitas foram previamente seleccionadas pelo comportamento em frequência de um total de trinta fitas. A ideia

principal foi investigar o material disponível através das relações de geometria e procedimento de corte.

O método de elementos finitos busca reproduzir o comportamento da vibração (deslocamento versus frequência) na extensão da fita ME. As simulações dos fenômeno físico devem ser validadas através das medidas experimentais; para que os parâmetros de entrada coincidam nas ressonâncias.

Nas medidas experimentais de interferometria foi utilizada a fita ME01, e nos testes envolvendo medidas elétricas, foram utilizadas (adicionalmente a ME01) outras três fitas (ME02 à ME04). Foi realizada uma pré-seleção utilizando parâmetros elétricos entre fitas semelhantes a partir das ressonâncias referentes ao modo longitudinal. É traçado um paralelo entre os resultados dos métodos de elementos finitos, interferometria a laser e medidas de impedância. O conhecimento do comportamento do modo de vibração investigado passa a estimular a potencial aplicação no sensoriamento sem fio em meios com diferentes níveis de viscosidade e pressão. As Figuras 19 e 20 a seguir mostram um diagrama de blocos representativo do procedimento experimental que detalham a metodologia (linha contínua) e os resultados (linha tracejada) das etapas da caracterização e aplicação. O procedimento de caracterização foi dividido em três métodos, simulação por elementos finitos e técnicas experimentais óptica e elétrica.

A simulação numérica é realizada a partir das dimensões, das equações que envolvem o fenômeno magnetostrictivo e dos parâmetros de entrada elásticos e magnéticos. As ressonâncias retiradas a partir do comportamento dos modos de vibração são parâmetros de saída que permitem representar graficamente os deslocamentos quanto a simetria do modo de vibração investigado.

O método de interferometria a laser necessita de uma configuração mecânica padrão, a qual envolve uma calibração dos dispositivos junto a bancada tridimensional. A disposição dos cabeçotes do vibrômetro em relação à amostra, o foco do laser e as características de excitação e detecção influenciam diretamente na resposta de saída do sistema. Um sistema incluindo bobinas de campo magnético, placas de geração e de aquisição de sinais permitem configurar a investigação do modo de vibração puro através de uma tone burst, a qual possui banda de frequências e número de ciclos da excitação. Comparações entre os métodos podem ser feitas, para respostas no domínio do tempo e da frequência, permitindo determinar o deslocamento em função de uma varredura de posições no eixo longitudinal da fita.

As medidas experimentais requerem o desenvolvimento de um conjunto de bobinas de Helmholtz que, acoplado a fonte, possibilitem aplicar um campo magnético uniforme na amostra. Simultaneamente à caracterização do campo magnético da fonte, uma bobina sensora proporciona a leitura das ressonâncias no espectro da frequência, associada a corrente e impedância elétrica. A técnica de medidas elétricas necessita o desenvolvimento de suportes para acomodar a fita na excitação e detecção em relação a diferentes variações ambientais de viscosidade e pressão do meio. A resposta é representada pela mútua indutância em uma relação entre as bobinas, uma vez que a fita é envolvida pela bobina

sensora. Para as ressonâncias investigadas, são observados os parâmetros que apresentam a melhor resposta do sinal de saída em função da corrente alternada máxima

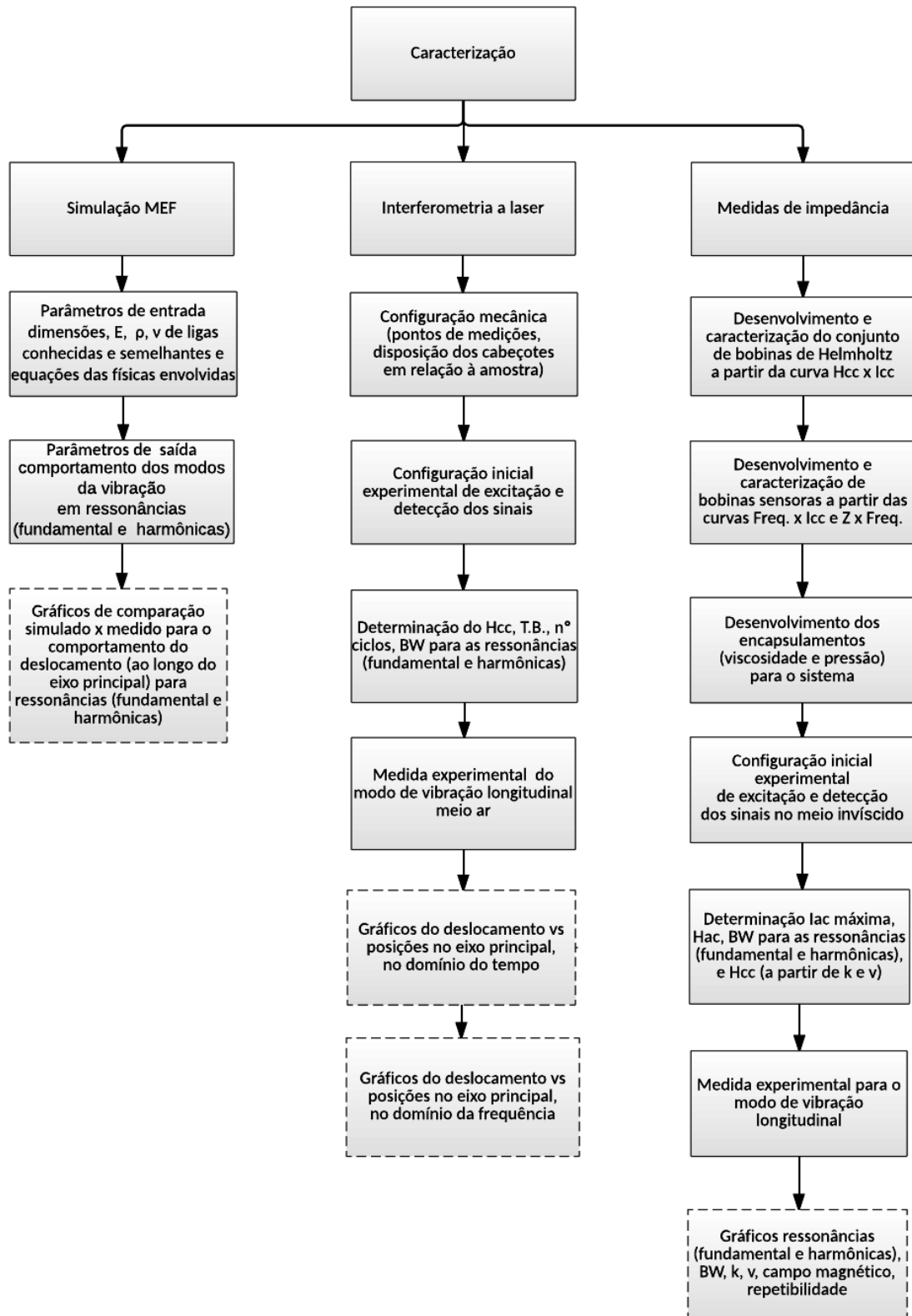


Figura 19 Fluxograma procedimentos das caracterizações



O fluxograma da Figura 20 detalha os procedimentos de aplicação do sensor sob variação da viscosidade e carga, avaliada a partir de medidas de impedância elétrica. São monitoradas as ressonâncias na banda de frequências fundamental e harmônicas para o modo de vibração longitudinal.

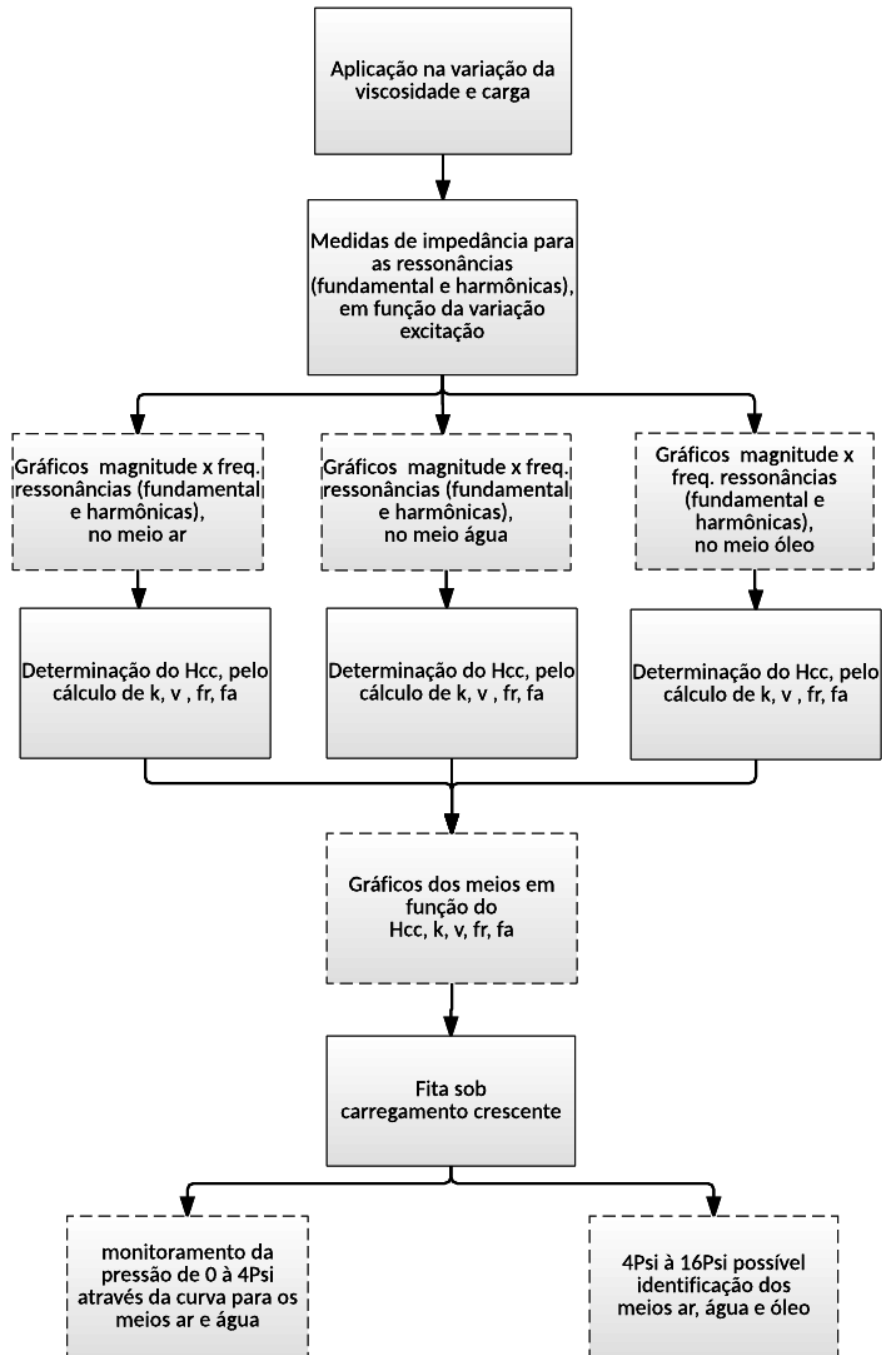


Figura 20 Fluxograma procedimentos das aplicações

A partir da resposta em frequência é possível calcular o deslocamento das ressonâncias nas bandas de frequência investigadas. Parâmetros como velocidade do som e coeficiente de acoplamento magnetoelástico são características diretamente afetadas em função da variação de viscosidade, e servem como indicadores no sensoriamento do meio.

A aplicação da fita também é investigada sob carregamento crescente, onde são monitorados os deslocamentos das ressonâncias próximas à banda de frequência fundamental e harmônicas. Para uma condição onde a fita encontra-se com extremidades livres, é previsto o comportamento mais acentuado das vibrações para o modo longitudinal. Neste trabalho uma condição limite de vibração é investigada, uma vez que um carregamento crescente é aplicado em cinco regiões da fita. A análise do comportamento em função da resposta ao carregamento dividiu-se em carregamentos de 0 de 600g, e entre 600g à 2500g.

#### 4.1 Simulação por método de elementos finitos

Simulações e testes de caracterização foram desenvolvidos capazes de representar o comportamento sensor em modelos numéricos. Esta é uma solução para problemas dinâmicos, que conta com uma aproximação numérica através do método de elementos finitos onde, neste caso, a fita investigada é considerada como um sistema de um único domínio.

Inicialmente as características da fita magnetoelástica de filme fino foram retiradas da folhas de dados Metglas e comparadas com a caracterização microscópica da fita através de elementos químicos presentes em porcentagem utilizando EDS (*energy dispersive x-ray detector*).

O procedimento geral é dividido em três etapas: pré-processo, solução e pós-processo.

Na etapa do pré-processo, define-se um elemento sólido para simulação 3D. Para tanto, realiza-se a divisão dos elementos finitos para uma geometria simples retangular, e o malhado a partir de um conjunto discreto de nós. Dentro das definições globais e parâmetros, além da geometria, definem-se as propriedades de um material elástico e linear (que cumpre com a Lei de Hooke), isotrópico, com módulo de Young de  $90.89 \times 10^9 Pa$ , Poisson de 0.33 e densidade de  $7.9 \times 10^9 kg/m^3$ . As principais características da malha utilizada são apresentadas na Tabela 2.

A simulação envolve a mecânica dos sólidos em relação ao equilíbrio das forças entre tensões, e em relação às forças aplicadas em um sólido. Para o simples caso em que a movimentação relevante é a longitudinal, é utilizada uma fórmula geral da simulação 3D. As deformações com relação às derivadas de campo magnético e deslocamento são definidas a partir das equações do material elástico linear e isotrópico.

A solução para análise dinâmica é a etapa em que são definidos os graus de liberdade para o sistema, composto pelas equações da excitação em função da frequência e do tempo.

No pós-processamento, os resultados a partir de valores nodais permitem o cálculo de funções e valores associados aos elementos. Esta etapa possibilita produzir uma representação em gradiente de cores para o formato do deslocamento nas dimensões reais da fita.

Tabela 2 MEF características da malha

Propriedades	Valor	Ajustes do tamanho da malha	
Qualidade mínima de elemento	$1.392 \times 10^{-5}$	Descrição	Valor
Qualidade média de elemento	0.05798	Tamanho máximo de elemento	0.0037
Elementos tetraédricos	4194	Tamanho mínimo de elemento	$6.66 \times 10^{-4}$
Elementos triangulares	2986	Fator de curvatura	0.6
Elementos de aresta	320	Resolução das regiões estreitas	0.5
Elementos de vértice	8	Taxa de crescimento máxima de elemento	1.5

#### 4.2 Caracterização do sistema de medida com bobinas de Helmholtz

A configuração principal dos testes experimentais projetados neste trabalho conta com um conjunto de bobinas de Helmholtz. O sistema pode ser combinado a dispositivos que permitem excitação e medida de sinais de acordo com a caracterização que se deseja fazer. Esta etapa é essencial para descobrir a região de polarização que deve ser empregada na investigação das frequências de ressonâncias do sensor.

As bobinas de excitação são usadas para, simultaneamente, aplicar um campo magnético estático e uniforme ao longo da extensão da amostra com um pequeno campo magnético variável no tempo. A bobina de campo magnético dinâmico, utilizada na caracterização por interferometria, pode ser substituída por uma bobina sensora (*pick-up*) em medidas que não apresentem impedimento ao confinamento da tira magnetostrictiva. Isso se dá, por exemplo, na caracterização por impedância elétrica. O emprego da bobina sensora aumenta o fator de acoplamento do conjunto nas leituras (TORMENS, 2014).

O conjunto de Helmholtz consiste em um par de bobinas de corrente contínua e um par de bobinas de corrente alternada concêntricas, com o propósito de criar um campo magnético uniforme no centro. As bobinas são separadas por uma distância igual ao raio, onde o tamanho do conjunto projetado facilita o acesso à amostra durante ambas as caracterizações, como ilustra a Figura 21. O campo magnético estático é aplicado através de uma fonte com amplificador de potência Kepco modelo 36-12DL.

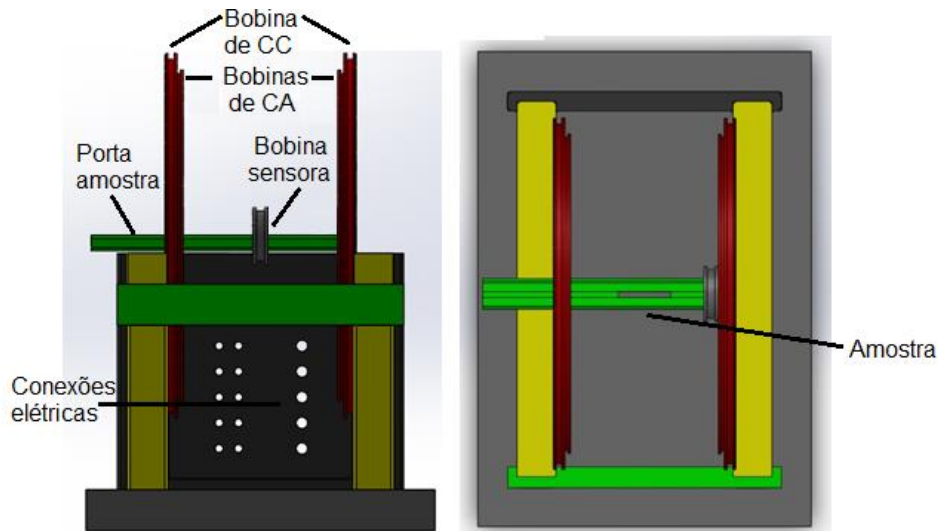


Figura 21 Representação esquemática do conjunto bobinas de Helmholtz vista frontal e superior

Para que o conjunto de bobinas de Helmholtz possa ser utilizado como fonte, ele deve ser caracterizado em função das magnitudes dos campos magnético estático e dinâmico. Os dados do campos magnéticos foram adquiridos utilizando uma sonda tipo Hall com a ponteira situada na região central do conjunto. A corrente contínua recebida pelo KEPCO, que alimenta o conjunto de Helmholtz, deve mostrar linearidade proporcionalmente ao campo magnético criado em seu interior. Para que a amostra seja magnetizada, o comportamento do campo magnético em relação à corrente elétrica deve ser uniforme na região central do conjunto

As caracterizações do sistema de medida utilizadas experimentalmente nos métodos de interferometria a laser e impedância são exibidas na sequência. Houve necessidade de desenvolver sistemas para aplicar variação de viscosidade e carga, complementando os testes de medidas elétricas no ar.

### Interferometria a laser

A interferometria a laser é um método que proporciona o estudo do modo comportamental de vibração do sensor magnetoelástico. Essa técnica é dividida em três etapas. Inicialmente, é necessário um ajuste dos parâmetros de excitação do sensor; em seguida, a coleta dos dados referentes as medidas de vibrações. Para finalizar, é necessária uma análise dos dados velocidade e deslocamento temporais transformadas ao domínio da frequência, que serão comparados com os outros métodos.

## Equipamento e sistema de medição

O setup de medidas é ajustado de acordo com o tipo de excitação desejada e a banda de frequências que se deseja monitorar, através de uma placa de aquisição integrada ao sistema de interferometria e ao software de geração de sinais. Para o monitoramento da ressonância fundamental, é utilizado um par de bobinas CA excitadas com uma *tone burst* de 6 ciclos, amplitude 0.6mVac e frequência de 56kHz. O controle da excitação é realizado através do ajuste de parâmetros em uma placa de geração de sinais que permite o ajuste da frequência de excitação, o número de ciclos, a tensão elétrica de amplificação de saída etc. É possível ajustar um ganho ao sinal de saída da placa de geração através da conexão com um amplificador externo.

O Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) dispõe de uma bancada tridimensional automatizada construída para a movimentação dos cabeçotes dos vibrômetros do sistema de interferometria (marca Polytec e modelo OFV-505) e, adicionalmente, a uma mesa que acomoda o conjunto de bobinas e a amostra.

O sistema de interferometria, projetado pelo Grupo de Ensaios Não-Destrutivos (GEND) originalmente para testes com ondas guiadas, conta com um software desenvolvido no Labview. O software é flexível em relação à programação e permite gerar e adquirir dados, bem como configurar o acesso remoto dos encoders e cabeçotes do sistema.

Através dos encoders do vibrômetro a laser, é medida a componente projetada na direção do feixe do laser por meio dos cabeçotes para uma movimentação da fonte. Caso necessária uma medida de uma componente de vibração fora do plano, por exemplo, deve-se alinhar o cabeçote do vibrômetro perpendicularmente ao plano da amostra (POLYTEC, 2013).

Um inclinômetro permite ajustar os ângulos desejados entre as componentes projetadas na vibrometria e o laser emitido pelos cabeçotes na estrutura da bancada. Enquanto o vetor de velocidade total está na direção do plano horizontal X, a componente da velocidade medida é a projeção dela em  $60^\circ$  na direção do laser. A Figura 22 mostra a disposição entre os cabeçotes e o ponto de medição da amostra.

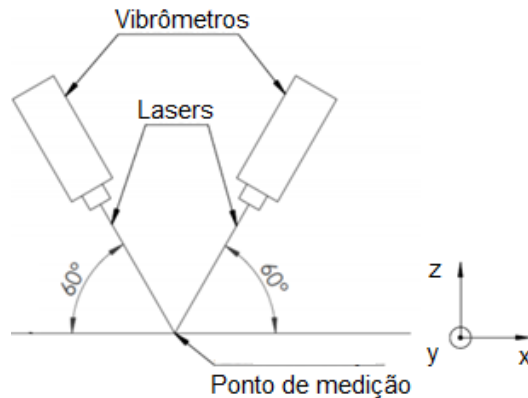


Figura 22 Configuração mecânica da interferometria no ponto de medição

O sistema trabalha com o princípio do efeito Doppler e a interferometria por vibração. Por se tratar de um processo de medição da velocidade de vibração da estrutura sem contato físico, o pós processamento dos sinais permite integrar este sinal para obter os valores de deslocamento. O perfil de deslocamento medido com a interferometria pode ser comparado com a simulação por elementos finitos do perfil de deformação ao longo do eixo principal da fita.

Os decodificadores possuem uma resolução ajustável associada à frequência de trabalho. Em outras palavras, para adquirir um sinal com uma banda de frequências de até 100kHz, pode-se utilizar uma sensibilidade de 5mm/s/V para os vibrômetros. O ajuste torna-se necessário no caso da investigação da frequência fundamental em torno de 56kHz. Nos casos das 2ª e 3ª harmônicas, a solução é diminuir a resolução para 10mm/s/V, onde banda de frequências garante a sensibilidade até 250kHz.

Definiu-se um vetor de varredura em determinadas posições no eixo longitudinal da fita a fim de traçar o perfil de deslocamento do modo puro de vibração. No eixo X da fita magnetostrictiva, de comprimento de 37mm, a varredura dispõe de 37 pontos igualmente espaçados. Uma das principais dificuldades encontradas nos testes ocorre no ajuste manual do ângulo de incidência do laser. Outra dificuldade encontrada nas medições tem relação com o ângulo de curvatura em relação ao eixo principal da fita.

A característica da combinação dos campos magnético estático e dinâmico, impostos ao conjunto de bobinas e fita magnetoelástica, varia de acordo com a banda de ressonância que se deseja excitar. Nos testes envolvendo interferometria, uma *tone burst* (T.B.) composta por um sinal senoidal multiplicado por uma janela do tipo *hanning* é configurada na placa de geração para excitar a fita. A frequência de excitação para o modo fundamental é de 56kHz, e para a 3ª harmônica é de 170kHz, onde a metade da energia do sinal é contida na banda de frequências útil para o sistema. Uma *tone burst* de seis ciclos e largura de banda de 36kHz foi utilizada para a excitação da frequência fundamental do modo de vibração longitudinal. Ao aumentar o número de ciclos da *tone burst*, a banda de frequências excitadas diminui, ou seja,

aproximando-se de um seno. Para excitação de uma banda de frequências mais ampla (que compreende a fundamental e as harmônicas), utilizou-se 170kHz, *tone burst* com largura de banda de 308kHz.

Uma placa de geração de ondas arbitrárias PXI5422 NI PXIe-1062Q Analog output da marca National Instruments é utilizada e possui flexibilidade na configuração da excitação através da interface do software, desenvolvido no Labview. O sinal gerado possui taxa de amostragem de 20MSa/s, 2000 médias e amplitude máxima de 6Vp. A entrada das bobinas recebe a de corrente alternada da placa de geração e cria o campo magnético dinâmico e uniforme na amostra.

Um amplificador de potência Krohn-Hite modelo 7602M se faz necessário dados os baixos limites de tensão elétrica de saída fornecidos pela placa de geração de sinais. Simultaneamente ao campo magnético dinâmico, é aplicado aos par de bobinas um campo magnético estático através de uma fonte bipolar de potência Kepco modelo 36-12DL com 0,49A de corrente contínua e 13V.

As etapas de geração e recepção dos sinais ocorrem simultaneamente. A resposta à vibração da fita magnetoelástica recebida pelos encoders é enviada para a etapa de recepção dos dados de saída. A placa de recepção National Instruments de modelo NI PXI 5105 permite ajuste da taxa de amostragem em 2MSa/s conforme necessidade para adquirir as velocidades medidas do sistema de vibrometria. A fim de aumentar a relação-sinal-ruído e garantir uma melhor detecção do sinal gerado, foram utilizadas 2000 médias para cada um dos pontos medidos da varredura.

### **Configuração de medição**

A disposição dos cabeçotes na bancada tridimensional em relação à fita e ao conjunto de Helmholtz não permite a medida das velocidades dos dois eixos instantaneamente, visto que as dimensões das bobinas de maior diâmetro interferem no ângulo de incidência do laser de 60°, entre o cabeçote e a fita. Portanto, para realizar a varredura em toda extensão da fita, torna-se necessário realizar duas medidas de cada vez.

A superfície da amostra deve ser reflexiva, a fim de maximizar o sinal do laser refletido. Definiu-se utilizar o lado fosco da fita magnetoelástica durante os testes, pois esta apresentou maior amplitude do sinal comparado com o lado brilhoso.

Uma vez ajustada a disposição dos cabeçotes dos lasers em relação ao posicionamento do ponto de medição na fita (conforme Figura 23), é solucionado o problema do impedimento entre as dimensões do conjunto e do ângulo de posicionamento do cabeçote do laser.

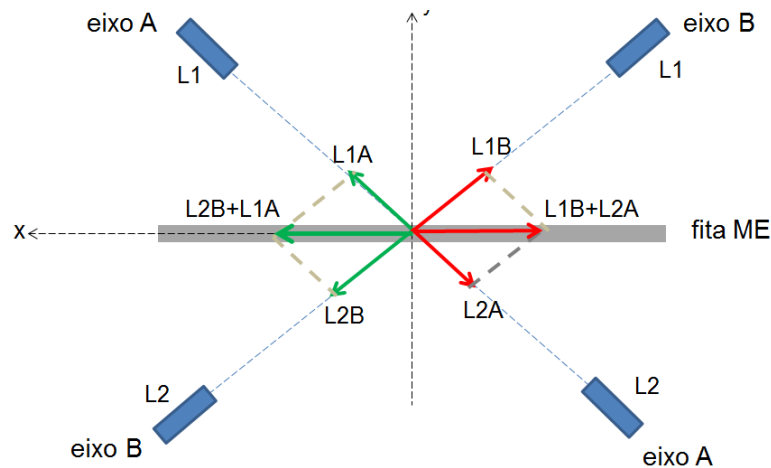


Figura 23 Vista superior da disposição dos cabeçotes dos lasers em relação à amostra

Na figura segue a comparação dos sinais temporais adquiridos dos lasers segundo eixo A e B na posição mais extrema da fita. E para obter o sinal resultante segue a equação: O sinal resultante é a diferença vetorial:  $(\vec{L1B} + \vec{L2A}) - (\vec{L2B} + \vec{L1A})$ . Onde L1 e L2 são os lasers 1 e 2 incidentes na fita magnetostrictiva, o eixo A refere-se aos 22.5° positivos e o eixo B aos 22.5° negativos. Na Figura 24, mostra-se os sinais temporais adquiridos dos lasers 1 e 2 segundo eixo A e B na posição mais extrema da fita.

Os métodos experimentais para o envio e recepção de sinais utilizam técnicas no domínio do tempo e da frequência que definem a forma de interpretação do sinal. O diagrama de blocos da Figura 25 mostra as formas de envio e recepção dos sinais remotos, que foram utilizados para o método de interferometria à laser, e para o método de medidas de impedância elétrica.

Os gráficos temporais trazem informações sobre o comportamento de um sinal amortecido ao longo do tempo. A representação no domínio da frequência mostra informações que permitem investigar o monitoramento das ressonâncias em uma determinada banda de frequência e informações sobre a mudança de fase, além da possibilidade de recuperar o sinal original.



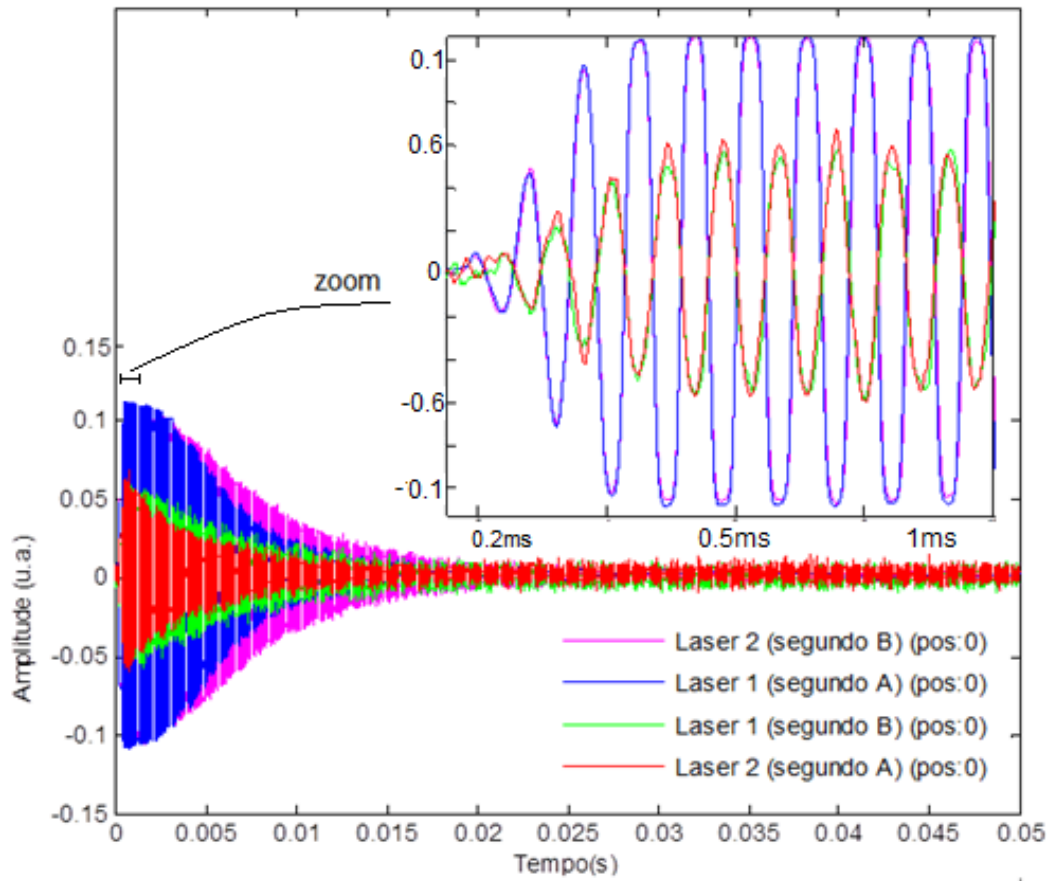


Figura 24 Exemplo de sinais temporais adquiridos dos lasers segundo eixo A e B na posição mais extrema da fita

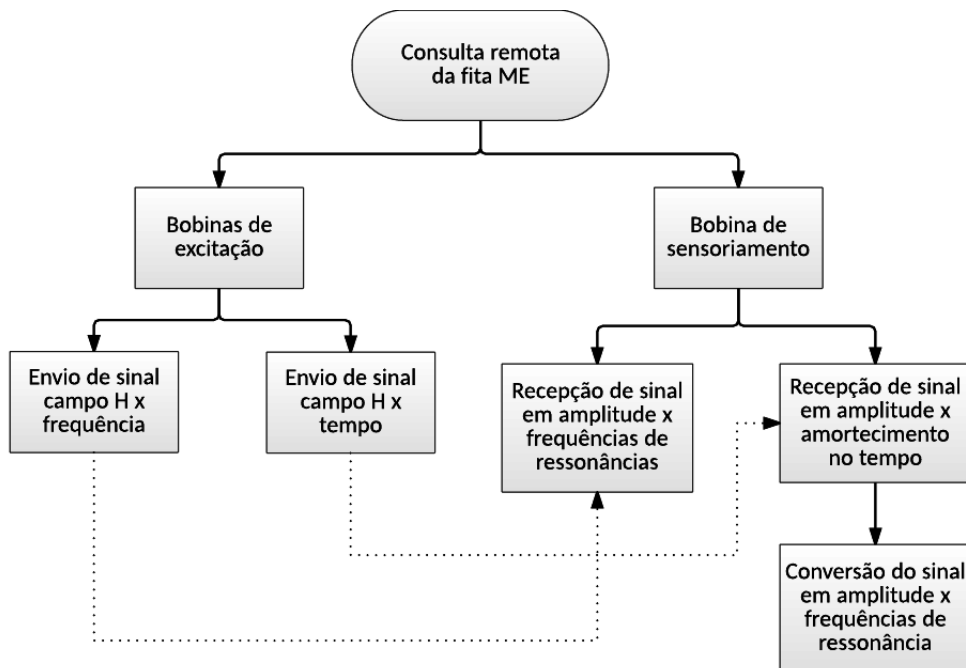


Figura 25 Fluxograma para a consulta remota dos sinais

Geralmente, ao receber um sinal temporal amortecido, utilizam-se operadores matemáticos que possam representá-lo em componentes do espectro em frequência. A técnica de interferometria a laser utilizada permite a coleta dos dados e o processamento do sinal para a conversão da função temporal em uma soma de componentes que representam o espectro em frequência. Após a transformada de Fourier, a resposta possui característica de sinais definidos em uma banda de frequência, onde os valores máximos de magnitude definem as ressonâncias.

No método de medidas de impedância elétrica, as bobinas de excitação são configuradas para enviar um sinal com amplitude fixa em uma determinada frequência. Diante da interação com a bobina sensora, o medidor de impedâncias plota as curvas no domínio da frequência em função da magnitude e fase.

### **4.3 Avaliação da impedância**

Neste tópico mostram-se os circuitos elétricos equivalentes selecionados para representar o sistema de sensoriamento. O equipamento para medir a impedância elétrica permite associar o fenômeno físico que envolve o sistema de sensoriamento a um circuito elétrico. O método facilita a interpretação dos sinais através dos resultados experimentais, por exemplo, no desenvolvimento das bobinas sensoras.

#### **4.3.1 Características das medidas de impedância**

O *setup* experimental das medidas de impedância elétrica dispõe de um conjunto de bobinas de Helmholtz, com variação do campo magnético estático diretamente através da fonte Kepco modelo 36-12DL. Uma solenóide colocada em torno da amostra é conectada ao analisador de impedância, e serve como fonte de corrente alternada e bobina sensora. Uma vez que a fita está confinada dentro da bobina, o campo magnético dinâmico é otimizado pela maior concentração das linhas de fluxo magnético em um volume menor.

A configuração de oscilação senoidal da fita é ajustada em 1MHz e 4mAac através do controle da corrente *bias* (ou corrente de polarização). A aquisição de sinais de magnitude e ângulo de fase ( $(|Z|, \theta) \times F$ ) são investigados em função da sua banda de frequência.

Quatro fitas foram utilizadas experimentalmente (ME1, ME2, ME3 e ME4) com dimensões 37mm x 6mm x 29 $\mu$ m. Essas fitas possuem características e propriedades gerais conforme tabela 1 disponível pela folha de dados (METGLAS, 2013).

### 4.3.2 Circuito elétrico equivalente do sistema de sensoriamento

Os testes envolvendo impedância elétrica podem ser esquematizados a partir de circuitos equivalentes conforme a Figura 26, a fim de facilitar o entendimento das etapas durante as medidas. Na Figura 26 a), é apresentada uma fonte de corrente contínua em série com bobinas de campo magnético estático, ligadas paralelamente a configuração AC, onde não há contato elétrico com a fonte que está em série com as bobinas de campo magnético dinâmico.

O acoplamento magnético, símbolo de duas retas paralelas, representa a transferência de energia sem contato entre a fita magnetoelástica (sensor ME) e a bobina sensora., ou seja, a indutância mútua é medida em henrys (H). Nesse circuito consideram-se duas bobinas, sensora e a fita ME, onde uma tensão é induzida e, portanto, não há a passagem da corrente.

A Figura 26 b) apresenta o circuito elétrico equivalente utilizado para medidas de impedância elétrica. A ideia é optar por um modelo que melhor possa representar o comportamento eletromagnético que envolve o teste através da magnitude e ângulo de fase ( $|Z|, \theta$ ) na frequência onde saída é casada à  $50\Omega$

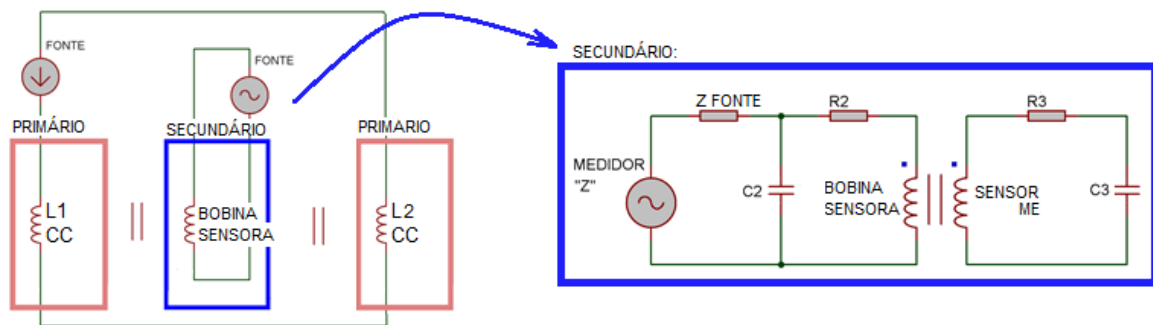


Figura 26 Circuito elétrico do conjunto de bobinas de Helmholtz para medidas elétricas

### 4.3.3 Desenvolvimento de bobinas sensoras e suporte do experimento

Com o propósito de escolher o mais eficiente acoplamento magnético, identificou-se a necessidade de testar diferentes geometrias de bobinas sensoras. Foram testadas algumas geometrias do tipo planar e cilíndricas, variando o comprimento, o diâmetro e a bitola do fio, com o objetivo de identificar a influência das ressonâncias na banda de frequências durante o sensoriamento do modo de vibração.

A banda da frequência investigada compreende em 40kHz a 230kHz e a linearidade da curva conforme Figura 27 indica que a bobina sensora cumpre com as condições exigidas. Para medidas de impedância elétrica em função do deslocamento em frequência, foi subtraída a impedância elétrica da bobina *pick-up* vazia no arranjo.

Para realizar a detecção de oscilações magnetoelásticas, o sensor pode ser alocado entre uma das solenóides chamadas de bobina *pick-up* e outras duas bobinas idênticas, paralelas e orientadas em direções opostas. Idealmente, neste caso, o ruído externo e o campo são cancelados, e a bobina *pick-up* é sensível somente à suscetibilidade da fita sensora. (SCHMIDT, 2000)

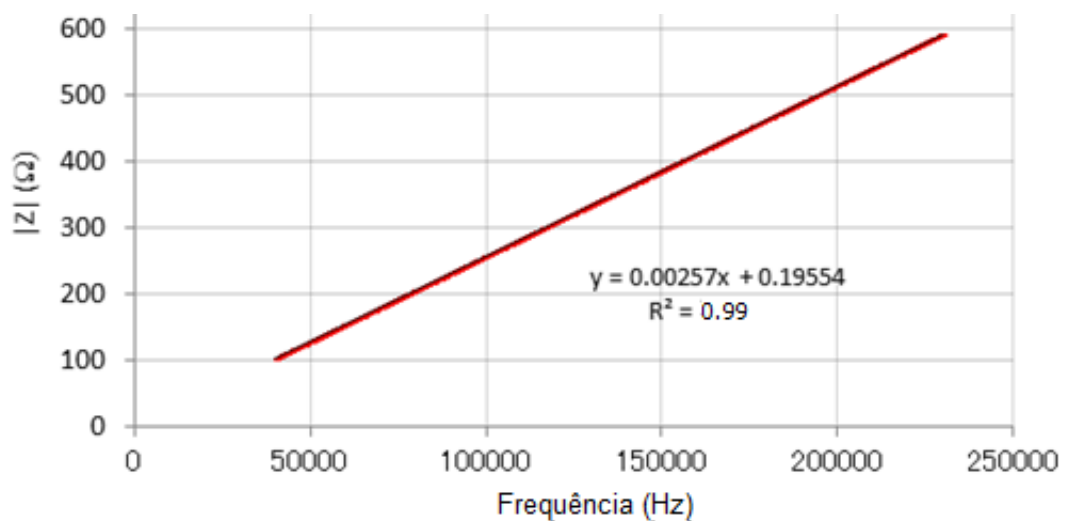


Figura 27 Comportamento da impedância da bobina sensora na banda de frequência de 40k a 230kHz

As fitas magnetoelásticas selecionadas para este trabalho são alocadas livres em um case, pouco maior que as suas dimensões, como mostra a Figura 28. Este é o encapsulamento projetado para medidas sem pressão, inserido fechado dentro da bobina sensora. A fita fica acomodada no fundo do case contendo ar (considerado como meio sem viscosidade), água

(viscosidade dinâmica de aproximadamente 0,001 Pa.s a 20 °C) e óleo SAE 20W/40 (viscosidade dinâmica de aproximadamente 0,6 Pa.s a 20 °C (c)).

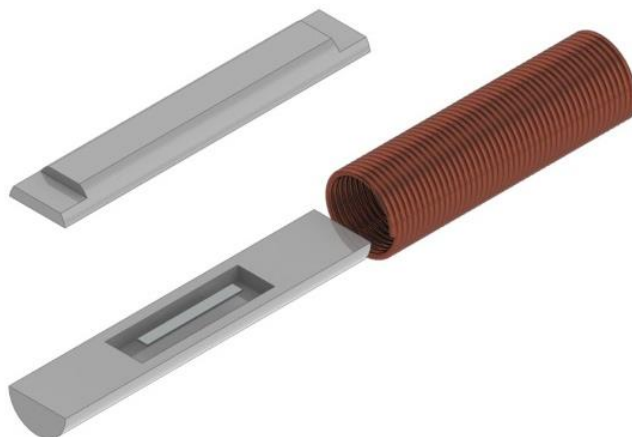


Figura 28 Conjunto composto por encapsulamento e fita magnetoelástica envolvido por bobina sensora em medidas de impedância elétrica

#### **4.3.4 Desenvolvimento do sistema para aplicação sob variação de viscosidade e carga**

Primeiramente, foi realizada uma investigação do modo longitudinal de vibração ao aplicar um carregamento crescente na região central do sensor. Considerando uma linha de vibração nodal, são previstas ressonâncias nas bandas da frequência fundamental e suas harmônicas.

Os resultados do teste para um carregamento na linha de vibração nodal mostraram a viabilidade de utilizar o protótipo no sensoriamento sob pressão. Logo surgiu a demanda de aplicar carregamentos em outras áreas além da região central, com o objetivo de avaliar o comportamento do material para o sensoriamento sob estas condições.

Ao imprimir um carregamento crescente sob cinco áreas igualmente espaçadas em toda a extensão da fita ME (conforme indica a Figura 29) não é possível prever o comportamento vibracional levando em conta a linha de vibração nodal. Porém, este comportamento pode ser investigado através dos deslocamentos em frequência do sinal de resposta. Nestas circunstâncias, torna-se complexo o estudo dos modos de vibrações envolvidos, uma vez que podem ser excitadas frequências diferentes da frequência fundamental e suas harmônicas.

Este suporte foi desenvolvido para realizar as medidas de pressão, alocado no centro do conjunto das bobinas de Helmholtz, onde há ligação elétrica entre a bobina sensora e o medidor de impedâncias. A ideia principal deste suporte é possibilitar a aplicação de uma

pressão crescente externamente controlada em um meio com variação de viscosidade. A carga de 0 à 25000Pa é aplicada no sentido ortogonal à fita através de uma placa sobre a base do conjunto, que é transferida para as extremidades do suporte onde a fita é alocada. Dessa forma são estipuladas regiões de pressão, a fim de deformar a fita sob carregamento e campo magnético aplicado.

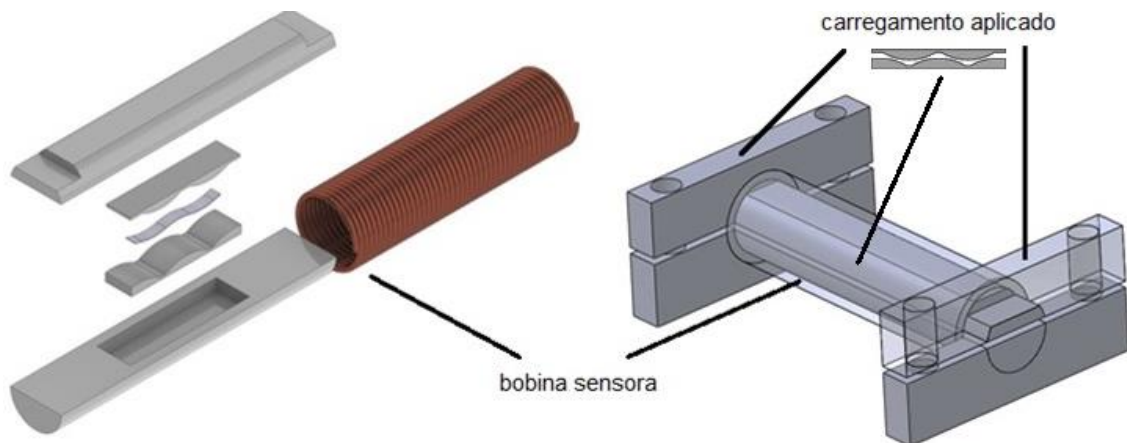


Figura 29 Suporte 5 pontos de pressão

#### 4.3.5 Configuração do ensaio

A relação-sinal-ruído da resposta do sistema é um importante parâmetro na interpretação do sinal na resposta da medida experimental. Quanto mais destacado for o sinal da resposta em frequência (em função do campo magnético estático aplicado em relação ao ruído), mais fácil torna-se interpretá-lo.

Ao submeter o conjunto de sensoriamento à uma variação ambiental (em que há uma mudança de meio ou variação de pressão que altere as condições ideais), são necessários os mais variados parâmetros que auxiliem na avaliação o sinal da resposta adquirido.

Dessa forma, o emprego do fator de qualidade é um maneira de qualificar o sinal, em função de parâmetros como banda de frequências e magnitude. Em um meio sem viscosidade, por exemplo, torna-se fácil identificar o sinal da frequência fundamental, pois comparado com as harmônicas, possui amplitude maior e banda de frequência mais estreita (ou seja, um fator de qualidade maior). O exemplo típico pode ser visualizado na Figura 30, que mostra a magnitude do módulo da impedância e do ângulo de fase, para as frequências a) fundamental e b) terceiro harmônico.

Para melhor identificar a frequência de ressonância e frequência de anti-ressonância, se faz necessário definir faixas de frequências. Nas medidas de impedância realizadas, a

amostragem dos sinais é determinada somente com 801 pontos – sendo máximo número fornecido pelo medidor. Logo, quanto mais estreita for a banda usada (geralmente optou-se por 10kHz), mais precisa será a identificação das frequências características.

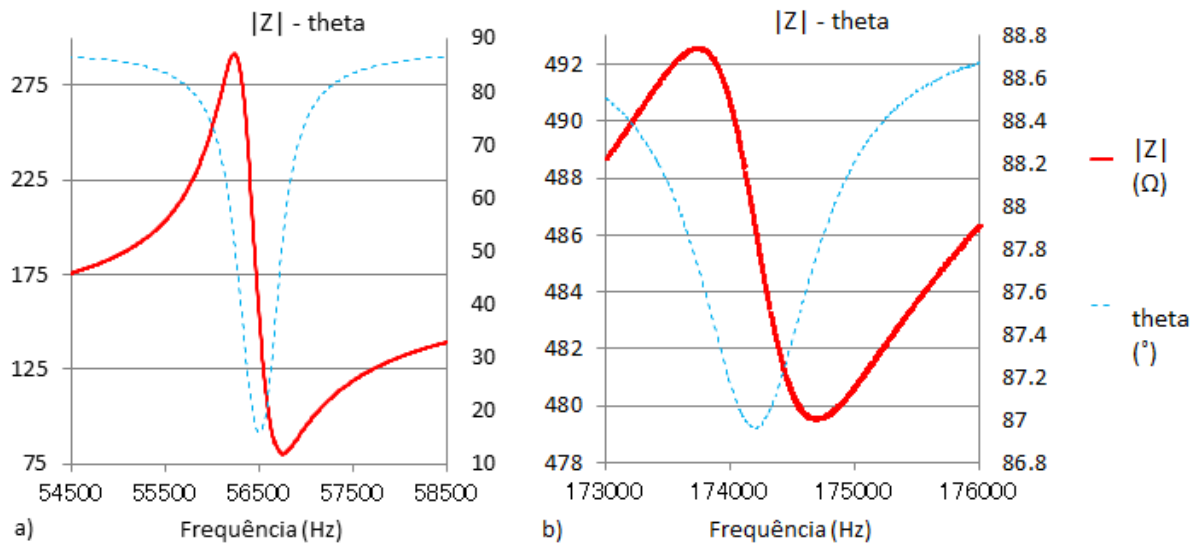


Figura 30 Exemplo de resposta magnitude e fase para as frequências a) fundamental e b) terceiro harmônico para  $H_{ac} = 9,05 \text{ A/m}$  e  $H_{cc} = 561 \text{ A/m}$

O campo dinâmico máximo submetido à fita é estabelecido a partir do comportamento da frequência de ressonância ( $f_r$ ) e anti-ressonância ( $f_a$ ) do sensor conforme mostrado na Figura 31. O limite inferior máximo da corrente alternada é estabelecido pela fonte do analisador de impedâncias. Logo, 200mA passa a ser o ponto inicial na varredura crescente da corrente.

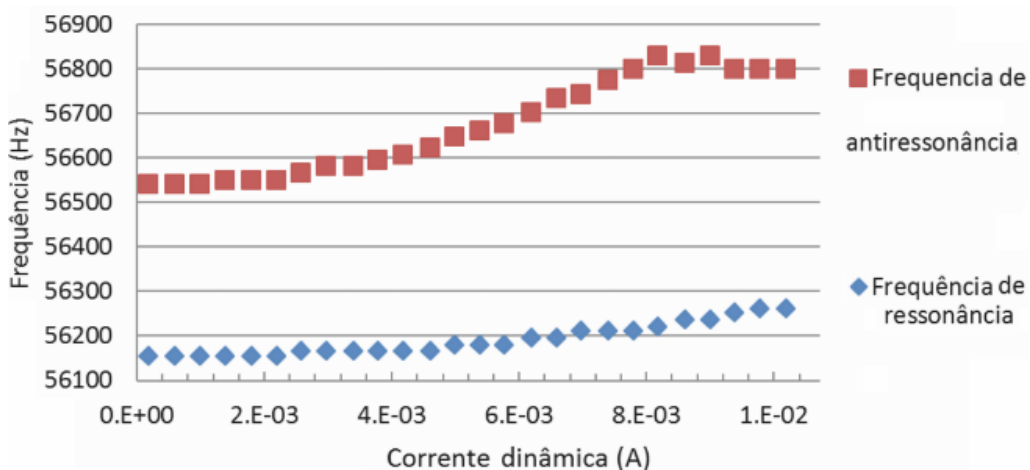


Figura 31 Frequência de ressonância e antirressonância em função  $H_{ac}$  quando a amostra está sujeita a um  $H_{dc}$  de 561 A/m

A corrente alternada de 4mA foi estabelecida a partir da Figura 40 como corrente padrão para excitar a bobina *pick-up*. O valor obtido para a frequência em 4mA diverge em 14Hz para a frequência de ressonância, e 62Hz para a anti-ressonância daquele obtido para 200 $\mu$ A respectivamente. Dessa forma, a máxima corrente alternada, responsável por produzir 9,05A/m, pode ser estabelecida se não houver diferenças significativas na resposta do sistema. O campo CA é extremamente pequeno comparado com o campo magnético CC de 561 A/m e não afeta diretamente a interpretação dos deslocamentos em frequência. Porém, em função de diferentes combinações de massa e viscosidade submetidas a fita ME, uma nova configuração do sistema pode se tornar necessária para gerar um campo magnético mais adequado na identificação das ressonâncias.

As vibrações são mais pronunciadas em frequências específicas, correspondentes a ressonâncias mecânicas. Procura-se acompanhar as ressonâncias fundamental e harmônicas que apresentam maior amplitude. Dos fatores que influenciam na resposta do sinal ao imergir um sensor magnetoelástico em um líquido, temos: a força da ligação interfacial molecular, o umedecimento da superfície, a densidade do líquido, a viscosidade e a energia de superfície livre, os quais dependem das dimensões dos sensores e propriedades do material. Devido a rugosidade da fita, pode ocorrer um aprisionamento de parte do fluido na superfície, sendo que neste caso considera-se como uma massa presa na superfície da fita. Em virtude da dependência que a viscosidade possui pela temperatura, o ambiente permaneceu constantemente monitorado durante os testes.

Localizadas na superfície do sensor, a rugosidade e a presença de tensões superficiais são alguns dos fatores que interferem na velocidade do som, e no coeficiente de acoplamento magnetoelástico (parâmetros que contribuem na avaliação do sensor). Equações linearmente independentes mostram o comportamento do coeficiente de acoplamento magnetoelástico e da velocidade do som em função da variação do campo magnético estático. Estes parâmetros são estabelecidos pelo método de (SCHMIDT, 2000) para a primeira e segunda ordem de ressonâncias e a primeira ordem da anti-ressonância.

Por fim, ao assumir os coeficientes  $k$  e  $\zeta$  como independentes da frequência e homogêneos através da amostra pelo método de (SCHMIDT, 2000), são determinados de forma experimental os valores máximos e mínimos da ressonância e anti-ressonâncias para ambos os campos magnéticos aplicados.



## 5.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação deste capítulo está sequencialmente organizada conforme os resultados das caracterizações realizadas a partir de simulações com o método de elementos finitos, medidas ópticas e elétricas. As comparações apresentadas são produto dos métodos teóricos e experimentais realizados a partir do deslocamento, do modo de vibração, e de possíveis aplicações no monitoramento das vibrações a partir da variação da viscosidade e da pressão.

O conjunto de bobinas de Helmholtz foi caracterizado em função das magnitudes dos campos magnético (estático e dinâmico) para que fosse utilizado como fonte nos ensaios. A corrente contínua mostrou linearidade proporcionalmente ao campo magnético criado em seu interior. O sistema de fontes e bobinas permitiu que amostra fosse magnetizada de forma uniforme na região central do conjunto. A curva do campo magnético estático pela corrente contínua medidas com o instrumento Gaussímetro, apresentam linearidade entre as magnitudes, conforme Figura 32.

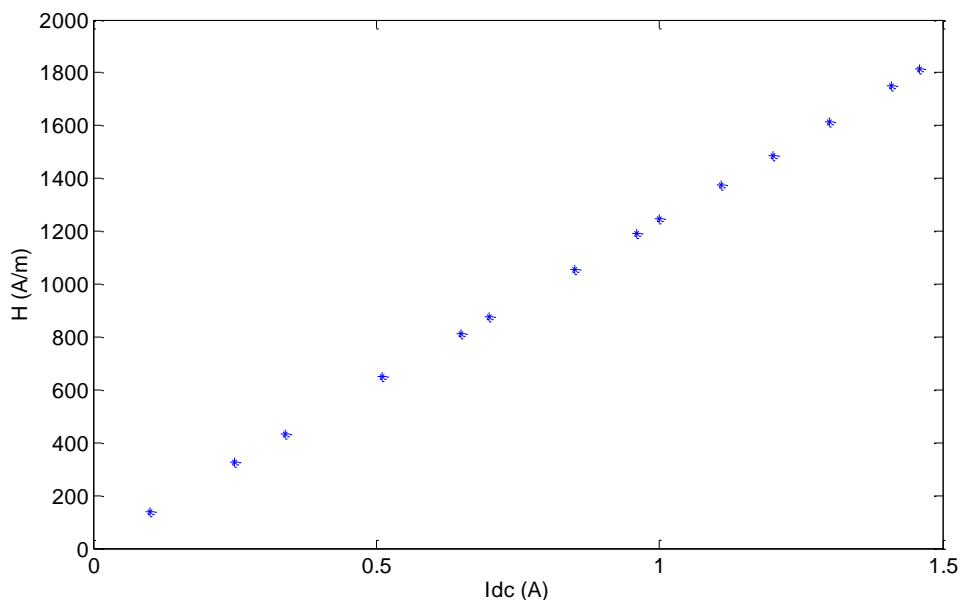


Figura 32 Curva do campo magnético vs corrente contínua medidas para caracterizar o conjunto de bobinas de Helmholtz

## 5.1 Caracterização por simulação do método de elementos finitos

A investigação do funcionamento do sensor magnetoelástico, através do método de elementos finitos (MEF), traz vantagens no estudo comportamental dos modos de vibração. A simulação do primeiro modo de vibração longitudinal (modo puro) para uma fita de filme fino livre apresenta alterações nas suas dimensões, conforme ilustrado na Figura 33. Os resultados da simulação no Comsol mostram o perfil de deformação nas dimensões da fita exibidas em função do comportamento da vibração do modo fundamental, da segunda e da terceira harmônicas.

Constata-se através dos valores máximos apresentados na Figura 33a para o deslocamento em função do comprimento da fita, que método de elementos finitos na análise da frequência fundamental em 55,9kHz exibe um comportamento simétrico. A interação magnetoelástica apresenta um sinal com magnitude máxima e com a tendência dos maiores deslocamentos localizada nas extremidades, e menores na região central. O comprimento muda periodicamente. No entanto, a região central da fita não é alterada e está baseada no modelo de fitas livres.

Para o segundo harmônico em 111,4kHz, ilustrado na Figura 33b, observa-se um comportamento assimétrico, pois não apresenta variação uniforme das amplitudes dos deslocamentos no sentido do comprimento da fita, e pode ser facilmente identificado ao compararmos as duas metades da fita que não apresentam comportamento espelhado. Na terceira harmônica em 165,7kHz, a Figura 33c mostra que o comportamento simétrico é caracterizado pelo comportamento espelhado das duas metades da fita.

A simetria do modo puro para a fundamental e a 3ª harmônica apresenta um comportamento com alongamentos axiais, acompanhado por contrações laterais onde a largura aumenta e diminui. O deslocamento nas áreas azuladas é menor, e as deformações na secção transversal são mais salientes, em decorrência do alongamento no sentido longitudinal da fita.

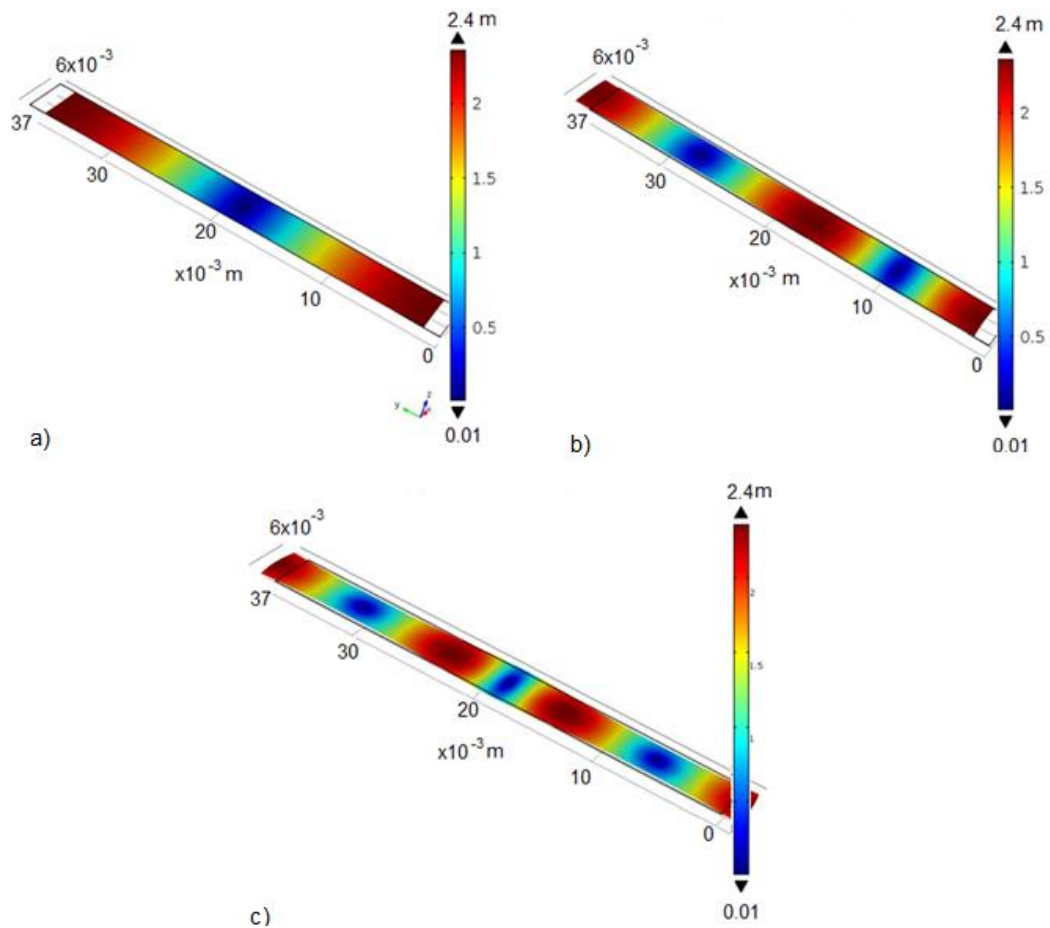


Figura 33 Modo de Young com deformações a) simétrica 55.9kHz e b) assimétrica 111.4kHz c) simétrica 165.7kHz

No modelo simulado, as amplitudes máximas apresentam valores idênticos pois são desconsiderados os efeitos da atenuação (ao contrário do método da interferometria a laser, que apresenta diferentes valores de amplitude de deslocamento dependente da frequência).

## 5.2 Caracterização por interferometria a laser

A investigação predominante deste trabalho baseia-se na caracterização do modo principal de vibração da fita magnetostrictiva, segundo as informações oferecidas pelos gráficos no domínio do tempo e da frequência. Os resultados são interpretados a partir da variação na amplitude do deslocamento no comprimento da fita em função do amortecimento e das ressonâncias.

### 5.2.1 Comportamento do deslocamento para uma resposta temporal

A técnica óptica, através de uma varredura de posições realizada na linha central do comprimento da fita, busca encontrar o perfil de deslocamento longitudinal. A Figura 34 apresenta a resposta temporal ao deslocamento em função do comprimento da fita para uma excitação com uma tone burst de 6 ciclos centrada em 56kHz.

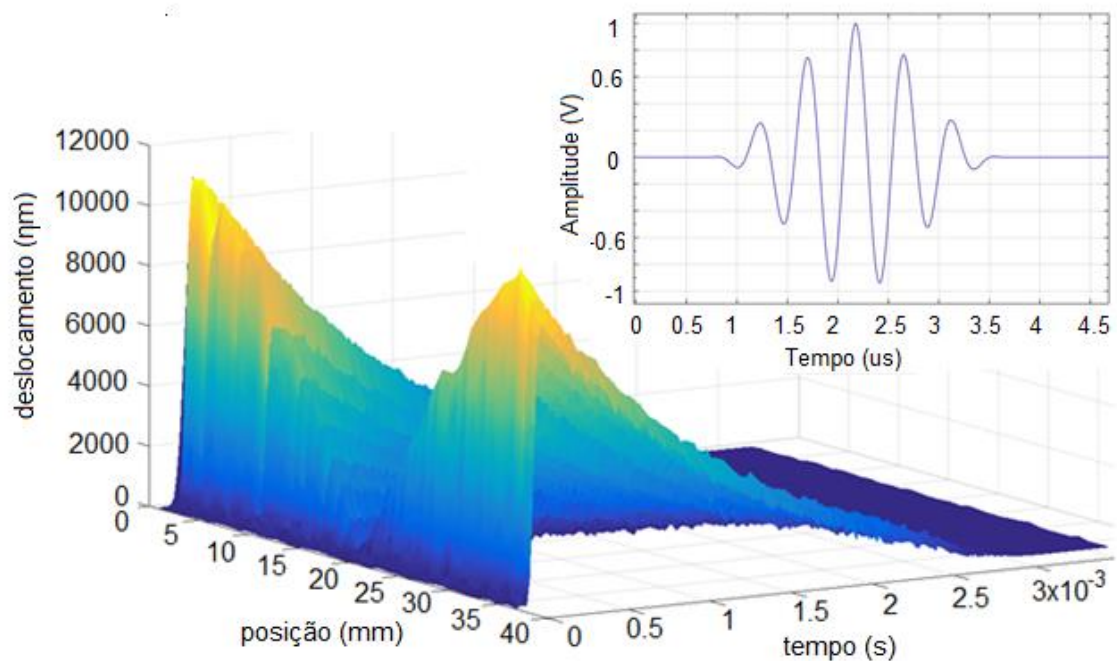


Figura 34 Resposta temporal ao deslocamento no eixo X, com varredura no comprimento da fita T.B. 6 ciclos e 56kHz

A Figura 35 apresenta a resposta transiente para deslocamentos no eixo X da fita com excitação de uma tone burst centrada em 170kHz e 2 ciclos. O comportamento do modo de vibração simétrico é observado para ambas as respostas temporais nas excitações de 6 ciclos e de 2 ciclos. Existe uma tendência crescente onde as menores amplitudes dos deslocamentos localizam-se próximos ao centro, e as maiores amplitudes nas extremidades.

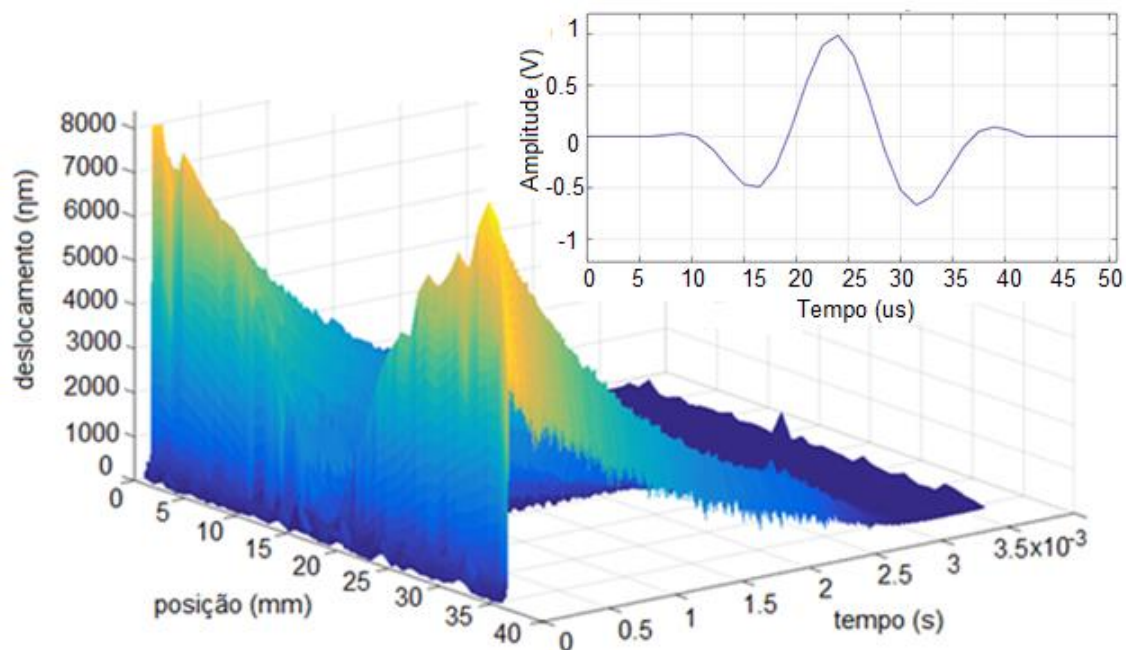


Figura 35 Resposta temporal ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 2 ciclos e 170kHz

### 5.2.2 Comportamento do deslocamento para uma resposta em frequência

Um impulso de campo magnético excita oscilações magnetoelásticas na fita, e a resposta transiente destas oscilações obtidas são transformadas para o domínio de frequência. A transformada rápida de Fourier (FFT) é implementada no processamento dos dados, uma vez que se deseja transformá-los do domínio do tempo para o espectro de frequências. A análise no domínio da frequência permite localizar as bandas em que as ressonâncias ocorrem com os respectivos deslocamentos.

As características da ressonância no espectro de frequência são reconhecidas pelo formato do sinal de saída: quanto mais estreita a largura de banda excitada e maior a amplitude do deslocamento, melhor definida será a ressonância.

Os resultados do envelope da transformada Hilbert dos deslocamentos para a excitação de 6 ciclos (com frequência central de 56kHz e com 2 ciclos para frequência central de 170kHz) podem ser vistos na Figura 36 e 37. A amplitude do sinal para a excitação centrada na fundamental e na banda estreita apresenta amplitude mais alta em relação ao sinal centrado na frequência harmônica com banda larga. As medidas exibem um comportamento no espectro em frequência dependente do formato da onda de excitação. A maior quantidade de energia é distribuída na menor largura de banda.

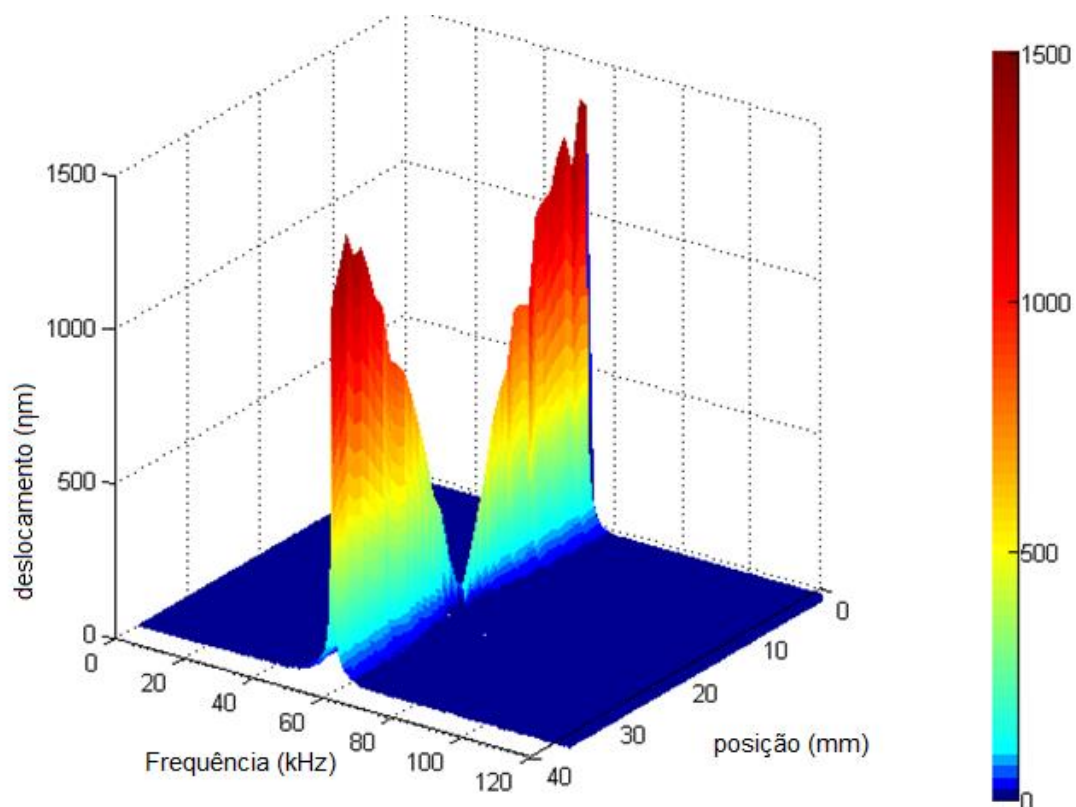


Figura 36 Resposta em frequência ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 6 ciclos e 56kHz

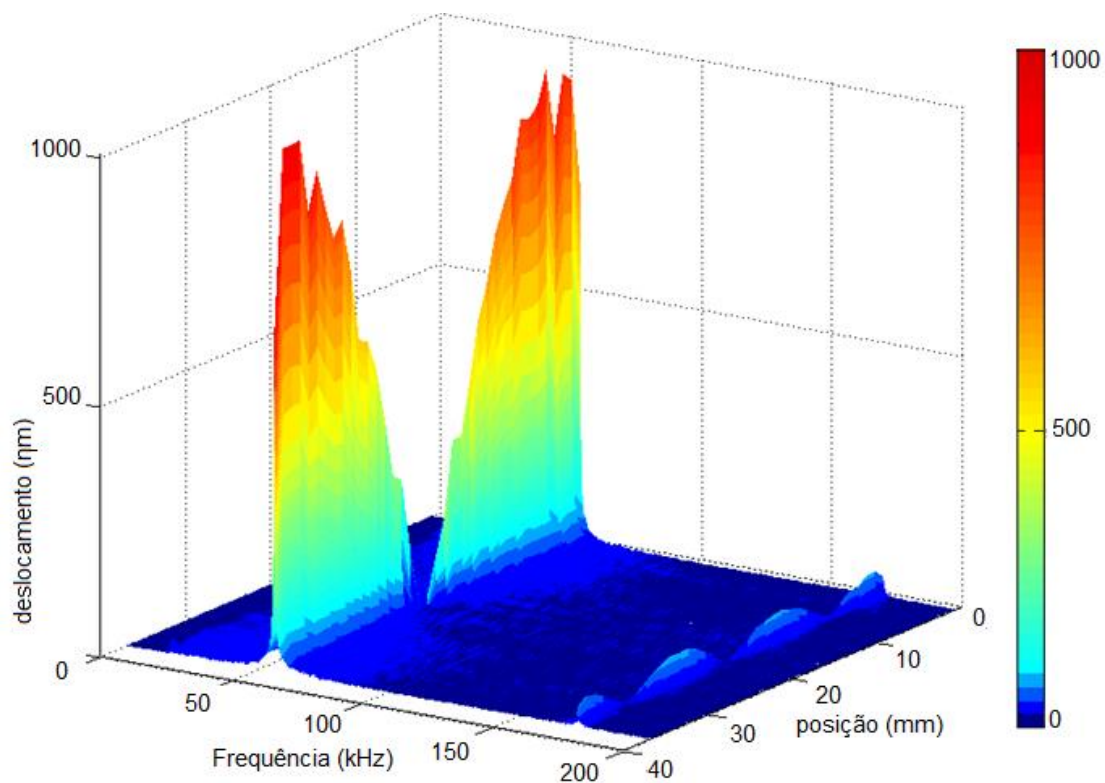


Figura 37 Resposta em frequência ao deslocamento no eixo X com varredura no comprimento da fita T.B. 2 ciclos e 170kHz

A varredura de posições na fita indica, através da amplitude do sinal, que a frequência fundamental tem maior deslocamento em comparação com a 3ª harmônica, em virtude da banda larga de excitação de 308kHz comparada com 36kHz. Logo, ao excitar a fita com uma tone burst com menor número de ciclos, o espectro da banda de frequências de excitação expande, passando a revelar as ressonâncias fundamental e harmônicas. Porém, a segunda harmônica não pode ser diferenciada do ruído.

### 5.2.3 Comparação entre medida e simulação

O comportamento do perfil de deformação do modo puro de vibração é identificado através da magnitude do deslocamento no eixo X de acordo com a posição de uma região na fita. Uma comparação entre as respostas de saída simuladas e medidas na interferometria mostram uma simetria das amplitudes de deslocamento entre os dois métodos na frequência fundamental e na terceira harmônica.

O fenômeno físico é validado, uma vez que as frequências medidas e simuladas coincidem. As Figuras 38 e 39 mostram a estreita relação entre o deslocamento normalizado e as posições do eixo X.

A medida da fundamental apresenta maior relação sinal ruído comparada com a terceira harmônica. A dispersão mostrada está relacionada com diversos fatores, entre eles o formato do sinal (de excitação no ensaio na interferometria) e as fontes de ruído, que dificultam a medição do sinal de deslocamento próximo às extremidades da fita pelo tamanho da área de medição do *laser* e foco

A Figura 38 mostra o deslocamento vetorial normalizado para direita com valores positivos e para a esquerda com valores negativos, e explica a simetria do sinal de vibração para o comprimento da fita.

O sinal de resposta à excitação com frequência de ressonância em 170kHz e 2 ciclos foi processado com um filtro passa alta para eliminar a banda da frequência fundamental. A Figura 39 mostra a comparação do sinal filtrado com a simulação, e apresenta a simetria do deslocamento vetorial em função dos eixos positivos e negativos para a frequência da terceira harmônica.

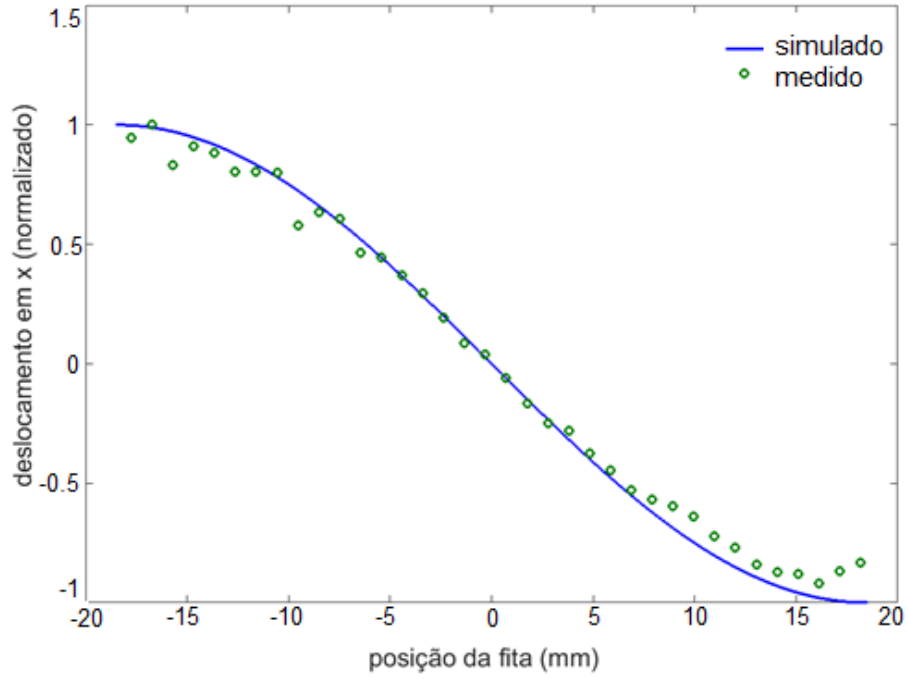


Figura 38 Comparação simulado x medido para o deslocamento no eixo X com excitação de 56kHz 6 ciclos

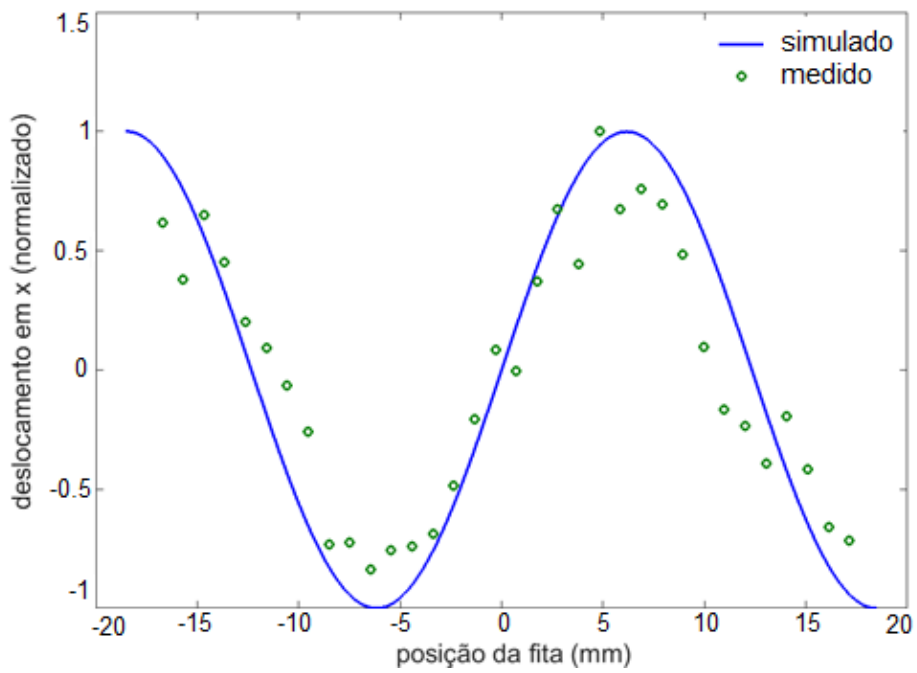


Figura 39 Comparação simulado x medido para o deslocamento no eixo X com excitação de 170kHz 2 ciclos



### **5.3 Caracterização por medidas de impedância elétrica**

O acompanhamento do comportamento da impedância elétrica rastreando as ressonâncias através da magnitude e da fase, bem como pela banda de frequência, permite caracterizar a fita sob influência do ambiente.

Parâmetros são calculados a partir da influência que o campo magnético sofre em função das mudanças ambientais as quais são submetidas as fitas magnetostrictivas. A partir dessas mudanças comportamentais, o sistema trabalha para trazer informações sobre a variação de ambiente viscoso e carregamento que a fita está sofrendo. Alguns parâmetros calculados a partir das características dos deslocamentos em frequência permitem calcular o coeficiente de acoplamento magnético e velocidade do som.

#### **5.3.1 Comportamento da frequência de ressonância**

A Figura 40 mostra o comportamento da frequência de ressonância fundamental em função do campo magnético estático aplicado. Na faixa de corrente contínua entre 0,35 à 0,55A, ocorrem as maiores amplitudes do sinal e, respectivamente, as frequências de ressonâncias mais baixas. A frequência de ressonância mínima do sensor está associada à magnetização constante durante o alinhamento dos domínios em resposta a máxima amplitude do sinal.

O controle realizado através da varredura de corrente contínua para o campo magnético estático aplicado ao sistema mostra-se adequado na determinação da faixa de polarização que otimiza a resposta do sensor. Este procedimento permitiu selecionar a mínima frequência atingida de 56,4kHz pelo sensor quando a corrente contínua alcança 0.49A. O menor valor de frequência de ressonância apresentado no gráfico para a variação do campo magnético corresponde a frequência de ressonância do sensor.

Nota-se uma correspondência entre as menores ressonâncias atingidas com maiores amplitudes do sinal. A corrente de polarização afeta também a medida deslocando o pico de ressonância e anti-ressonância

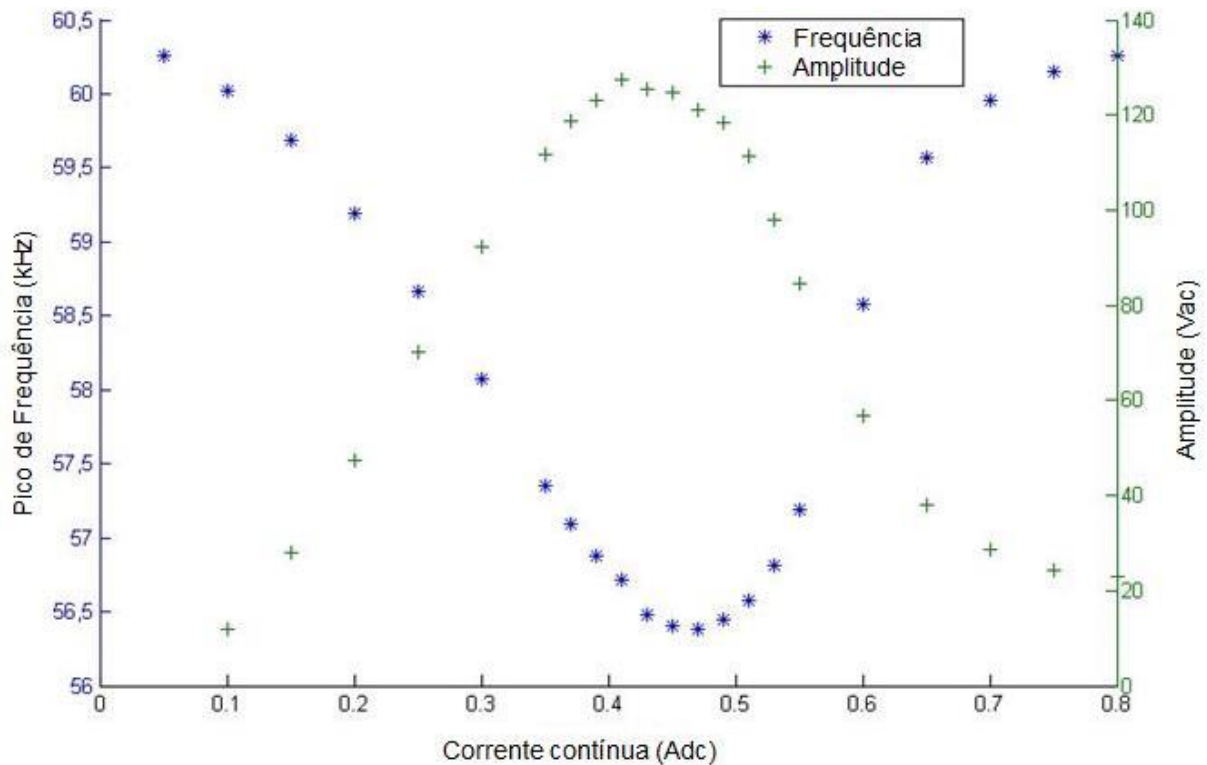


Figura 40 Variação da frequência de ressonância fundamental e amplitude do sinal em função da corrente contínua aplicada

### 5.3.2 Comportamento da frequência de ressonância em função da viscosidade do meio

Através do método experimental de medidas elétricas de impedância, foi possível analisar variações no sinal que viabilizaram o sensoriamento em ambientes viscosos.

Ao submeter a fita a uma mudança de meio ambiente, notou-se uma variação na amplitude da magnitude da impedância.  $\Omega$

O método criado para o monitoramento e análise, a partir do deslocamento da banda da frequência de ressonância do sinal, apresenta uma excelente performance no sensoriamento de viscosidade. É clara a atenuação da amplitude da impedância elétrica diante da mudança de viscosidade do meio (ar, água e óleo). Nota-se também que as ressonâncias e anti-ressonâncias migram para valores menores, com o aumento da viscosidade do meio em que as fitas são inseridas. As Figuras 41a b e c, em sequência mostram a banda de ressonância fundamental e as 42a, b e c a terceira harmônica, no crescimento da viscosidade. O crescimento da viscosidade simultaneamente com a variação do campo magnético estático apresenta evidências através de uma alteração na resposta do sinal.

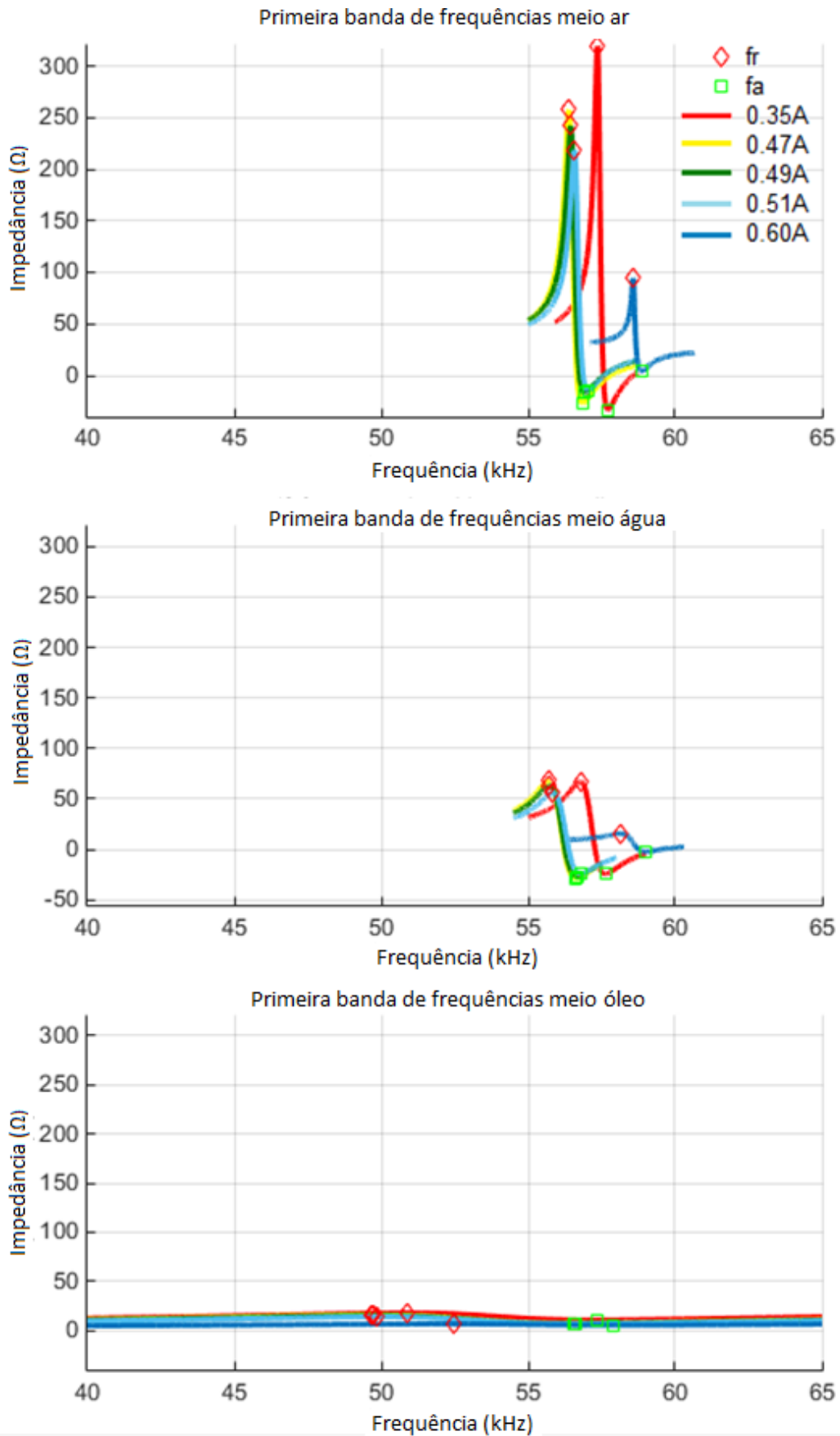


Figura 41 Impedância em função da primeira banda de frequências nos meios ar, água e óleo

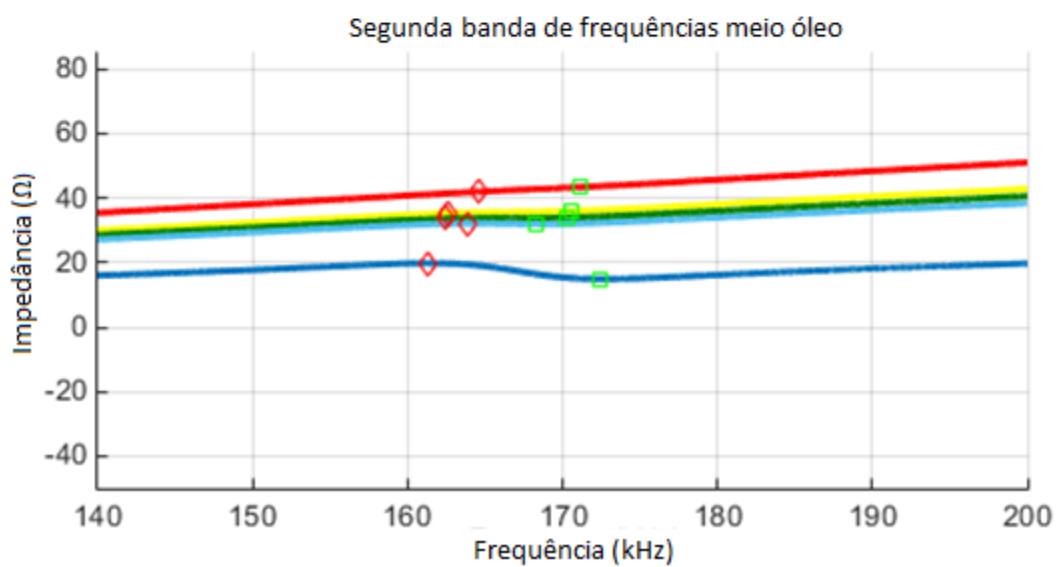
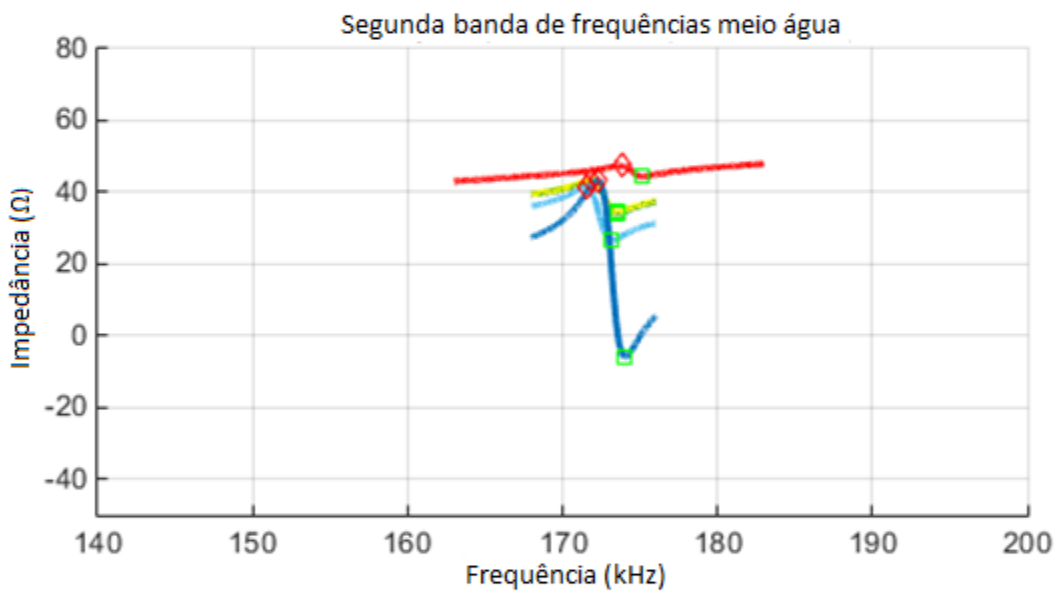
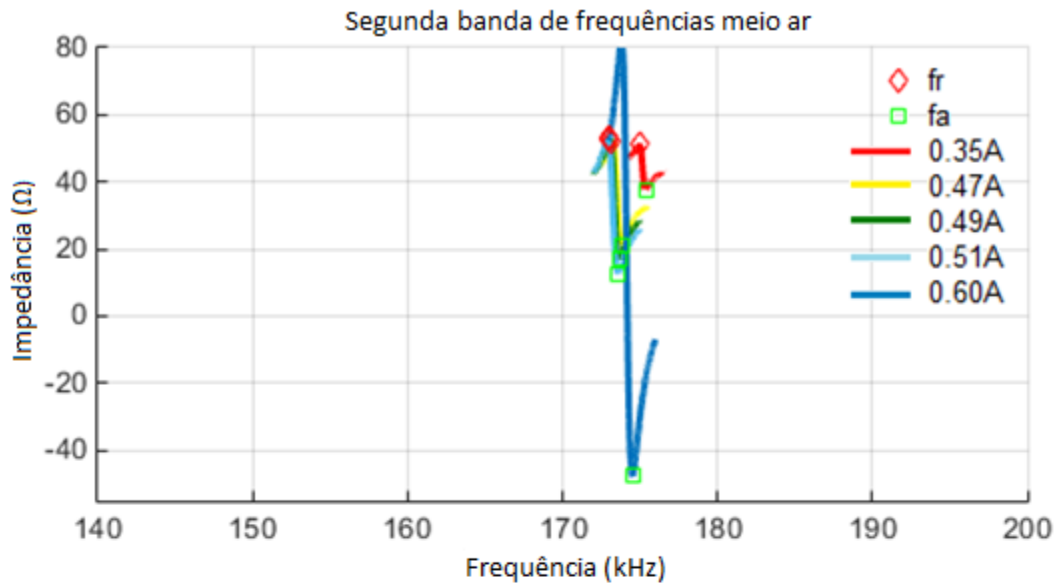


Figura 42 Impedância em função da segunda banda de frequências nos meios ar, água e óleo

A variação da magnitude das ressonâncias na frequência revelam a dependência da correta polarização na busca pela frequência de ressonância mínima. O afastamento entre as frequências de ressonância e anti-ressonância, o alargamento do ângulo de fase e os valores de magnitude máximos e mínimos das frequências tornam possível a distinção do meio.

### 5.3.3 Comportamento em função do coeficiente de acoplamento magnético e velocidade do som

O efeito que a fita sofreu em meio a uma mudança de viscosidade foi representado de diversas formas para o desvio das frequências dos meios mais viscosos comparadas as respostas com a exposição no ar. A Figura 43 mostra a velocidade do som e coeficiente de acoplamento da fita ME02 em função de uma variação na polarização, onde o meio viscoso reage com a superfície da fita e altera estes parâmetros.

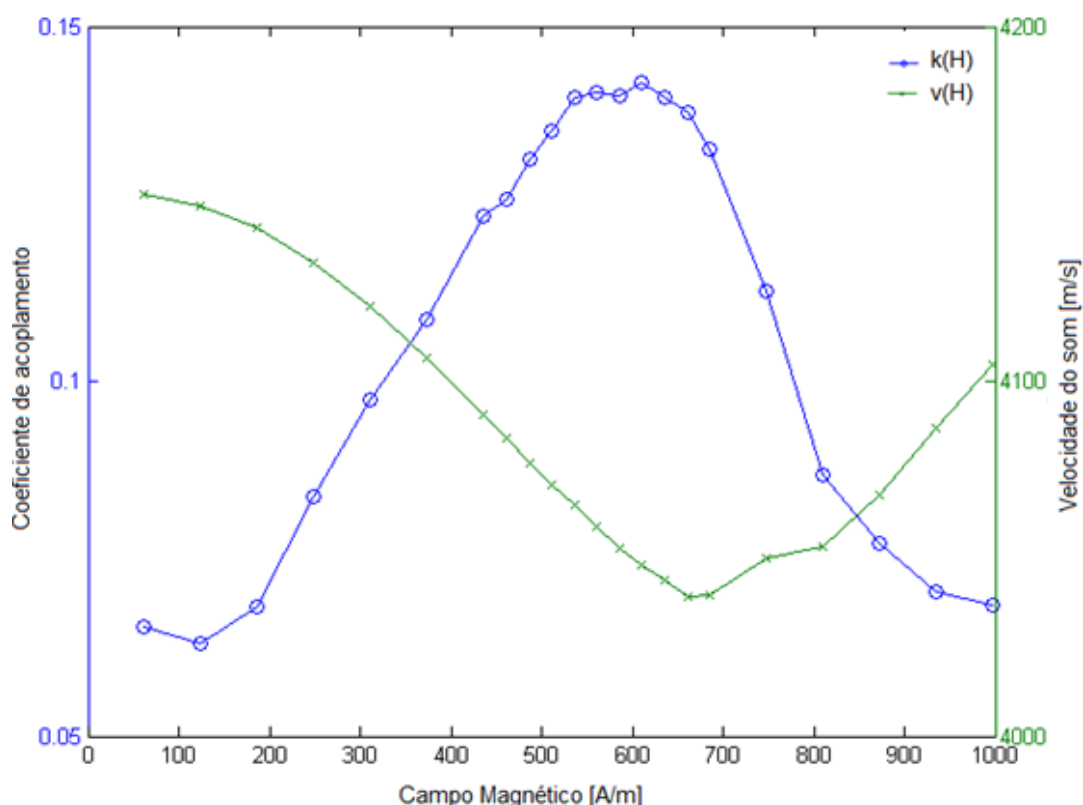


Figura 43 Velocidade do som e coeficiente de acoplamento da fita no ar, em função de um campo estático aplicado

#### **5.4 Comportamento diante da variação de viscosidade e carga no monitoramento das vibrações**

Neste capítulo, é avaliada a influência da viscosidade do meio e pressão no comportamento das vibrações, através do acompanhamento das ressonâncias no espectro em frequência do modo puro.

Os cálculos do coeficiente de acoplamento magnetoelástico e velocidade do som são parâmetros importantes para qualificar os fenômenos sob condições variáveis ambientais. Foi traçado um comparativo em função da variabilidade das respostas, largura de banda e carregamento.

##### **5.4.1 Coeficiente de acoplamento magnético e velocidade do som em função da viscosidade**

Os resultados experimentais mostram a influência da frequência de ressonância de uma fita magnetoelástica na presença de um campo de polarização. Este efeito, chamado  $\Delta E$  e dependente do estado de magnetização e de uma mudança do módulo elástico, resulta em uma mudança de frequência de ressonância. As características de ressonância mínima são resultado do processamento magnético e térmico da fita, possíveis distúrbios de campo magnético ou tensões mecânicas superimpostas.

Os gráficos das Figuras 44a e b mostram a relação inversa entre o coeficiente de acoplamento magnetoelástico e a velocidade do som para uma flutuação do campo magnético estático, bem como um campo dinâmico fixo de 9,05 A/m para a fita submetida a variabilidade de viscosidade. Os dados permitem concluir que foi possível diferenciar ar, água e óleo mesmo não sendo atingida a mais eficiente polarização do conjunto.

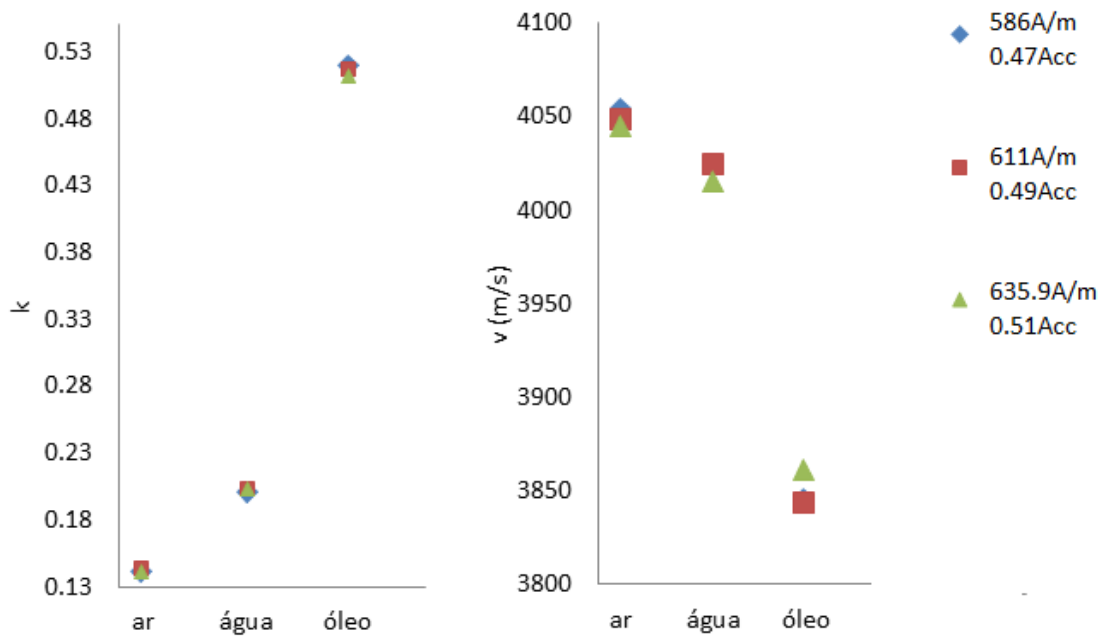


Figura 44 a) coeficiente de acoplamento magnetoelástico e b) velocidade do som para meios ar, água e óleo em uma pequena variação do campo estático

#### 5.4.2 Ressonâncias do modo longitudinal em função da viscosidade

A normalização das frequências de ressonância e anti-ressonância para os meios envolvidos permitiu constatar uma sensibilidade maior na análise da frequência de ressonância fundamental quando comparada às harmônicas do modo puro de vibração.

Na Figura 45a e b é visível o afastamento entre frequência de ressonância e frequência de anti-ressonância com o aumento da viscosidade. O fator de qualidade do sinal cai a partir da maior dissipação de energia envolvida, que ocorre com o aumento da viscosidade.

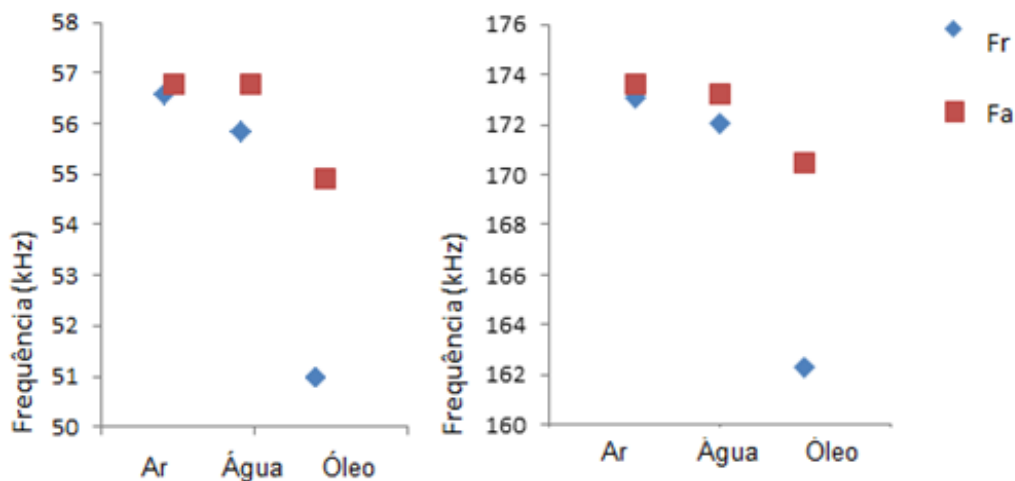


Figura 45 Efeito na frequência de ressonância e anti-ressonância do modo puro de vibração para meios ar, água e óleo a) frequência fundamental e b) harmônica

A Tabela 3 mostra os valores de frequência fundamental, terceira harmônica e banda para os meios ar, água e óleo em resposta a uma pequena variação do campo estático para os distintos ambientes.

Tabela 3 Valores de Freq. fundamental, 3ª harmônica e banda para os meios ar, água e óleo submetidos à uma pequena variação de campo estático

Frequência	Meio Ar		Meio Água		Meio Óleo	
	fundamental (Hz)	fr=56702	fa= 56285	fr= 56760	fa= 55739	fr= 54912
	Fr-Fa(Hz)= 417		Fr-Fa(Hz)= 1021		Fr-Fa(Hz)= 4049	
3ª harmônica (Hz)	fr=173564	fa=173073	fr=173150	fa= 171980	fr=170462	fa=162312
	Fr-Fa(Hz)= 491		Fr-Fa(Hz)=1170		Fr-Fa(Hz)=8150	

A Figura 46a e b apresenta os parâmetros k e v que sofrem alteração para uma variação de viscosidade do meio para as fitas ME1 à ME4 expostas ao ar, água e óleo. As médias e o desvio padrão apresentadas indicam os valores limites para as transições.



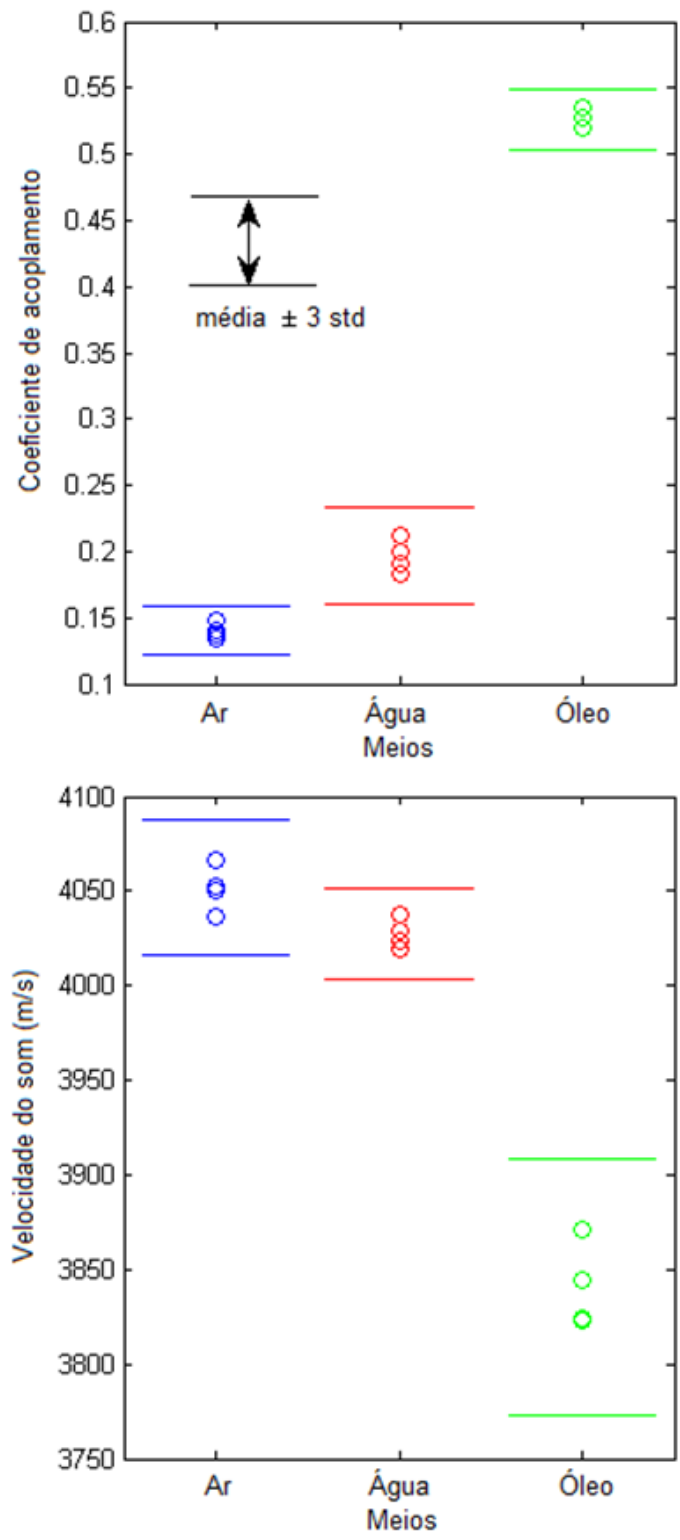


Figura 46 Variabilidade das quatro fitas em função do meio ao comportamento do a) coeficiente de acoplamento magnetoelástico e b) velocidade do som

Estes parâmetros calculados são evidências da eficiente resposta em função da variabilidade para as quatro fitas utilizada. Entre as principais hipóteses da pequena dispersão apresentada pela variabilidade do sinal, temos a rugosidade, a geometria e as propriedades magnetoelásticas entre as amostras.

O crescimento da viscosidade nas quatro fitas mostra um aumento do coeficiente de acoplamento magnético e uma queda na velocidade do som. O monitoramento das ressonâncias mostrou que, para uma queda da frequência, ocorreu um crescimento do amortecimento, correlacionado com ambos os crescimentos da viscosidade e coeficiente de acoplamento magnetoelástico apresentados. A vibração de um sistema submetido a um ambiente viscoso apresenta maior amortecimento.

A Tabela 4 apresenta valores de  $k$  e  $v$  para as quatro fitas analisadas nos três meios, para um  $H_{cc}$  igual a 586 A/m e  $H_{ac}$  igual à 9,05 A/m.

Tabela 4 Variabilidade das quatro fitas em função do coeficiente de acoplamento magnetoelástico e velocidade do som nos três meios empregados

nome da fita	Valores de $k$ máximo				Valores de $v$ (em m/s)			
	ME1	ME2	ME3	ME4	ME1	ME2	ME3	ME4
ar	0,1378	0,1401	0,1481	0,1336	4037	4053	4067	4050
água	0,1814	0,1988	0,1900	0,2086	4033	4029	4042	4026
óleo	0,4422	0,4195	0,4064	0,4121	3817	3834	3860	3814

#### 5.4.3 Influência da viscosidade e pressão no comportamento das vibrações

Na investigação do comportamento do sensor, além de variar a viscosidade do meio, foi imposta uma variação de carga em algumas regiões da fita. Devido a consequência de uma mistura de modos, não são previsíveis os deslocamentos em frequência e suas amplitudes da mesma forma ao modo puro de vibração.

São apresentados maiores afastamentos entre as ressonâncias no espectro de frequências, adicionalmente à queda da amplitude do sinal sob influência da viscosidade e carregamento. O comportamento observado indica uma região de linearidade entre o peso e as ressonâncias para as duas curvas de carregamento crescente, e também encontrou melhores resultados para o monitoramento de cargas na banda de frequência harmônica. A amplitude da impedância apresentou maiores valores para a frequência harmônica quando comparada a

fundamental independente da viscosidade do meio durante o monitoramento, com variação no carregamento. Traçou-se um paralelo com os resultados sem pressão, onde o aumento da viscosidade proporcionou um maior acoplamento magnetoelástico juntamente com uma queda de frequência.

A Figura 47 mostra os deslocamentos das frequências na fita ME2 no ar sob carregamento crescente. Foi realizado um rastreamento das ressonâncias entre as bandas fundamental e harmônica e identificando os picos de amplitude da impedância elétrica segundo o carregamento aplicado.

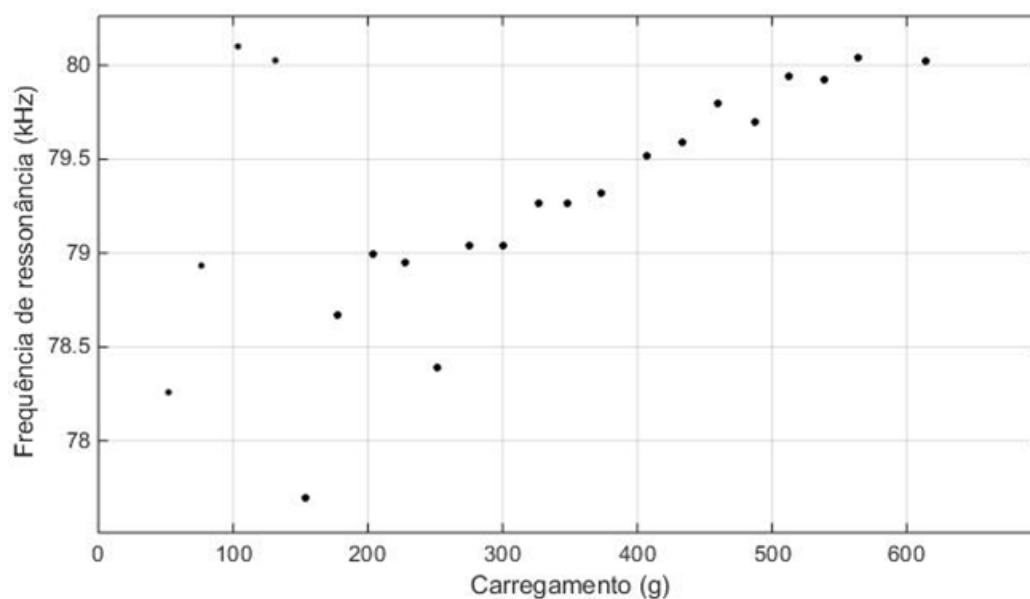


Figura 47 Banda de fr x com carregamento aplicado à cinco áreas de pressão no meio ar

O sistema desenvolvido apresentou instabilidade inicial devido a dificuldade de aplicação de cargas muito leves, além de possíveis erros de medição em carregamentos maiores que 600g. Os desvios de medição ocorrem pela dificuldade de transferência do peso aplicado uniformemente para a fita. De 600g a 2500g o sinal apresenta resposta ao carregamento em passos crescentes em relação ao carregamento e as ressonâncias. São necessários maiores estudos, pois há uma hipótese de que o sistema mecânico tenha apresentado deformação para cargas pesadas (o que nos levou a excluir estes pontos do modelo). Uma das alternativas de melhoria seria fabricar um conjunto de outro material mais resistente.

Analisando uma região próxima da frequência da terceira harmônica, mesmo com o crescente carregamento de massa sobre a fita, foi possível separar os meios aos quais foram expostas. Uma vez que seja conhecido o carregamento, é possível descobrir o meio em que a fita foi inserida através da banda em que a frequência de ressonância ocorre. A separação dos meios ar e água através de bandas de frequências de ressonâncias (como pode ser

visualizado na Figura 48 mostra que há possibilidade de identificação de meios sob carregamento. Existe também uma separação dos meios em relação ao óleo por não apresentar possibilidade do monitoramento das ressonâncias.

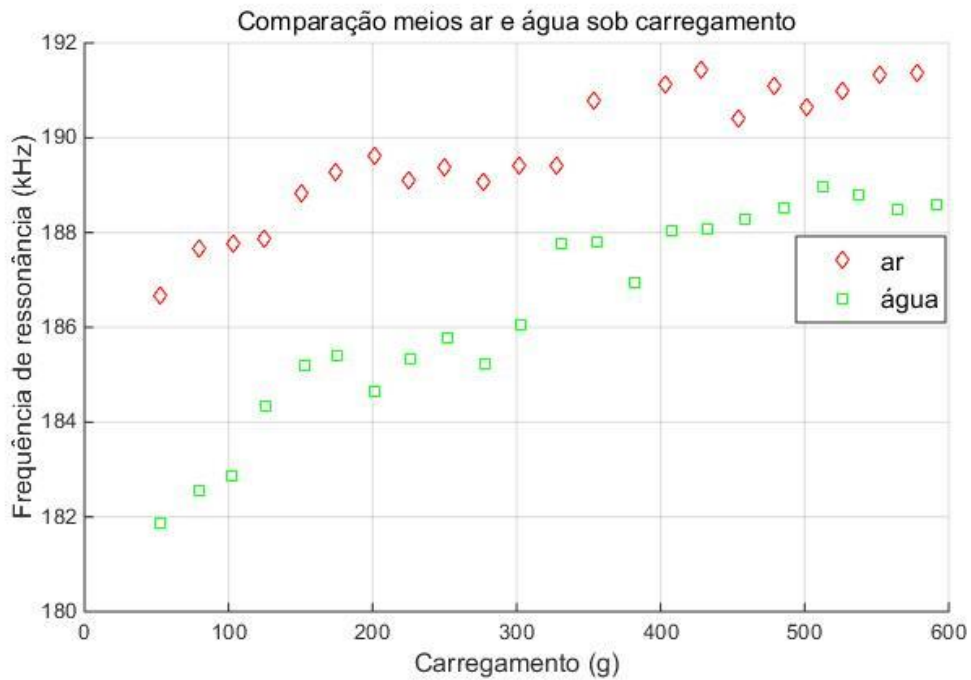


Figura 48 ar e água, 2ª banda de fr x com carregamento aplicado à cinco áreas da fita

A Tabela 5 a seguir mostra os valores dos deslocamento no espectro de frequências para ressonâncias em torno da banda da terceira harmônica, ao submeterem-se as fitas à uma variação de viscosidade, e pressão. São mostrados pontos sem carregamento na banda da 3ª harmônica, no ar, água e óleo, com o objetivo de comparar as faixas em que as ressonâncias ocorrem.

Tabela 5 Ressonâncias em torno da terceira harmônica, sem carregamento para meios diferentes

Meio	fr harmônica (Hz)
óleo	162000
água	171880
ar	173046

Ao variar o carregamento até 600g, foi possível identificar e separar frequências de ressonância em faixas próximas da frequência fundamental e harmônicas. Porém, faz-se necessário verificar outras faixas de frequência para este carregamento, pois não foi possível identificar meios com precisão, uma vez que a amplitude do sinal cai, e a banda torna-se mais larga entre a frequência de ressonância e a frequência de antirressonância.

Para medidas com pressões maiores que 600g, torna-se necessário o desenvolvimento de um novo suporte, mais rígido, garantindo que não haja deformação plástica. Foram realizadas medidas a fim de testar a repetibilidade com as quatro fitas analisadas, e estas mostraram o mesmo comportamento em função do carregamento e do meio.

## 6.0 CONCLUSÕES

Neste trabalho, a liga de natureza magnetostrictiva estudada e caracterizada através de metodologias experimentais e de simulação mostrou competência na aplicação como sensor. A infraestrutura desenvolvida para a caracterização utilizando medidas acústicas e de impedância elétrica se mostrou eficiente na aplicação em meio a variação de viscosidade, porém, não apresentou tamanha eficiência ao ser exposta a cargas altas.

Verificou-se a eficiência na utilização de sensores anti-furto nas aplicações envolvendo sensoriamento, para detecção de solicitação mecânica em uma determinada faixa de carregamento, e para a variação de viscosidade (no ar, água e óleo) em que foram alcançados ótimos resultados.

O dispositivo desenvolvido foi caracterizado quanto ao seu comportamento do no meio ar de tal forma que os métodos conversaram entre si. As ressonâncias mecânica e elétrica mostraram resposta conforme esperada no estado da arte onde a variabilidade foi um parâmetro utilizado para avaliar o sensor. Alguns parâmetros dependentes da variação do campo magnético auxiliaram na avaliação do monitoramento de viscosidade e de esforço mecânico. Dentre eles foram investigados a frequência (de ressonância e anti-ressonância) e o coeficiente de acoplamento magnetoelástico, que apresentaram os melhores resultados, em contrapartida, a velocidade do som, a banda de frequência e a magnitude da impedância elétrica não se revelaram como bons resultados.

O desenvolvimento tem propósito de suprir a necessidade no monitoramento remoto diante de uma solicitação mecânica e alteração de tipo de fluido em locais de difícil acesso. Através da investigação do modo de vibração foram adquiridos ótimos resultados na detecção de fluidos com grande variação de viscosidade. Diante de uma solicitação mecânica o sensor apresentou bons resultados no ar e água, porém necessita de mais estudos ao envolver maiores viscosidades.

## 7.0 REFERÊNCIAS

Handbook of Advanced Magnetic Materials no Nano-Structural Magnetoelastic Materials for Sensor Applications, 2006, pp. 1667-1707.

Aharoni, A. Introduction to the Theory of Ferromagnetism, Oxford, London, 1996, p. 128.

Anderson, P.M. Magnetomechanical coupling: DeltaE effect, and permeability in FeSiB and FeNiMoB alloys. J. Appl. Phys. 53. 1986, p. 166.

Aspnes, D.E. Optical Properties Thin Films. Thin Solid Films, vol. 89, no. 3, 1982, pp. 249-262.

Baimpos, T., et al. A Polymer-Metglas Sensor used to Detect Volatile Organic Compounds. Sensors and Actuators A: Physical, 3, vol. 158, no. 2, 2010, pp. 249-253.

Baiotto, R. Desenvolvimento e Caracterização de Transdutor Acústico, Eletromagnético de Imãs Permanentes Periódicos, Dissertação, Mestre em Engenharia, PPGE3M-UFRGS, 2014, Brasil

Baiotto, R. O ruído Barkhausen como ferramenta não destrutiva para análise do processo de fadiga do aço AISI 4340, Relatório de Estágio II apresentado, como pré-requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Mecânico, na Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2011.

Ballantine Jr, et al. Acoustic Wave Sensors: Theory, Design, & Physico-Chemical Applications. Academic press, 1996.

Barandiaran, J.M. And Gutierrez, J. Magnetoelastic Sensors Based on Soft Amorphous Magnetic Alloys. Sensors and Actuators A: Physical, 4, vol. 59, no. 1-3, 1997, pp. 38-42.

Belahcene, B., Mansri, A. And Benmoussat, A. Investigation on the Rheological Behavior of Multigrade Oil Under the Effect of Organic and Inorganic Impurities. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 4, no. 6, 2014, pp. 711-713.

Bertotti, G. *Hysteresis in Magnetism: For Physicists, Materials Scientists, and Engineers*. Academic press, 1998.

Bohn, F. 2005. *Magnetostricção e ruído Barkhausen em aços elétricos de grão não-orientado*. Dissertação (Mestrado em Física). Universidade Federal de Santa Maria, 2005.

Bohn, F. 2009. *Propriedades estatísticas do ruído Barkhausen em materiais magnéticos artificialmente estruturados*. Tese (Doutorado em Física). Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

Bohn, F. et al. Magnetostriction in non-oriented electrical steels. *Physica B: Condensed Matter*, 384(1), 294-296, 2006.

Bouropoulos, N., Kouzoudis, D., Grimes, C. The real-time, in situ monitoring of calcium oxalate and brushite precipitation using magnetoelastic sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical* 109.2 (2005): 227-232.

Bozorth, R. M. 2003. *Ferromagnetism*. New York : IEEE Press, 2003.

Bradbury, T. C. *Theoretical Mechanics*, Krieger Publishing, Manabar, FL, 1981.

Butterworth, S.; Smith, F. D. The equivalent circuit of the magnetostriction oscillator. *Proceedings of the Physical Society* 43, no. 2 (1931): 166



Cai, Q.Y., Cammers-Goodwin, A., Grimes, C.A. A Wireless, Remote Query Magnetoelastic CO Sensor. The Royal Society of Chemistry. 2000,

Cai, Q.Y., Jain, M.K., Grimes, C.A. A Wireless, Remote Query Ammonia Sensor. Sensors and Actuators B: Chemical, 7/10, vol. 77, no. 3, 2001, pp. 614-619.

Callister, W. Ciência E Engenharia de Materiais: Uma Introdução. Grupo Gen-LTC, 2002.

Chai, Y., et al. Surface-scanning coil detectors for magnetoelastic biosensors: A comparison of planar-spiral and solenoid coils. Applied Physics Letters, 103(17), 173510, 2013

Coey, J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials. Cambridge, UK : Cambridge University Press, 2009.

CRC. Handbook of Chemistry and Physics, 55th ed., CRC Press, Boca Raton, FL, 1974 1975, p. F 11.

Cullity, B.D., Graham, C.D. Introduction to Magnetic Materials. Wiley: 2011.

de Lacheisserie, E. D. T. Magnetoelastic Properties of Amorphous Alloys. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 0, vol. 25, no. 3, 1982. pp. 251-270.

Engdahl, G. Handbook of giant magnetostrictive materials. Academic Press, San Diego, 2000

Fateh, B. Modeling, simulation and optimization of a microcoil for MRI-cell imaging. Master's Thesis, University of Freiburg (2006).

Giannakopoulos, I. G. Et al. Synthesis and characterization of a composite zeolite–Metglas carbon dioxide sensor. Advanced Functional Materials, 15(7), 1165-1170, 2005.

GR GENERAL RADIO COMPANY, ENGINEERING DEPARTMENT. Instruments Notes IN-105, The Frequency Spectrum of a Tone Burst, 1965, EUA.

Grate, J.W., Martin, S.J., White, R.M. Acoustic TSM, SAW, FPW and APM wave microsensors: part I. Analytical chemistry 65, 1993.

Griffiths, D. J. Introduction to electrodynamics, 3ed, Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999.

Grimes, C.A. and Kouzoudis, D. Remote query measurement of pressure, fluid flow velocity and humidity using magnetoelastic thick film sensors. Sensors Actuators Physics. 2000, pp. 205-212.

Grimes, C.A. et al. Simultaneous Measurement of Liquid Density and Viscosity using Remote Query Magnetoelastic Sensors. Review of Scientific Instruments, vol. 71, no. 10, 2000, pp. 3822-3824.

Grimes, C.A., et al. A magnetostatic coupling based remote query sensor for environmental monitoring. J. phis D 32. 1999, pp. 1329-1335.

Grimes, C.A., et al. Magnetoelastic sensors for remote query environmental monitoring, J. Smart Mater. Struct. 8 (1999) 639-646.

Grimes, C.A., et al. Magnetoelastic Sensors in Combination with Nanometer-Scale Honeycombed Thin Film Ceramic TiO<sub>2</sub> for Remote Query Measurement of Humidity. Journal of Applied Physics, vol. 87, no. 9, 2000, pp. 5341-5343.

Grimes, C.A., et al. Remote query pressure measurement using magnetoelastic sensor. Science Instrum. 1999.

Grimes, C.A., et al. Theory, Instrumentation and Applications of Magnetoelastic Resonance Sensors: A Review. *Sensors*. march 2011, p. 36.

Grimes, C.A., et al. Wireless magnetoelastic resonance sensors: A critical review. *Sensors*. 2002, pp. 294-313.

Grimes, C.A., Kouzoudis, D., Mungle, C. Simultaneous Measurement of Liquid Density and Viscosity using Remote Query Magnetoelastic Sensors. *Review of Scientific Instruments*, vol. 71, no. 10, 2000, pp. 3822-3824.

GIL, G. Queremos saber. In: GIL, G. (Intérp.). *O viramundo – ao vivo*. Universal, 1976

Gutierrez, J., Muto, V., Squire, P.T, Induced anisotropy and magnetoelastic properties of Fe-rich metallic glasses. *Journal of Non-Crystalline Solids*, v.287, 2001, p.417-420.

Hagen, J.B., *Radio-Frequency Electronics: Circuits and Applications*. Cambridge University Press, 2009.

Hall, D. L. Dynamics And Vibrations Of Magnetostrictive Transducers, DISSERTATION DOCTOR OF PHILOSOPHY, IOWA STATE UNIVERSITY, AMES IOWA, 1994

Haruta, H. *The Impedance Measurement Handbook: A Guide to Measurement Technology and Techniques*. Agilent Technologies, 2000.

Hathaway, K. B., Spano, M. L. Measurement of high magnetomechanical coupling factors by resonance techniques. *Journal of applied physics* 55.6 (1984): 1765-1767.

Heusler, K. E. et. al. Measurements of mass and surface stress at one electrode of a quartz oscillator, *Deut. Bunsenges. Phys. Chem.* 92 (1988) 1218–1225.

HONEYWELL; Columbia Road, Morristown, NJ 07962 USA. 2008. Acessível em: <http://www.honeywell.com>

IEEE, Std 319-1990, Revision of IEEE Std 319-1971, IEEE Standard on Magnetostrictive Materials: Piezomagnetic Nomenclature, New York, 1990.

Inoue, M., Fujii, T., Miyama, T. Propagation properties of magnetoelastic waves in a magnetic slab, *J. Magn. Magn. Mater.* 35 (1983) 158-160.

Jackson, J. Classical Electrodynamics. J.Lekner, *Phys.Rev.*, vol. 21, 1957, pp. 158, 130.

Jain, M.K., Cai, Q. Y. and Grimes, C.A. A wireless micro-sensor for simultaneous measurements of pH, temperature and pressure. *Smart Materials Structural.* 2001, pp. 347-353

Jain, M.K., et al. Magnetoacoustic remote query temperature and humidity sensors. *Smart Materials Structural.* 2000, pp. 502-510.

Jain, M.K., et al. Measurement of Temperature and Liquid Viscosity using Wireless Magneto-acoustic/magneto-Optical Sensors. *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 4, 2001, pp. 2767-2769

Jiles, D.C. *Introduction to Magnetism and Magnetic Materials*, 2.ed. Taylor & Francis: 1998.

ZENG, K.; PAULOSE, M.; ONG, K.; GRIMES, K., Frequency-domain characterization of magnetoelastic sensors: a microcontroller-based instrument for spectrum analysis using a threshold-crossing counting technique, *Sensors and Actuators A* 121 (2005) 66-71, USA, 2004

Kittel, C. *Introdução à Física do Estado Sólido*. LTC. Rio De Janeiro, 2006.

Kittel, C. Physical Theory of Ferromagnetic Domains. *Rev.Mod.Phys.*, Out., vol. 21, no. 4, 1949, pp. 541-583.

Kittel, C.; Galt, J. Ferromagnetic Domain Theory. *Solid State Physics*, vol. 3, 1956, pp. 437-564.

Kouzoudis, D., Grimes, C.A. The frequency response of magnetoelastic sensors to stress and atmospheric pressure. *Smart Materials Structural*. 2000, pp. 885-889.

Kouzoudis, D; Grimes, C.A., Remote Query Fluid-Flow Velocity Measurement using Magnetoelastic Thick-Film Sensors (Invited). *Journal of Applied Physics*, vol. 87, no. 9, 2000, pp. 6301-6303.

Landau, L.D., E.M. Lifshitz, *Theory of Elasticity*, 3ed., Butterworths, Heinemann, 1995.

Li, S, et al. Amorphous metallic glass biosensors. *Intermetallics* 30 (2012): 80-85.

Li, S.; Cheng, Z. Nonuniform Mass Detection using Magnetostrictive Biosensors Operating Under Multiple Harmonic Resonance Modes. *Journal of Applied Physics*, vol. 107, no. 11, 2010. pp. 114514.

Liang, C.; Morshed, S.; Prorok, B.C. Correction for longitudinal mode vibration in thin slender beams. *Applied physics letters*. 2007.

Livingston, J. D., Magnetomechanical properties of amorphous metals, *Physica Status Solidi*, v.70, p.591-596, 1982.

Loiselle, K.T. and Grimes, C.A. 2000. Viscosity measurements of viscous liquids using magnetoelastic thick-film sensors. *Review of Scientific Instruments*. 2000, pp. 1441-1446.

Lonngren, K. E; Savov, S. V; Jost, R. J. *Fundamentals of Electromagnetics with MATLAB*, 2 ed, Raleigh: SciTech, 2007.

MCKEEHAN, L. W. Magnetostriction. *Journal of the Franklin Institute* 202.6 (1926): 737-773.

Meeks, S. M.; Hill, J. C. Magnetic boundary conditions for metallic glass piezomagnetic transducers, *J. Acoust. Soc. Am.* 74 (5) 1623-1626, 1983.

METGLAS 2826MB Inc. Material Safety Data Sheet, Allied Dr. Metglas 2826mb Iron-Nickel Base Magnetic Core, Dcn Frm 8200.010 Rev01, Conway, EUA, 2013

MODZELEWSKI, C. Et al. *IEEE Trans. Magn.* MAG-17 (1981): 2837.

Mungle C. S., Shao R., Roy S. C., Ong K. G., Grimes, C. A., An Analysis on the Effect of Sensor Configuration and Geometry of Magnetoelastic Resonance Sensors Operating in Air. *Sensor Letters*, 2008, pp. Vol. 6, 137-148.

Nakata, T., et al. Magnetostriction Measurements with a Laser Doppler Velocimeter. *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 30, no. 6, 1994. pp. 4563-4565.

O'handley, R.C. *Modern Magnetic Materials: Principles and Applications*. USA, Editor John Wiley & Sons, Inc., 2000, p. 218 -241.

Ong, K. G., Grimes, C. A. *Nano-Structural Magnetoelastic Materials, Sensor Applications*, pp. 339-379

Ong, K.G., et al. *Magnetism-Based Sensors*. International Society for Optics and Photonics: 2001.

Ong, K.G., Grimes, C.A. *Handbook of Advanced Magnetic Materials. Nano-Structural Magnetoelastic Materials for Sensor Applications*, 2006, pp. 1667-1707.

Ong, K.G., Grimes, C.A., C.L. Robbins, R.S. Singh. Design and applications of wireless, passive, resonant-circuit based environmental monitoring sensor. *Sensors Actuators Physics*. 2001, pp. 33-43.

Ong, K.G; Grimes, C.A. Nano-Structural Magnetoelastic Materials for Sensor Applications. In: *Handbook of Advanced Magnetic Materials Springer. Nano-Structural Magnetoelastic Materials for Sensor Applications*, 2006. pp. 1667-1707.

Rao, S.S. *Mechanical Vibrations*. Pearson Education: 2016.

Ribichini, R. *Modelling Of Electromagnetic Acoustic Transducers*, Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Imperial College London, Londres, 2011

Sá, L.V. *Magnetostricção e anisotropia magnética de filmes de Cobalto em substratos de vidro e Silício*. 89f. Dissertação (Mestrado em Física) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

Sautbekov, S. The Generalized Solutions of a System of Maxwell's Equations for the Uniaxial anisotropic Media. In: KISHK, A. A. (Org.). *Electromagnetic Waves Propagation In Complex Matter*. Rijeka: InTech, 2011.

Savage, H.T., Spano, M.L. Theory and application of highly magnetoelastic Metglas<sup>TM</sup> 2605SC, *J. Appl. Phys.* 53 (11) (1982) 8092-8097.

Schmidt, S. *Magnetoelastic sensors and their application for dynamic elastic modulus measurements of thin-film coatings*, Master's Thesis, University of Kentucky, 2000.

Schmidt, S., Grimes, C. Characterization of Nano-Dimensional Thin-Film Elastic Moduli using Magnetoelastic Sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 11/20, vol. 94, no. 3, 2001, pp. 189-196.

Schmidt, S.; Grimes, C.A. Elastic Modulus Measurement of Thin Films Coated Onto Magnetoelastic Ribbons. *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol. 37, no. 4, 2001, pp. 2731-2733

Scruby, C.B; Drain, L.E., *Laser Ultrasonics Techniques and Applications*. Ed. Adam Hilger ed. New York: Taylor & Francis, 1990;

Shen, W., Mathison, L. C., Petrenko, V. A., Chin, B. A. Design and characterization of a magnetoelastic sensor for the detection of biological agents. *Iop Publishing Journal Of Physics D: Applied Physics* 43, 2010.

Slaughter, Julie C, 2009, Benatar, Jonathan Gabriel, 2005

Stoyanov, P.G. and Grimes, C.A. A remote query magnetostrictive viscosity sensor. *Sensor Actuators A Physical*, 1999. p. 7.

Stoyanov, P.G., et al. A remotely interrogatable sensor for chemical monitoring. *IEEE Trans. Magn.* 34. 1998, pp. 1315-1317.

Stoyanov, P.G.; Grimes, C.A. A Remote Query Magnetostrictive Viscosity Sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*, 3/1, vol. 80, no. 1, 2010, pp. 8-14.

Surendra, K. Modeling and Design of a Three-dimensional Inductor with Magnetic Core. PhD diss., Virginia Polytechnic Institute and State University, 2011.

Tejedor, M.; et al. Experimental evaluation of a roughness model of surface anisotropy in amorphous magnetic ribbons. *IEEE Transactions on Magnetics*, v.34, 1998. p.278-281.

Tormens, C. D. Estudo de secagem de argila vermelha utilizando um sensor magnetoelástico, Programa de Pós Graduação em Engenharia de Processos e Tecnologias da UCS Mestre Engenharia de Processos, 2014



Tsai, H., et al, Design of a Non-Contact Strain Sensor Based on Amorphous Ribbons. *Sensors and Actuators A: Physical*, 9/1, vol. 199, 2013, pp. 37-42.

Ulaby, F. T; Michielssen, E; Ravaioli, U. *Fundamentals Of Applied Electromagnetics*, 5 ed, Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2004

Van der Burgt, C.M. Dynamical physical parameters of the magnetostrictive excitation of extensional and torsional vibrations in ferrites, *Philips Research Reports*, Vol. 8, 1953, pp. 91-132.

Wun-Fogle, M. et al. Magnetoelastic effects in amorphous wires and amorphous ribbons with non-magnetic thin-film coatings, *J. Appl. Phys.* 64 (10) 5405-5407, 1958.

Xue, C., Li, X., Yang, C. Modeling and design of magnetoelastic micro-resonator system for ultrasensitive mass sensing applications. *Magnetics, IEEE Transactions on* 48, no. 11 (2012): 4092-4095.

Yang, G; Zeng, Z; Udpa, L; Udpa, S.S. Modeling and Signal Processing Sensor Tilt in Eddy Current-GMR Inspection. In: CHADY, T; GRATKOWSKI, S; TAKAGI, T; UDPA S. S. (ed.). *Electromagnetic Nondestructive Evaluation (XIV)*. Szczecin: IOS Press, 2011.

Zhang, K., et al. Magnetostrictive resonators as sensors and actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, 200, 2-10, 2013.