ANÁLISE EXPERIMENTAL DO USO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA E MATERIAIS PIEZELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Arthur Adeodato

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos à obtenção do título de mestre.

Orientadores:

Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Rio de Janeiro

Abril de 2017

ANÁLISE EXPERIMENTAL DO USO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA E MATERIAIS PIEZELÉTRICOS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Arthur Adeodato

Banca Examinadora:

Prof. DSc Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (CEFET/RJ) (Orientador)

Prof. DSc Luciana Loureiro da Silva Monteiro (CEFET/RJ) (Coorientadora)

Prof. DSc Marcelo Amorim Savi (COPPE/UFRJ)

Prof. DSc Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior (COPPE/UFRJ)

Prof. PhD Theodoro Antoun Netto (COPPE/UFRJ)

Rio de Janeiro

Abril de 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

A232 Adeodato, Arthur
Análise experimental do uso de ligas com memória de forma e materiais piezelétricos para geração de energia / Arthur Adeodato.—2017.
94f. : il. (algumas color.) grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 90-94
Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Luciana Loureiro da Silva Monteiro

1. Ligas com memória de forma. 2. Análise experimental. 3. Engenharia dos materiais. 4. Engenharia mecânica. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). II. Monteiro, Luciana Loureiro da Silva (Orient.). III. Título.

CDD 620.16

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai Benedito Fonseca e Souza Adeodato e a minha avó Esther Simonin Pinho. Eu devo tudo a vocês.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer em primeiro lugar aos meus professores orientadores: Professor Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco e Professora Luciana Loureiro da Silva Monteiro, por terem acreditado que seria capaz de concluir este trabalho. Obrigado por todo tempo dedicado e conhecimento transmitido. Também gostaria de agradecer ao Professor Ricardo Alexandre Amar de Aguiar por todas as sugestões nos experimentos executados. Agradeço também a todos os professores do PPEMM e funcionários do Programa de Pós-Graduação do CEFET/RJ.

Gostaria de agradecer a todos os técnicos de laboratório que contribuíram para o desenvolvimento desta pesquisa. Em destaque ao amigo e também engenheiro mecânico Brenno Tavares Duarte, seu trabalho contribuiu muito para a conclusão desta dissertação. E ao amigo e técnico Victor Fernandes Campos pela ajuda na parte eletrônica experimental.

Não poderia deixar de agradecer a todos os que frequentam os laboratórios do CEFET/RJ, em principal o *LACTM*. Agradecer também a todos do Laboratório *Mecanon* – UFRJ por toda ajuda e suporte. A todos que contribuíram com alguma ideia ou só com a amizade nesses dois anos de mestrado.

A todos que fizeram parte da minha vida nesse tempo e me motivaram.

RESUMO

A conversão de vibração mecânica em energia elétrica utilizando o conceito de *energy harvesting* através de materiais piezelétricos é uma forma amplamente estudada. O desafio atual nessa área visa o desenvolvimento de dispositivos que possam converter energia em uma ampla faixa de frequência de excitação, adaptando-se a fontes disponíveis no ambiente (sintonia). A amplitude de saída elétrica de um gerador piezelétrico é máxima quando excitado na frequência de ressonância, reduzida rapidamente fora deste limite e as fontes disponíveis no ambiente possuem diferentes frequências de excitação. O efeito combinado de materiais piezelétricos com ligas com memória de forma, do inglês *Shape Memory Alloys* (*SMAs*), vem ao encontro com a necessidade de aumentar a faixa de operação do sistema de geração de energia explorando o efeito de pseudoelasticidade e o efeito memória de forma. As *SMAs* apresentam efeitos histeréticos e mudanças nas propriedades devido às transformações de fase sofridas por carregamentos termomecânicos. Estas mudanças podem alterar a dinâmica do sistema permitindo a adaptação e sintonização com as frequências de excitação. Para este fim, um aparato experimental foi desenvolvido no intuito de testar o sistema de geração de energia através de materiais piezelétricos com a inclusão de um elemento de *SMA* sujeito a diferentes condições de vibração e temperatura. Este trabalho lida com uma análise experimental de um elemento piezelétrico acoplado a uma viga vibrando. Inicialmente, molas de aço são adicionadas, seguido de molas de *SMA* para geração de energia. Os resultados experimentais são comparados com resultados numéricos de outros autores e mostram que as configurações dos dispositivos propostos podem ser usadas para aumentar a faixa de operação do sistema mesmo quando submetido a diferentes frequências de excitação.

Palavras-chaves: geração de energia; material piezelétrico; ligas com memória de forma; análise experimental

ABSTRACT

The conversion of environmental mechanical vibrations into electrical power has attracted the attention of several researchers, introducing the concept of energy harvesting by using piezoelectric materials. A nowadays challenge is to build devices able to efficiently convert energy from available sources found on the nature. Once the total power output obtained from a piezoelectric generator device is maximum when excited by the system resonance frequency and a power loss generated during the energy conversion can occur out of these condition, an adaptive device becomes interesting. As these environmental sources usually operate within a range of vibration frequencies, the synergic effect of piezoelectric materials and shape memory alloys (SMA) helps to increase the operating range of the system using the pseudoelastic and shape memory alloy effects. The SMAs hysteretic effects and change of material elastic modulus associated to phase transformations that introduces the variation of the SMA element damping and stiffness. These changes may alter the natural frequency and the whole system dynamic allowing adaptation and tuning with the excitation frequencies. This work deals with an experimental analysis about a piezoelectric cantilever beam coupled with a steel and shape memory alloy helical springs excited by a *shaker* in different conditions of vibrations and temperatures. Experimental results show that the proposed device configuration can be used to extend the operational range of the device for variable vibration excitation conditions. Good agreement is observed with numerical results obtained from previous works of the authors.

Key-words: energy harvesting; piezoelectric material; shape memory alloy; experimental analysis;

LISTA DE FIGURAS

Figura II.1 - Esquema representativo de um gerador piezelétrico de energia a partir de vibrações mecânicas (ERTRUK, et al., 2011). 16
Figura II.2 - Densidade de potência versus diferença de potencial para diferentes formas de geração de energia. (COOK-CHENNAULT, *et al*., 2008) 18
Figura II.3 - Três elementos piezoeléctricos comerciais. (SODANO, *et al*., 2006)..... 20
Figura II.4 - Esquema da mochila com filmes piezelétricos acoplados as alças. Adaptado de (GRANSTORM, *et al*., 2007)..... 21
Figura II.5 - Piezelétrico acoplado a um tênis de passeio para geração de energia elétrica. Adaptado de (ROCHA, *et al*., 2010) 21
Figura II.6 - (a) Dispositivo piezelétrico gerador de energia. Inclui: um amplificador (V-slider, H-sliders, and clamper), PZTs Bimorphs e outros aparatos. (b) Análise de forças do dispositivo. Adaptado de (XIE, *et al*., 2014)..... 22
Figura II.7 - Testes feitos com organismos vivos para extração de energia elétrica a partir de amostras piezelétricas. (a) PZT acoplado ao ventrículo direito e esquerdo de um bovino; (b) Dispositivo completo com bateria recarregável durante expansão e contração do coração de um bobino; (c) PZT orientado em 0º, 45º e 90º. (DAGDEVIREN, *et al*., 2014) 23
Figura II.8 - Diagrama do gerador de energia de um motor de combustão interna. (KIM, 2014) 24
Figura II.9 - Experimento 2 - Efeito memória de forma e efeito piezelétrico direto. Adaptado de (ZAKHAROV, *et al*., 2012) 25
Figura II.10 - Amplitude de corrente elétrica próxima a ressonância. (HU, *et al*., 2006) 26
Figura II.11 - Dispositivo para geração de energia envolvendo elemento piezelétrico e memória de forma. (SILVA, et al., 2015)..... 27
Figura II.12 - Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura ($\zeta = 0{,}001$). (SILVA, et al., 2015)..... 28
Figura II.13- (a) Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura ($\zeta=0{,}005$). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizado (ω). (SILVA, et al., 2015) 29

Figura II.14- (a) Potência máxima gerada versus frequência. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas (ζ = 0.025). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angulas adimensinalizado (). (SILVA, et al., 2015)..... 30
Figura III.1 - Acoplamentos de domínios físicos em materiais inteligentes. (LEO, 2007) 31
Figura III.2 - (a) Material em temperatura ambiente, (b) Material a temperatura acima da temperatura de Curie com campo elétrico aplicado, (c) Material retorna a temperatura ambiente, sem campo elétrico mas com seus dipolos elétricos reorientados (APC International Ltd, 2011)..... 32
Figura III.3 - Convenção de eixos para um material piezelétrico. (LEO, 2007)..... 33
Figura III.4 - Modos de operação de um piezelétrico. (LEO, 2007) 34
Figura III.5 – Formação da martensita variante martensita maclada (induzida por temperatura). (LAGOUDAS, 2008) 35
Figura III.6 – Remoção de maclas de uma amostra de SMA resfriada e formação da martensita não-maclada (induzida por tensão) (LAGOUDAS, 2008)..... 35
Figura III.7 - Descarregamento e aquecimento de uma liga de SMA. (LAGOUDAS, 2008) 36
Figura III.8 – Efeito pseudoelástico. Curva tensão deformação durante um carregamento e descarregamento de uma liga de SMA a temperatura constante e abaixo de Mf. (LAGOUDAS, 2008)..... 37
Figura III.9 - Tensão x deformação para o efeito memória de forma (LAGOUDAS, 2008). 38
Figura III.10 – (a) Efeito memória de forma two-way e (b) curva tensão x deformação x temperatura. (PAIVA, 2004)..... 39
Figura IV.1 - Esquema das 4 configurações de ensaios desenvolvidos. (a) Viga de alumínio (b) Viga de alumínio e piezelétrico. (c) Viga de alumínio e piezelétrico com mola linear. (d) Viga de alumínio com piezelétrico e molas *SMA*..... 41
Figura IV.2 – *Shaker* modelo V350 e o sistema de controle de vibrações..... 42
Figura IV.3 - Elemento piezelétrico utilizado. Piezo Systems – Modelo Q220-A4-503YB. 43
Figura IV.4 – Configuração envolvendo a viga de alumínio engastada ao *shaker*..... 45
Figura IV.5 – Configuração com o elemento piezelétrico acoplado à viga de alumínio. 45
Figura IV.6 – Equipamento de aquisição de dados..... 46

Figura IV.7 – Transdutores de posição tipo laser utilizados: Laser 1 – 50 μm e Laser 2 – 100 μm 46
Figura IV.8 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 29,4 m/s². 47
Figura IV.9 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 6 m/s². 48
Figura IV.10 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 6 m/s². 48
Figura IV.11 - Comparação entre as respostas teórica / experimental do movimento de excitação da base da viga para diversas amplitudes. (a) amáx = 3g. (b) amáx = 2g. (c) amáx = 1g. (d) amáx = 8 m/s². (e) amáx = 6 m/s². (f) amáx = 4 m/s². (g) amáx = 2 m/s². 50
Figura IV.12 - Estrutura metálica para sustentação dos sensores a laser. 52
Figura IV.13 - *Vibra-stops* para absorção de vibrações produzidas pelo *shaker*. 52
Figura IV.14 - Molas helicoidais de aço utilizadas no experimento. 53
Figura IV.15 - Teste de tração com molas helicoidais de aço. 54
Figura IV.16 - Teste de tração - Mola 1. 54
Figura IV.17 - Teste de tração - Mola 2. 55
Figura IV.18 - Teste de tração - Mola 3. 55
Figura IV.19 - Instrumento para vedar os cadinhos das amostras e balança de micro precisão. 57
Figura IV.20 - Sistema de refrigeração a nitrogênio líquido e máquina de DSC (Mecanon – COPPE/UFRJ). 57
Figura IV.21 - Exemplo do resultado de um teste de *DSC*. 58
Figura IV.22 - Máquina *Instron* utilizada para os testes de tração (LADES – CEFET/RJ). 59
Figura IV.23 – Curva força x deslocamento de um ensaio de tração com um fio de SMA na condição de “como-recebido” 59
Figura IV.24 - Resultado das médias dos ultimos ciclos de treinamento. (a) Força x Deslocamento. (b) Tensão x Deformação. Diâmetro = 0,9 mm. 60
Figura IV.25 – Fio pseudoelástico enrolado na barra rosqueada e fixado com porcas. Pronto para ir ao forno pré-aquecido. 60

Figura IV.26 - Resultado do teste de tração de uma amostra de fio após o tratamento térmico. (a) Força x Deslocamento. (b) Tensão x deformação para o último ciclo. Fio de diâmetro 0,9 mm. 61
Figura IV.27 - Mola austenítica fabricada. 61
Figura IV.28 – (a) Processo de treinamento da mola de SMA pseudoelástica fabricada. (b) Últimos três ciclos do treinamento. 62
Figura IV.29 – Mola martensítica comercial Flexinol. 63
Figura IV.30 – Ensaio de tração da mola comercial da Flexinol com efeito de memória de forma à temperatura ambiente. 64
Figura IV.31 – Fonte de corrente elétrica utilizada no experimento. 65
Figura IV.32 - Correlação corrente elétrica - temperatura na mola com efeito memória de forma: (a) Vista expandida. (b) Foco na espira – Mola com corrente 0,5 A. (c) Foco na espira – Mola com corrente 1,0 A. (d) Foco na espira – Mola com corrente 1,5 A.. 66
Figura IV.33 – Esquema final da montagem do experimento 67
Figura V.1 - Resultado experimental de tensão elétrica de uma viga com elemento piezelétrico em vibração no experimento. Aceleração de base de 6 m/s². 69
Figura V.2 - Resultado experimental do deslocamento da extremidade associada ao Laser 1 de uma viga com elemento piezelétrico em vibração no experimento. Aceleração de base de 6 m/s². 69
Figura V.3 – (a) Amplitude da tensão elétrica e (b) do deslocamento da extremidade da viga, em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 2 m/s². 70
Figura V.4 – (a) Amplitude da tensão elétrica e (b) do deslocamento da extremidade da viga, em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s². 72
Figura V.5 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura "*a*". (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura "*c*". Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s². 76
Figura V.6 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura "a". (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura "c". Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 9,8 m/s². 78
Figura V.7 – (a) Curva Potência x frequência de oscilação. (b) Curvas tensão – deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizado (ω). Encontrados em SILVA et al., (2015). 79

Figura V.8 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura “a”. (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura “c”. Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s². 81
Figura V.9 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura “a”. (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura “c”. Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 9,8 m/s². 83
Figura V.10 – (a) Curva Potência x frequência de oscilação. (b) Laços de histerese para as condições citadas. Encontrados em SILVA et al., (2015). 84
Figura V.11 - Comparação do sistema Piezo + Mola Efeito Memória de forma para condição 0,0 A e envoltória para as correntes utilizadas..... 85
Figura V.12 - Comparação da faixa de frequência: Viga Piezo e Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma. 86

SUMÁRIO

I - Introdução 13

II - Revisão Bibliográfica 16

II.1 Geradores de Energia Piezelétricos Lineares 17

II.2 Efeitos Não lineares na Geração de Energia através de Elementos Piezelétricos 25

III - Fundamentação Teórica 31

III.1 Materiais Piezelétricos 31

III.2 Ligas com Memória de Forma 34

III.2.1 O Efeito Pseudoelástico 36

III.2.2 O Efeito Memória de Forma 37

IV - Metodologia e Resultados de Caracterização 40

IV.1 Equipamento de Excitação de Vibração Mecânica – Shaker 42

IV.2 Materiais e Equipamento de Geração de Energia 43

IV.3 Equipamento de Aquisição de Dados – Spider e Transdutores de Deslocamento 45

IV.4 Elemento de fixação dos sensores e do shaker 51

IV.5 Elementos de mudança de rigidez (Molas) 52

IV.5.1 Molas Helicoidais de Aço 53

IV.5.2 Fabricação da Mola de SMA - Pseudoelástica 56

IV.6 Fonte de corrente para aquecimento das Molas de SMA 64

V - Resultados e Discussão 68

V.1 Resultados com molas de aço 68

V.2 Resultados com molas de SMA 74

V.2.1 Resultados com Mola Pseudoelástica 76

V.2.2 Resultados com Mola Efeito Memória de Forma 80

VI - Conclusões 87

VI.1 Sugestões para trabalhos futuros 89

VII - Referências Bibliográficas 90

I - Introdução

A importância da energia elétrica para o desenvolvimento tecnológico é de total relevância. A geração de energia limpa e renovável cada vez mais é tema de inúmeras pesquisas e incentivos governamentais. Esse conceito consiste em converter energia disponível no ambiente (solar, eólica, ondas, vibração, etc.) em energia elétrica. A conversão de vibrações mecânicas em energia elétrica é uma das formas amplamente estudadas com a utilização de elementos piezelétricos. (SODANO, *et al*., 2004; INMAN, *et al*., 2005; AJITSARIA, *et al*., 2006; COOK-CHENNAULT, *et al*., 2008; TRIPLETT, 2008).

Os materiais piezelétricos, quando submetidos a uma deformação mecânica, sofrem um processo de reorientação dos dipolos elétricos no interior do material, o que gera uma diferença de potencial, diretamente proporcional à deformação sofrida. Este fenômeno ficou conhecido como efeito piezelétrico direto. De modo contrário, quando um campo elétrico é aplicado nestes materiais, é possível obter deformação mecânica - efeito piezelétrico reverso. O titanato de bário, quartzo e o sal de Rochelle são alguns cristais que apresentam efeitos piezelétricos naturais. O crescimento no número de aplicações na indústria ocorreu a partir do desenvolvimento de materiais piezelétricos sintéticos. Os materiais piezelétricos podem ser divididos em dois grupos: piezocerâmicas e piezopolímeros. A piezocerâmica mais usada na construção de atuadores é o Titanato zirconato de chumbo (PZT) e o piezopolímero é o PVDF ou Polifluoreto de vinilideno (TOIT, 2005; LEO, 2007). O desenvolvimento destes novos materiais piezelétricos vem contribuindo com diversos avanços tecnológicos na engenharia em geral, como o desenvolvimento de sensores, atuadores e conversores de energia vibracional em energia elétrica mais eficientes. (LEO, 2007; ANTON, *et al*., 2007; COOK-CHENNAULT, *et al*., 2008; ERTRUK, *et al*., 2011)

Uma das formas mais utilizadas para estes dispositivos geradores de energia a partir de piezelétricos são as vigas engastadas-livres, conhecidas como "*cantilever beam*" submetidas a uma fonte de excitação mecânica (ANTON, et al., 2007; MINETO, 2013). Estes dispositivos são eficientes quando excitados com frequências próximas da frequência natural do sistema. Logo, quando ocorre o desvio desta frequência de excitação, a potência gerada é drasticamente reduzida. Além disso, excitações aleatórias, devem ser levadas em consideração nas análises desenvolvidas, uma vez que estas perturbações são normalmente observadas na natureza (INMAN, *et al*., 2005; TANG, *et al*., 2010; SILVA, *et al*., 2015).

Muitos esforços têm sido empregados para aumentar a faixa de frequência de operação destes dispositivos. A adição de imãs magnéticos a uma viga piezelástica pode introduzir não-linearidades mecânicas que aumentam a faixa de operação do dispositivo (ERTURK, *et al*., 2009;

STANTON, *et al*., 2009; STANTON, *et al*., 2010). Outro tipo de sistema não-linear pode ser obtido com o uso sinergético de materiais inteligentes, como por exemplo as ligas com memória de forma (SILVA, *et al*., 2015).

Ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) são ligas metálicas com a capacidade de, após experimentarem uma deformação associada a um processo de transformação de fase induzida por carregamento mecânico, retornar à sua forma inicial, quando submetidas a uma variação de temperatura. Este comportamento termomecânico é chamado de Efeito Memória de Forma (FERNANDES, 2006) e está associado à presença de duas fases: austenita (estável em altas temperaturas) e martensita (estável a baixas temperaturas). Outro fenômeno em destaque nestas ligas é a pseudoelasticidade. Este comportamento consiste no desenvolvimento de grandes deformações (da ordem de 10%) associadas ao processo de transformação de fase da microestrutura (Austenita → Martensita, Martensita → Austenita) do material promovida por um carregamento mecânico que é recuperável após a remoção do mesmo. Quando removido o carregamento, o material retoma sua fase inicial. O processo de transformação de fase ocorre em um elemento de associado ao efeito memória de forma ou ao efeito pseudoelástico promove a mudança do módulo de elasticidade do material, e, consequentemente, sua rigidez (LAGOUDAS, 2008; AGUIAR, 2011; AGUIAR, *et al*., 2012; da HORA, *et al*., 2013; LESTER, *et al*., 2015). A mudança de rigidez e os efeitos histeréticos provenientes das transformações de fase sofridas pelas *SMAs* permitem que o sistema possa ser sintonizado em uma banda larga de frequência com a alteração da temperatura do elemento SMA (SILVA, *et al*., 2015).

Com o intuito de analisar como se comporta o uso sinérgico de dois materiais inteligentes, montou-se um experimento envolvendo um elemento piezelétrico comercial acoplado a uma viga de alumínio e engastada a um equipamento de excitação eletromecânico (*shaker*) em uma de suas extremidades. Três configurações são consideradas em relação à outra extremidade da viga: livre para vibrar, acoplada a uma mola linear e acoplada a uma mola de SMA, esta última foi submetida a diferentes temperaturas obtidas através do efeito Joule. Foram realizados testes para avaliar o comportamento do sistema em diferentes condições de vibração e temperatura.

Este trabalho se apoia basicamente em dois comportamentos principais: O efeito piezelétrico direto e os efeitos encontrados nas ligas com memória de forma. Inicialmente, apresenta-se uma revisão bibliográfica envolvendo alguns dos principais trabalhos publicados de modo a fornecer base teórica para avaliar a viabilidade do experimento. Continuando, apresenta-se os respectivos efeitos com mais detalhes através de uma fundamentação teórica. Em seguida, apresenta-se o aparato experimental utilizado, a montagem do experimento da dissertação, sua execução e resultados iniciais. Logo após, os resultados experimentais são mostrados comparando a variação da frequência de ressonância do sistema através da adição de três molas helicoidais

de aço, e posteriormente, duas molas helicoidais de *SMA*. Por fim, apresentam-se as conclusões do trabalho sobre o comportamento de um elemento piezelétrico conectado a um elemento com memória de forma e como esta configuração pode ser empregada na geração de energia elétrica. Os resultados experimentais também são comparados com resultados numéricos anteriormente publicados por outros autores.

II - Revisão Bibliográfica

O conceito de geração de energia (*energy harvesting*) é muito abrangente. Basicamente, o que muitos autores compreendem como *energy harvesting* é a conversão de algum tipo de energia disponível no ambiente em energia elétrica de forma a ser armazenada para uso em outro dispositivo. A ideia de gerar aparelhos autossuficientes e cada vez mais portáteis e práticos tem induzido o desenvolvimento de diversas pesquisas ao longo dos últimos anos. Com isso, os materiais piezelétricos surgiram como bons candidatos para geração de energia limpa e renovável através de vibrações mecânicas (SODANO, *et al.*, 2004; TOIT, 2005; ANTON, *et al.*, 2007; LEO, 2007; ERTRUK, 2009; ERTURK, *et al.*, 2011; MINETO, 2013.

Conforme explica ERTURK *et al.*, (2011), o emprego de *energy harvesting* utilizando materiais piezelétricos requer os seguintes passos: (1) Identificação dos parâmetros importantes das vibrações mecânicas do meio ambiente, como a amplitude e faixa de frequência; (2) desenvolvimento de um dispositivo utilizando materiais piezelétricos para conversão de energia mecânica em elétrica; (3) desenvolvimento de um circuito que possua um conversor AC/DC e um regulador de tensão para armazenamento da energia através de capacitores ou baterias, para que no fim seja empregado na alimentação de dispositivos eletrônicos de baixa potência. O esquema das etapas citadas acima pode ser visto na Figura II.1

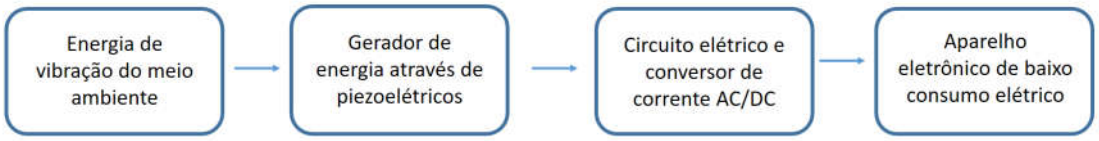


Figura II.1 - Esquema representativo de um gerador piezelétrico de energia a partir de vibrações mecânicas (ERTRUK, et al., 2011).

Com o desenvolvimento de dispositivos que necessitam ser auto recarregáveis e o desejo de melhorar seus desempenhos e manutenção, o estudo de geração de energia a partir de elementos piezelétricos submetidas a carregamentos vibracionais experimentou uma significativa evolução ao longo dos últimos 15 anos. Diversos trabalhos foram publicados com foco em diversos campos como: modelos analíticos e numéricos, lineares e não-lineares, experimentos para geração de energia, aplicações de elementos piezelétricos em dispositivos utilizados no dia-a-dia e muitos outros (ROUNDY, *et al.*, 2004; SODANO, *et al.*, 2004; TOIT, *et al.*, 2006; ERTURK, *et al.*, 2009).

De acordo com o tema desta dissertação, neste capítulo são apresentados alguns dos principais trabalhos publicados sobre a geração de energia utilizando elementos piezelétricos, e o controle da faixa operacional de um dispositivo em vibrações aleatórias.

II.1 Geradores de Energia Piezelétricos Lineares

Os estudos de materiais piezelétricos tiveram início com os irmãos Pierre e Jacques Curie na França, em 1880. O trabalho dos Curie demonstrou o que se denominou efeito piezelétrico direto. Isto consiste em, a partir de uma deformação mecânica, o material apresentar uma diferença de potencial elétrico em suas extremidades. Um ano depois, em 1881, foi deduzido matematicamente a partir de princípios fundamentais da termodinâmica por Gabriel Lippmann que o efeito contrário também era possível. Assim, pode-se aplicar um campo elétrico ao material para obter-se uma deformação mecânica. Este fenômeno foi denominado efeito piezelétrico inverso ou indireto. Entretanto, no final do século XIX e no início do século XX, as amostras piezelétricas extraídas da natureza não apresentavam efeitos associados ao acoplamento eletromecânico suficientemente elevados para tornar atrativa a sua aplicação. Somente a partir da segunda metade do século passado é que cientistas ingleses foram capazes de produzir artificialmente em laboratórios amostras com maiores valores associados ao acoplamento eletromecânico. Este fator, em conjunto com o desenvolvimento da indústria eletrônica, o que levou a o surgimento de dispositivos com baixa necessidade de energia para seu funcionamento, permitiu que os materiais piezelétricos passassem a ter uma maior aplicabilidade na indústria, tornando-se alvos de pesquisas e trabalhos acadêmicos. Exemplos de piezelétricos mais comumente disponíveis no mercado são: Cristais de Quartzo, Turmalina, Oxido de Zinco, PZT (Titanato Zirconato de Chumbo), PVDF (polifluoreto de vinilideno). A partir dos anos 2000, com o uso mais acentuado de sensores, transdutores e dispositivos wireless, o uso de piezelétricos para geração de energia experimentou um grande avanço. (TOIT, 2005; LEO, 2007; ERTURK, 2009; ERTURK, *et al*., 2011).

A ideia de conversão de vibrações mecânicas em eletricidade surgiu inicialmente em um artigo de WILLIAMS *et al*., (1996). Os autores projetaram um transdutor básico e desenvolveram um modelo analítico para simular a quantidade de potência gerada por um determinado piezelétrico quando submetido a vibrações de base por um *shaker*. Outros autores apresentaram pesquisas desenvolvidas na década seguinte sobre geração de energia envolvendo diversas abordagens: BEEBY *et al*., (2006), deram ênfase à utilização de elementos eletrostáticos, MITCHESON *et al*., (2004) os eletromagnéticos, WANG *et al*., (2008), aos elementos magnetoestritivos, enquanto ERTURK *et al*., (2009), elementos piezelétricos.

COOK-CHENNAULT *et al*., (2008) comparam o número de publicações de alguns tipos de geração de energia não renovável e renovável, em um trabalho que dá ênfase em dispositivos com materiais piezelétricos. Os autores classificam como fonte de energia não renovável: baterias de celulares, outros dispositivos eletrônicos, turbinas, motores de combustão interna e micro células de combustível. Os meios de se obter energia renovável, destacados pelos autores são: painéis solares, energia termoelétrica e geração de energia através de vibrações. Observa-se pela Figura II.2 que a maior ênfase é dada aos piezelétricos devido a esta classe de material cobrir a maior área no gráfico, o qual apresenta a densidade de potência em função da diferença de potencial.

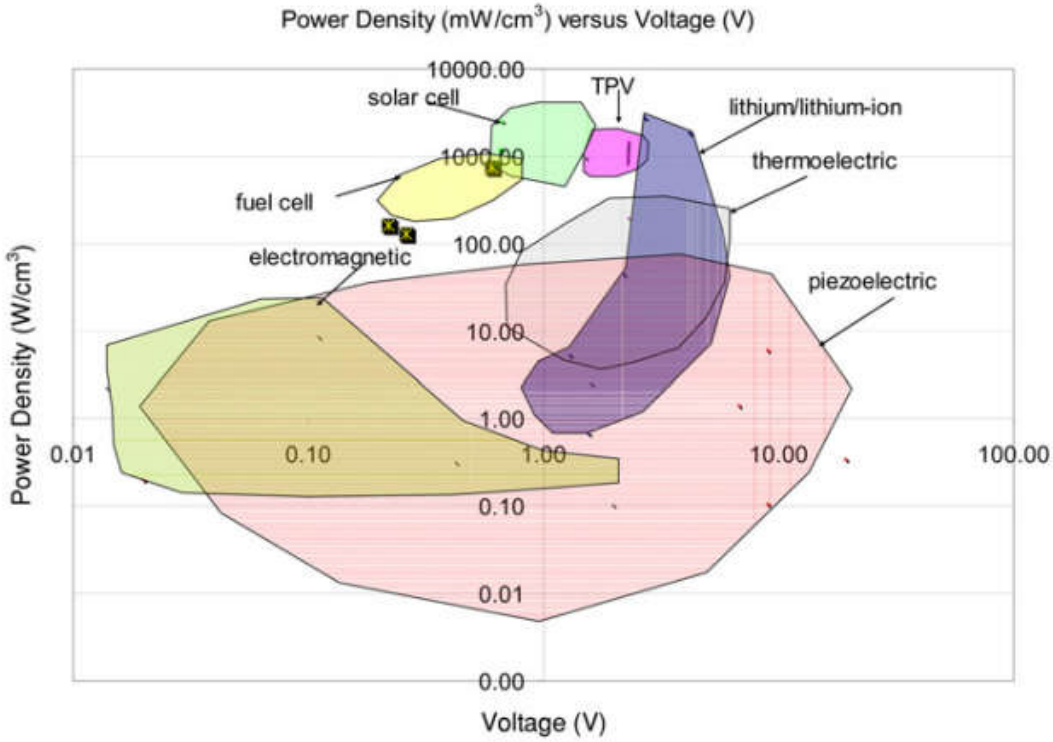


Figura II.2 - Densidade de potência versus diferença de potencial para diferentes formas de geração de energia. (COOK-CHENNAULT, *et al*., 2008)

COOK-CHENNAULT *et al*., (2008) concluíram que embora as fontes de energia não renováveis não sejam as melhores para geração de energia, elas são indispensáveis em alguns casos. Já para as fontes de energia renováveis, os autores destacam que a energia solar obteve um grande progresso nos termos de eficiência, mas o elevado custo e a necessidade de uma área extensa são limitantes significativos. Microdispositivos movidos a energia termoelétrica não apresentam uma opção viável devido à necessidade de altas variações de temperatura. Já os piezelétricos submetidos a vibrações mecânicas foram considerados os dispositivos mais

simples e eficientes entre os estudados, por possuírem geometria simples e serem de pequenas dimensões, de baixo peso e apresentarem uma boa variedade no mercado.

ANTON *et al*., (2007) apresentam um resumo das publicações sobre geração de energia utilizando piezelétricos. O artigo cobre o período de 2003 a 2006 e comenta que outros tipos de tentativas de se obter energia elétrica a partir de recursos do meio ambiente (calor não utilizado, ondas eletromagnéticas, água corrente, vento, sol e outros) também foram empregados. Entretanto, as pesquisas tiveram um maior foco no uso de vibrações mecânicas com piezelétricos devido a sua eficiência para fornecer energia para dispositivos de baixa potência. Neste artigo, os autores citam diversos trabalhos sobre temas como: geração de energia, incluindo o projeto e a eficiência da geometria dos dispositivos, melhoria da eficiência através do circuito elétrico, recarga de fontes de energia como baterias, fluxos do meio ambiente, sensores auto recarregáveis entre outros.

Uma área de pesquisa bem ativa envolve o preparo de experimentos em laboratórios para captação e armazenamento de energia através de piezelétricos. SODANO *et al*., (2004) mostra que uma amostra piezelétrica (*Quick Pack model QP40N* da *Midé Technology Corporation*) é capaz de recarregar uma bateria. SODANO *et al*., (2005) citam que até 2005 os experimentos eram realizados visando melhorar os métodos de se armazenar a energia gerada até um determinado montante capaz de carregar baterias eletrônicas. Então, os autores estudaram três tipos diferentes de amostras piezelétricas para verificar suas respectivas eficiências e capacidade de recarregar uma bateria descarregada. As amostras estudadas foram o PZT, o MFC (*Macro-Fiber Composite*) e o Quick Pack. O principal objetivo desse trabalho foi estudar a eficiência de cada amostra bem como o tempo necessário para cada uma recarregar uma bateria.

Nota-se que o MFC não se apresenta como uma boa opção para geração de energia, pois sua eficiência é baixa comparada aos outros materiais tanto nas condições de ressonância como para vibrações aleatórias. Os resultados para o PZT e o Quick Pack são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Tempo necessário para recarga de baterias elétricas. (SODANO, *et al*., 2005)

	Resonant Charge Time (hours)		Random Signal Charge Time (hours)	
Battery Size (mAh)	PZT	Quick Pack	PZT	Quick Pack
40	1.62	0.75	1.6	7
80	1.2	2.9	2	12.5
200	4	3	1.2	20
300	6	10.8	9.8	22
750	7	8.7	8.6	25
1000	22	>50	32	>50

Através da Tabela 1, aparentemente se conclui que os dois tipos são capazes de recarregar as baterias testadas. Porém, quando se aumenta a capacidade da bateria, o Quick Pack começa a se tornar menos efetivo que o PZT. Adicionalmente, o Quick Pack se mostrou bom quando excitado com frequências próximas a de ressonância, mas novamente torna-se menos eficiente quando se necessita de uma faixa ampla de frequências. Este artigo contribuiu com uma boa referência para seleção e escolha de um determinado material piezelétrico para captação de energia.

SODANO *et al*., (2006) desenvolveram um estudo sobre elementos piezelétricos disponíveis no mercado, analisando as três, mostradas na Figura II.3.

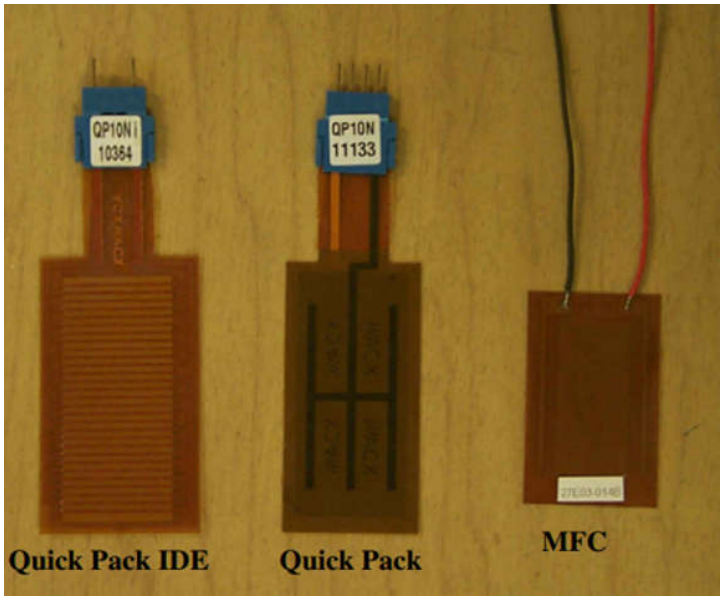


Figura II.3 - Três elementos piezoeléctricos comerciais. (SODANO, *et al*., 2006)

A partir dos dados obtidos, os autores concluíram que dentre os piezelétricos que foram testados, o que apresentou melhor desempenho foi o Quick Pack.

Alguns autores observaram o grande potencial de geração de energia através de piezelétricos utilizando o movimento do corpo humano. GRANSTROM *et al*., (2007) acoplaram um elemento piezelétrico a uma mochila para aproveitar o movimento vertical dos ombros na geração de energia. A Figura II.4 mostra a idealização de como os filmes de PVDF (polímero piezelétrico) podem ser acoplados à alça de uma mochila. A partir do experimento, detectaram que a mochila é capaz de disponibilizar 45,6 mW de potência.

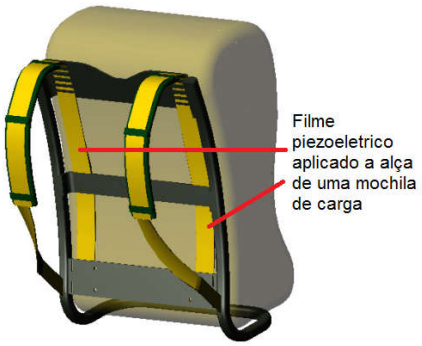


Figura II.4 - Esquema da mochila com filmes piezelétricos acoplados as alças. Adaptado de (GRANSTORM, *et al*., 2007)

Outra ideia simples e barata foi aproveitar o andar do corpo humano como fonte de energia para excitação de elementos piezelétricos. ROCHA *et al*., (2010) montaram um experimento para extrair energia elétrica a partir do caminhar de um ser humano. O experimento consistiu em implementar um polímero piezelétrico na sola de um tênis de prova e captar a energia gerada a partir da deformação que o polímero sofre durante o passo. A Figura II.5 ilustra como o polímero piezelétrico foi acoplado a sola do tênis. Os autores chamam atenção para a necessidade de fenômeno dinâmicos associados a piezeletricidade e por isso os pontos de acoplamento foram selecionados como os de maior carregamento durante o andar.



Figura II.5 - Piezelétrico acoplado a um tênis de passeio para geração de energia elétrica. Adaptado de (ROCHA, *et al*., 2010)

Ainda há uma diferença muito grande entre a magnitude da energia capaz de ser gerada por estes dispositivos e a necessidade real de um aparelho eletrônico portátil. Os autores citam algumas melhorias que podem ser feitas como: aumentar a espessura do elemento piezelétrico,

utilização de filmes com capacidade de melhorar as propriedades eletromecânicas da amostra e adição de mais geradores eletroestáticos.

ERTURK *et al.*, (2009) estudaram uma nova abordagem sobre os piezelétricos destinados a *energy harvesting*. Chamaram atenção para os modelos *"unimorph"* e *"bimorph"*. Como as cerâmicas piezelétricas são frágeis, é necessário a adesão de um substrato de outro material para aumentar a flexibilidade, de modo a permitir que o dispositivo possa fletir. Esses dois modelos piezelétricos diferem basicamente na sua configuração geométrica: o *unimop*h possui apenas uma camada piezelétrica e uma de substrato enquanto que o *bimorph* possui duas camadas piezelétricas e uma de substrato. Nesse artigo, foi desenvolvido um modelo analítico no regime linear, que foi posteriormente comparado com um experimento onde um piezelétrico *bimorph* se comporta como uma viga excitada pela base com uma massa depositada em sua extremidade livre (*cantlever beam-tip mass*). Ficou constatado que o modelo conseguia prever com boa precisão os resultados experimentais. Foi comprovada a eficiência do modelo analítico que apresenta resultados próximos aos obtidos no experimento para o primeiro modo de vibração.

Mais recentemente foi testado de outra forma uma amostra piezelétrica implementada na sola de um tênis. XIE *et al.*, (2014) levaram em consideração que uma melhor configuração das placas piezelétricas deveria levar em conta o esforço de flexão e não de compressão como um passo normalmente fornece. Para isso, utilizaram o dispositivo mostrado na Figura II.6, capaz de transmitir o esforço vertical de um passo em um esforço de flexão das placas de PZT, proporcionando assim maiores deformações e mais energia gerada.

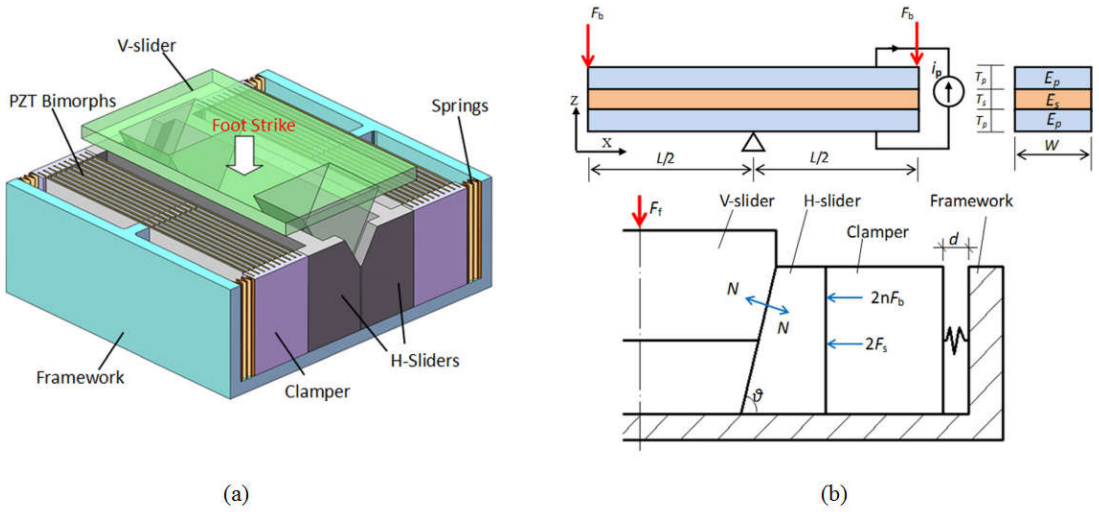


Figura II.6 - (a) Dispositivo piezelétrico gerador de energia. Inclui: um amplificador (V-slider, H-sliders, and clamper), PZTs Bimorphs e outros aparatos. (b) Análise de forças do dispositivo. Adaptado de (XIE, *et al.*, 2014)

Basicamente todos os aparelhos eletrônicos biocompatíveis que são implantados no interior do corpo humano utilizam uma bateria para seu funcionamento. Com isso, os pacientes são submetidos a cirurgias periódicas para troca de bateria ou para a manutenção destes aparelhos, tais como monitores de frequência cardíaca, marca-passo e estimuladores neurais. Baseado nesse conceito, DAGDEVIREN *et al*., (2014) desenvolveram experimentos onde conseguiram armazenar energia elétrica a partir da vibração de órgãos de animais. A Figura II.7 mostra o dispositivo implementado no coração de um bovino. Uma alternativa foi analisar o diafragma que também apresenta grandes deformações no processo de contração e expansão. Os resultados mostraram que relativamente os órgãos bovinos produzem bons valores de tensão quando comparados com ovinos. A partir deste trabalho, e de outros já citados, nota-se que um piezelétrico é capaz de funcionar como gerador de energia em diferentes partes do corpo.

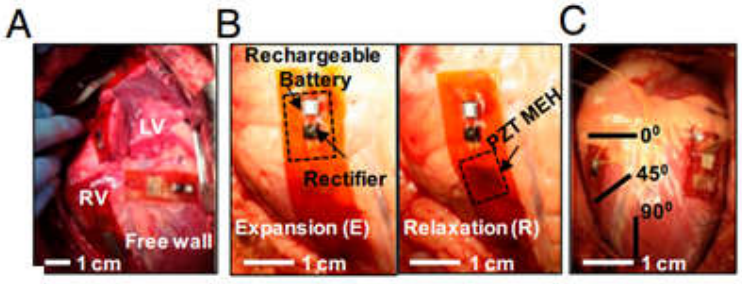


Figura II.7 - Testes feitos com organismos vivos para extração de energia elétrica a partir de amostras piezelétricas. (a) PZT acoplado ao ventrículo direito e esquerdo de um bovino; (b) Dispositivo completo com bateria recarregável durante expansão e contração do coração de um bobino; (c) PZT orientado em 0º, 45º e 90º. (DAGDEVIREN, *et al*., 2014)

Os materiais piezelétricos também estão sendo aplicados na indústria. VIEIRA *et al*., (2010) testaram um experimento para simular os mecanismos de "*flap*" da asa de um aeromodelo. O dispositivo piezelétrico acoplado à asa exerce a função de prover energia elétrica, convertendo vibrações aero elásticas. Outros autores desenvolveram um modelo numérico baseado em um método de elementos finitos e realizaram ensaios experimentais para comprovar a capacidade de um elemento piezelétrico gerar energia durante um voo.

Na indústria automobilística, KIM (2014) projetou um gerador de energia a partir da rotação do eixo de um motor de combustão interna. A Figura II.8 mostra como o motor a partir de uma vibração de torção pode ser combinado com uma viga piezelétrica para gerar energia.

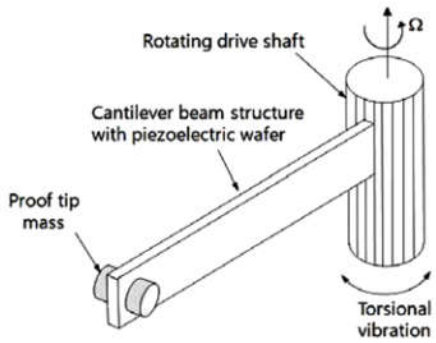


Figura II.8 - Diagrama do gerador de energia de um motor de combustão interna. (KIM, 2014)

ILYAS *et al.*, (2015), utilizaram o impacto causado pelas gotas de água da chuva para excitar uma amostra piezelétrica. Existem regiões do globo com bastante incidência de chuvas fortes durante boa parte do ano. Bangladesh e o norte da Índia são, por exemplo, regiões que todos os anos experimentam 4 meses de monções. Para avaliar a interação entre o elemento piezelétrico e a chuva, os autores testaram a gota caindo a partir do repouso de quatro alturas diferentes em um dispositivo engastado em uma extremidade e livre para vibrar na outra. Os resultados experimentais mostraram que para uma única gota a potência gerada era em torno de 2,5 μW, valor que está de acordo com resultados obtidos por outros autores. Os mesmos mostraram que mesmo com boa previsão dos resultados, ainda há muito que se melhorar na geração de energia, pois, a eficiência total do dispositivo foi medida como sendo 0,12% da energia total disponível na queda de uma gota de água.

Com a evolução das áreas de ciências dos materiais e engenharia, muitos trabalhos passaram a combinar as propriedades de dois tipos de materiais inteligentes diferentes com o propósito de interferir em seus acoplamentos para aumentar a eficiência dos dispositivos. Um trabalho experimental que chamou atenção para o uso de materiais piezelétricos com ligas de memória de forma foi o de ZAKHAROV, *et al.*, (2012). Os autores propuseram dois experimentos: o primeiro experimento, utiliza um compósito híbrido de apenas 0,1 cm³ de material piezelétrico deformável que é capaz de gerar 75 μJ quando submetido a uma variação de temperatura em 60 ºC. O segundo experimento, o *SME/PDE (Shape memory effect/ Direct piezoelectric effect)* (Figura II.9), utiliza energia térmica para deformar um fio de memória de forma que faz fletir uma amostra piezelétrica esbelta na configuração de viga engastada. O volume de material ativo de 0,2 cm³, é capaz de gerar 90 μJ durante a etapa de aquecimento e 60 μJ na etapa de resfriamento considerando-se uma variação de 20ºC.

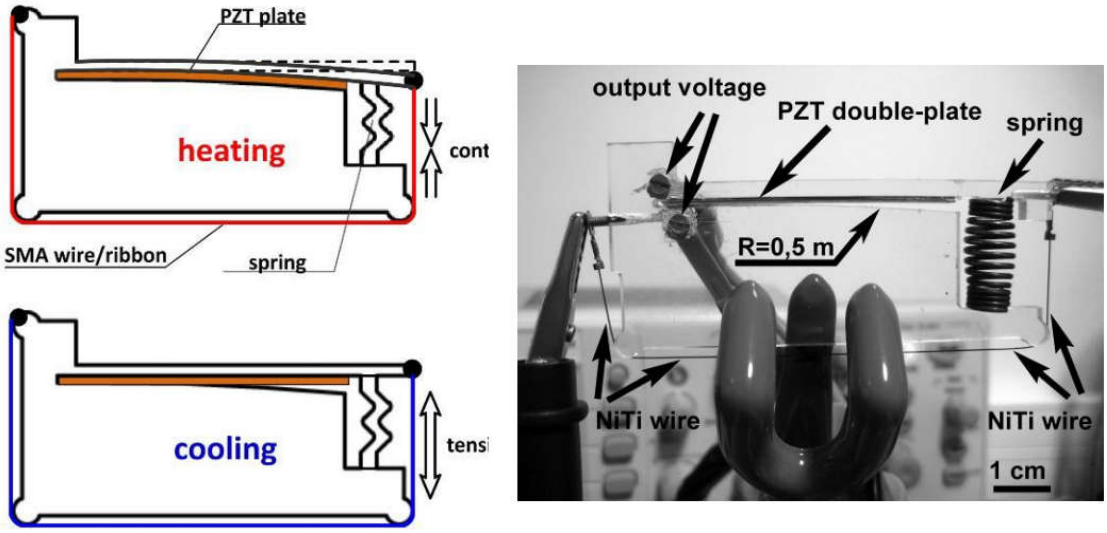


Figura II.9 - Experimento 2 - Efeito memória de forma e efeito piezelétrico direto. Adaptado de (ZAKHAROV, *et al*., 2012)

O acoplamento entre SMAs e piezelétricos abre o caminho para oportunidades de se armazenar energia térmica a partir de recursos naturais. No entanto, a combinação de dois comportamentos acoplados induz novas complexidades, e estudos devem ser realizados com o objetivo de estabelecer condições ótimas de operação.

Os estudos citados até o momento exploram a geração de energia utilizando piezelétricos no regime linear. Nos últimos anos a geração de energia utilizando dispositivos não-lineares tem sido foco de muitas pesquisas na área. A principal vantagem destes dispositivos é permitir a captura de energia em uma faixa mais larga de frequências, conforme é abordado na próxima seção.

II.2 Efeitos Não lineares na Geração de Energia através de Elementos Piezelétricos

Os efeitos não-lineares presentes na geração de energia podem ser separados em duas classes: efeitos constitutivos e mecânicos (geométricos) relacionados a grandes deslocamentos. O primeiro se refere à descrição do acoplamento eletromecânico e o segundo a mudança de forma (geometria) dos componentes. A maioria dos autores faz uso de modelos lineares para descrever o acoplamento eletromecânico destes materiais. Como resultado desta aproximação, estimativas imprecisas de potência gerada são comuns quando comparadas com resultados experimentais (KIM, *et al*., 2010). O desenvolvimento de modelos não-lineares para prever a

potência gerada pelos materiais piezelétricos é um assunto que tem atraido bastante atenção dos pesquisadores, embora ainda se encontre incipente na literatura dado a complexidade do assunto.

A não-linearidade dos piezelétricos foi explorada em CRAWLEY *et al*., (1990) que publicaram um trabalho mostrando que o acoplamento eletromecânico é constante para diferentes valores de deformação de um material piezelétrico. A dependência do acoplamento eletromecânico com a deformação se torna importante no limite de altas deformações (ressonância). Este efeito ao ser levado em conta melhora a correlação numérico-experimental (SILVA, et al., 2015).

HU *et al*., (2006) apresentaram resultados no comportamento de um piezelétrico. Devido ao comportamento não-linear, os autores utilizam da teoria cúbica de gradiente de deslocamento para apresentar uma análise não-linear para geração de energia próximo da ressonância para equações tridimensionais de eletro-elasticidade. A Figura II.10 mostra os resultados obtidos para frequências próximas da ressonância. Pode-se notar que há um grande desvio da curva quando as amplitudes de oscilação se tornam relativamente grandes mostrando assim que modelos lineares são limitados a descrever o comportamento de um piezelétrico. No caso da Figura II.10 surge o efeito de endurecimento (*hardening*), quando a curva se inclina para a direita. Oposto ao efeito de amolecimento (*softenig*), quando a curva se inclina para a esquerda.

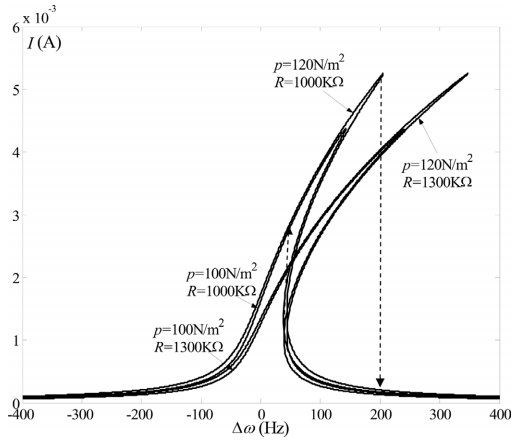


Figura II.10 - Amplitude de corrente elétrica próxima a ressonância. (HU, *et al*., 2006)

Até então foram apresentadas não-linearidades constitutivas presentes nos materiais piezelétricos. Contudo, o acoplamento de elementos mecânicos a um piezelétrico em vibração gera um tipo de não linearidade mecânica. Um exemplo bom sobre não-linearidades mecânicas são os osciladores do tipo Duffing, onde são adicionados dois imãs magnéticos em lados opostoso da viga em balanço (PAIVA, *et al*., 2006; INMAN, *et al*., 2009; de PAULA, *et al*., 2015).

BAI *et al*., (2014) mostraram como uma viga *bimorph*, que massas assimétricas são capazes de introduzir não-linearidades mecânicas e comportamento histerético em um gerador de energia piezelétrico. NGUYEN *et al*., (2013) mostraram resultados sobre um dispositivo piezelétrico com molas curvadas os quais operam em uma faixa de frequência maior que dispositivos convencionais. Conclui-se que com esta contribuição, pode-se gerar dispositivos adaptáveis a uma variedade maior de frequencias de operação.

SILVA *et al*., (2015) idealizaram um dispositivo para geração de energia elétrica fazendo o uso combinado de materiais inteligentes. Para isso, uniram um elemento piezelétrico e um elemento de liga de memória de forma. É possível assim, controlar a rigidez do sistema, uma vez que as ligas com memória de forma podem ter o seu modulo seu módulo de elasticidade devido ao processo de transformação de fase. Além disso efeitos histeréticos associados a dissipação de energia também influenciam o amortecimento do sistema. Desta forma, é possível mudar a frequência natural do sistema e, assim, aumentar a faixa de operação do dispositivo. O trabalho considera um modelo numérico de uma viga em balanço simplificado para um sistema massa-mola-amortecedor-piezelétrico-SMA, como mostra a Figura II.11.

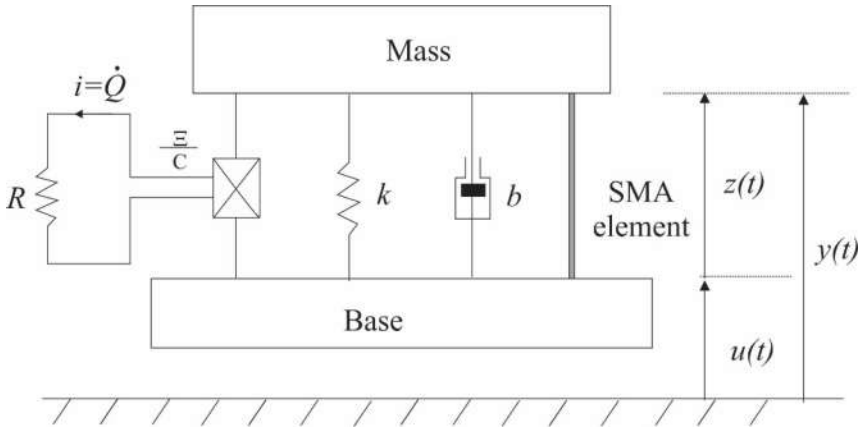


Figura II.11 - Dispositivo para geração de energia envolvendo elemento piezelétrico e memória de forma. (SILVA, et al., 2015)

Os autores utilizam equações de movimento adimensionalizadas, considerando diferentes valores de vibração de base (ζ) e diferentes temperaturas (*T*). Inicialmente, pequenos valores de vibração da base (ζ) foram implementados de forma a não ocorrer transformação de fase induzida por tensão no elemento com memória de forma (amplitude de vibração da base adimensional ζ =0,001). A Figura II.12 mostra diferentes curvas para o sistema utilizado, obtidos aumentando-se gradativamente a temperatura do elemento com memória de forma.

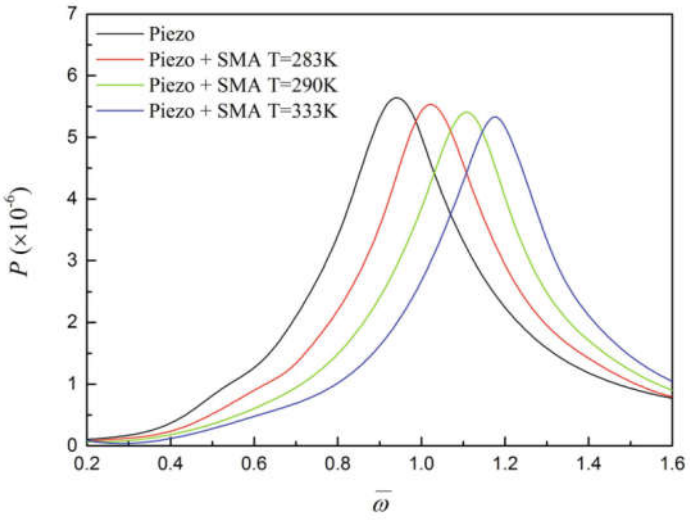


Figura II.12 - Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura (ζ = 0,001). (SILVA, et al., 2015)

É perceptível que a adição de um elemento com SMA tende a atenuar a amplitude de vibração diminuindo a potência máxima gerada. No entanto, a incorporação do elemento de SMA permite alterar o a frequência de ressonância do sistema.

Em seguida, foi estudada a situação para a qual aumentou-se razoavelmente os níveis de vibrações da base de forma a promover transformações de fase incompletas no material com memória de forma induzida por tensão (ζ=0,005). A Figura II.13 (a) mostra que devido ao aumento da amplitude de vibração da base o elemento com memória de forma tende a atenuar a vibração devido a seu laço de histerese. Contudo, com o aquecimento do elemento de SMA, há um novo aumento da potência gerada devido a uma redução do laço de histerese do elemento. Com o aumento da temperatura, as tensões críticas de transformação de fase aumentam tornando os ciclos de histerese cada vez menores, diminuindo a dissipação, até um momento em que o elemento de SMA trabalhar no regime elástico na fase austenítica, uma vez que a tensão crítica de início da transformação assume um valor muito além do carregamento em que o elemento está sendo submetido, ver Figura II.13 (b).

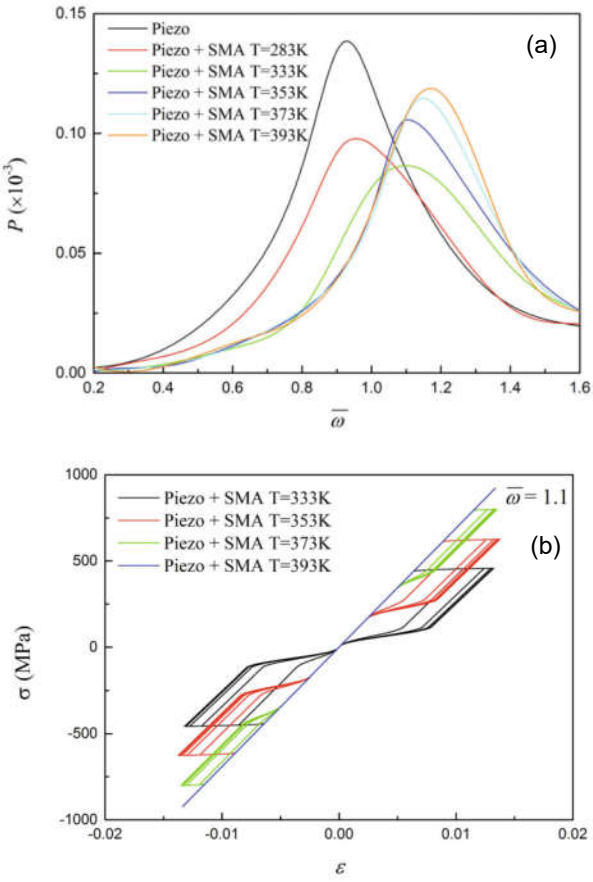


Figura II.13- (a) Potência máxima gerada versus frequência de oscilação. Comparação de um modelo apenas com elemento piezelétrico e outros com memória de forma variando a temperatura (ζ=0,005). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizado ($\bar{\omega}$). (SILVA, et al., 2015)

Aumentando ainda mais a amplitude de vibração da base (ζ = 0,025), o sistema apresenta resultados que tendem a ser próximos para altas e baixas temperaturas. Os picos máximos de potência gerada são similares e os seus deslocamentos praticamente desaparecem. A Figura II.14 (a) mostra as curvas para diferentes temperaturas. Estes resultados podem ser explicados observando a Figura II.14 (b), uma vez que as transformações são quase completas para todas as temperaturas implementadas, os ciclos de histerese possuem áreas similares causando dissipação semelhantes, além disso os valores de rigidez também variam pouco.

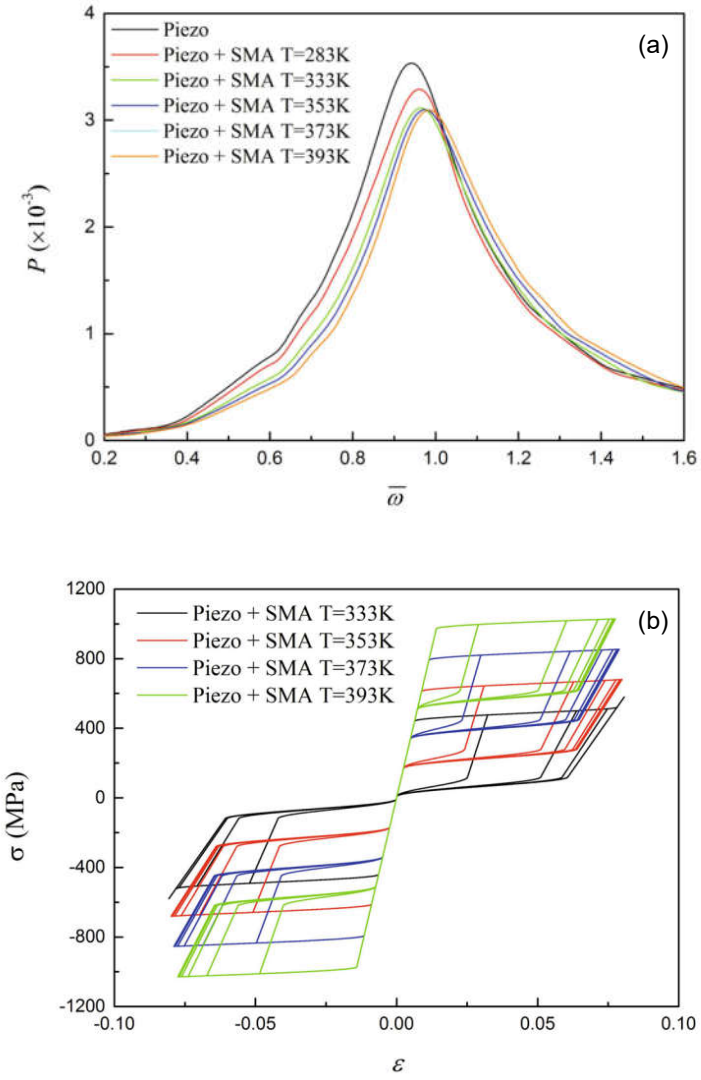


Figura II.14- (a) Potência máxima gerada versus frequência. Comparação entre o modelo clássico e modelos com SMA para diferentes temperaturas (ζ = 0.025). (b) Curvas tensão-deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angulas adimensinalizado (). (SILVA, et al., 2015)

Nesse caso, a variação de temperatura tem uma baixa influência nos resultados quando os níveis de vibrações da base são relativamente altos.

Fica então clara a necessidade de uma análise detalhada sobre o acoplamento dos fenômenos piezelétrico e de memória de forma para que seja possível desenvolver modelos precisos e eficientes. A inserção de materiais inteligentes na indústria pode abrir campos de grande economia de energia.

III - Fundamentação Teórica

III.1 Materiais Piezelétricos

Materiais piezelétricos são classificados dentro do grupo de materiais inteligentes que possuem algum tipo de acoplamento entre domínios físicos distintos. Isto quer dizer que, através de algum estímulo em algum domínio físico, o material responde apresentando uma resposta em outro domínio físico. Os materiais piezelétricos possuem acoplamento eletromecânico. Outro exemplo de materiais inteligentes são as ligas com memória de forma. Estas possuem um acoplamento termomecânico. Assim, quando sofrem um carregamento termomecânico, respondem com uma deformação mecânica, mudando sua forma atual para uma forma previamente experimentada pelo material. A Figura III.1 mostra a interação dos domínios (acoplamento) elétrico e mecânico e térmico e mecânico. Outros exemplos de materiais inteligentes são polímeros eletroativos, fluidos magnetos reológicos e outros (LEO, 2007). Este trabalho se propõe a estudar o uso sinérgico e a interação entre um material piezelétrico e outro com memória de forma.

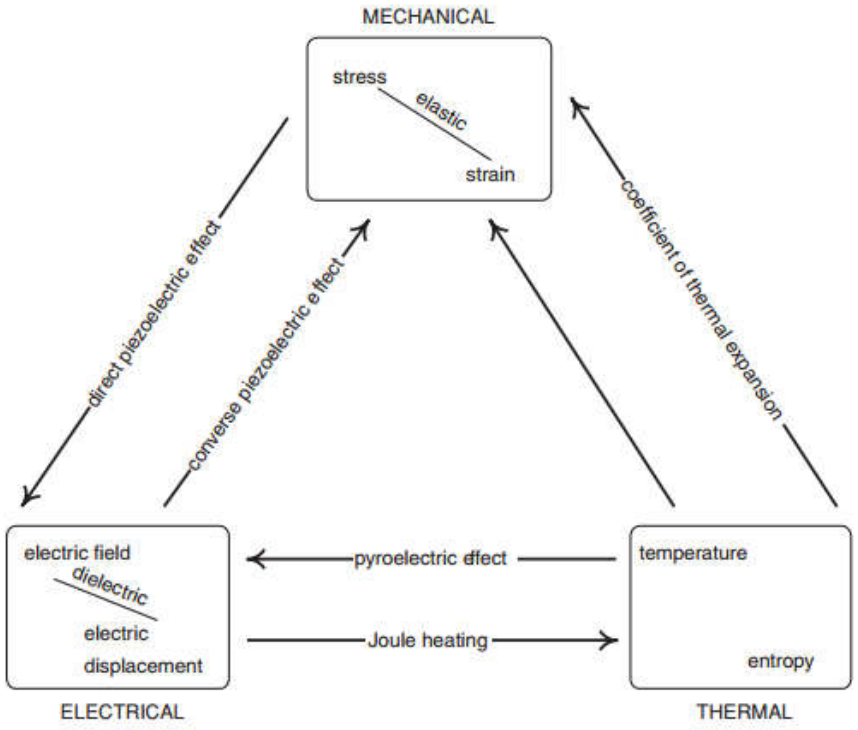


Figura III.1 - Acoplamentos de domínios físicos em materiais inteligentes. (LEO, 2007)

Os materiais piezelétricos sob carregamento mecânico geram cargas elétricas em sua superfície. Este fenômeno, descoberto em 1880 pelos Curies, foi denominado efeito piezelétrico e é reversível, ou seja, com a aplicação de um campo elétrico é possível obter deformação do material. Cristais de quartzo, turmalina, sal de Rochelle, topázio, etc. exibem efeito piezelétrico em seu estado natural. Existem materiais piezelétricos sintéticos, isto é, que não exibem o efeito piezelétrico no estado natural. Estes materiais passam por um processo denominado polarização (*poling*) para adquirirem uma característica piezelétrica. Pode-se citar como exemplos o titanato-zirconato de chumbo (PZT), titanato de chumbo (PbTiO2), zirconato de chumbo (PbZrO3) e titanato de bário (BaTiO3).

O processo de polarização consiste em elevar a temperatura do material acima da temperatura de Curie (temperatura de despolarização do material) e aplica-se um forte campo elétrico na direção em que se quer polarizar. O material é então resfriado e retira-se o campo elétrico. Desta forma, parte dos dipolos ficam preferencialmente orientados em uma única direção, o que favorece o acoplamento eletromecânico, Figura III.2. Esta direção é referenciada como a direção de polarização do material (LEO, 2007).

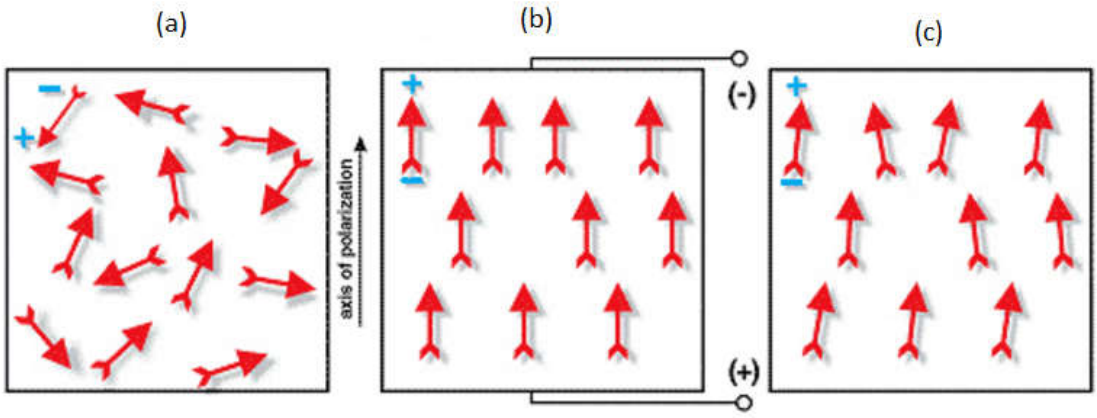


Figura III.2 - (a) Material em temperatura ambiente, (b) Material a temperatura acima da temperatura de Curie com campo elétrico aplicado, (c) Material retorna a temperatura ambiente, sem campo elétrico mas com seus dipolos elétricos reorientados (APC International Ltd, 2011)

Materiais piezelétricos podem operar nos modos direto e inverso. A teoria envolvida no fenômeno de piezeletricidade pode ser descrita pelo acoplamento entre as equações eletromagnéticas e as equações mecânicas dentro de limite elástico. As equações constitutivas para o caso tridimensional são expressas pelas seguintes equações:

$$D_m = d_{mi}T_i + \varepsilon_{mk}^{T}E_k \quad \text{(Efeito direto)} \tag{1}$$

$$S_i = s_{ij}^{E}T_j + d_{mi}E_m \quad \text{(Efeito indireto)} \tag{2}$$

O efeito direto se refere a produção de carga elétrica em resposta a um carregamento mecânico. Já o efeito indireto se refere a geração de deformação mecânica em resposta do campo elétrico aplicado, e S_i, T_i, D_m and E_k são as componentes de deformação, tensão, deslocamento elétrico e campo elétrico, respectivamente. s_{ij}, d_{mi}, ε_{mk} são as componentes das matrizes de flexibilidade elástica, constante piezelétrica e a permissividade do vácuo, respectivamente. Os supera escritos $(\,)^T$ e $(\,)^E$ denotam que a as constantes são medidas sobre condições de tensão e campo elétrico constantes, respectivamente.

Como os piezelétricos são transversalmente isotrópicos e o plano de isotropia é definido como plano 12 (*xy*). Por convenção a direção positiva de polarização (*poling direction*) é usualmente escolhida para ser coincidente com o eixo 3 (direção z) como mostra Figura III.3. Esta direção é estabelecida durante a fabricação do material. Os eixos 1 e 2 são arbitrários e os movimentos de cisalhamento representados por 4, 5 e 6.

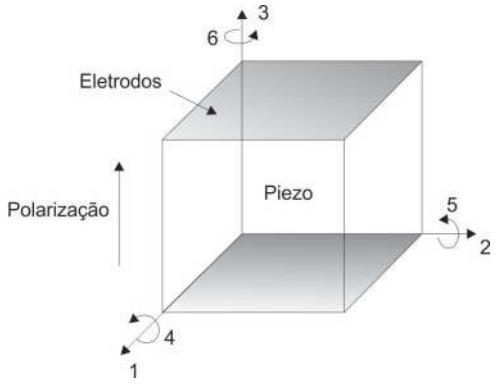


Figura III.3 - Convenção de eixos para um material piezelétrico. (LEO, 2007)

Os modos de operação mais comuns são os modos 33 e 31 e dependem do arranjo de eletrodos. O lado esquerdo da Figura III.4 mostra o modo 33 onde a tensão é aplicada na direção 3 (eixo de polarização) e a carga é coletada na mesma direção. O modo 31, por outro lado, possui tensão aplicada ao longo da direção 1 (perpendicular a direção de polarização) e a carga é coletada na mesma superfície mencionada anteriormente, conforme mostra a Figura III.4 (direita).

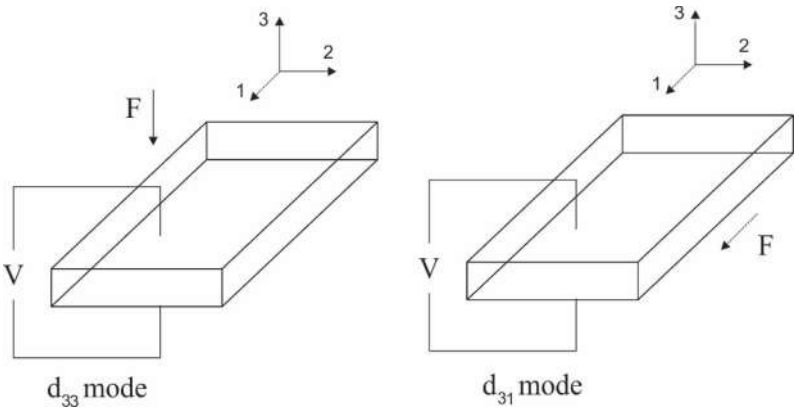


Figura III.4 - Modos de operação de um piezelétrico. (LEO, 2007)

III.2 Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma (*Shape memory alloy* – SMA) começaram a ser alvo de diversas pesquisas e passaram a ter mais aplicabilidade na engenharia a partir de 1963 com o descobrimento das propriedades associadas ao efeito de memória de forma do NiTi (comumente chamado de Nitinol), uma liga de Níquel e Titânio que apresenta acoplamento termomecânico. Outras ligas também apresentam o efeito memória de forma como CuZn, CuAl e NiTiCu. As SMA se enquadram em uma determinada classe de materiais metálicos e inteligentes capaz de retomar a uma forma original mesmo depois de aplicado um carregamento mecânico. Este retorno está diretamente associado a um processo de transformação de fase que envolve o rearranjo dos planos atômicos do material. A transformação de fase pode ser induzida por temperatura ou por tensão. Estas ligas apresentam duas fases que são a austenita, estável a altas temperaturas, e a martensita estável a baixas temperaturas em uma situação livre de carregamento mecânico. Esta última pode apresentar até 24 variantes, no caso da liga NiTi, sendo as variantes conhecidas como martensita maclada (*twinned*) e martensita não-maclada *detwineed*) que são induzidas por temperatura e tensão, respectivamente. (LAGOUDAS, 2008)

A Figura III.5 mostra o resfriamento e aquecimento de uma SMA e a formação da martensita induzida por temperatura sem carregamento mecânico aplicado. Pode-se notar que durante o resfriamento o processo de transformação de fase tem início a partir de uma temperatura crítica (M_s), e se desenvolve até uma temperatura final de transformação M_f. No aquecimento, o processo inverso acontece quando se atinge a temperatura crítica de austenitzação (A_s) até o final da transformação em A_f.

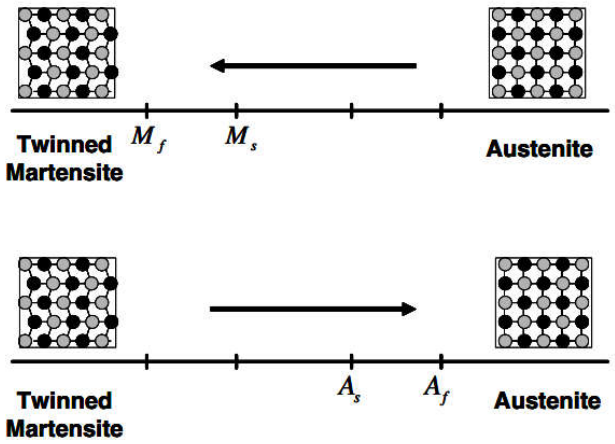


Figura III.5 – Formação da martensita variante martensita maclada (induzida por temperatura). (LAGOUDAS, 2008)

Já a Figura III.6 mostra o que acontece quando se aplica um carregamento mecânico a uma amostra de SMA martensítica resfriada previamente e mantida a uma temperatura constante inferior a M_f. Este processo promove a transformação de martensita maclada para martensita não maclada, através do qual, é possível remover as maclas oriundas de um carregamento térmico prévio. Para isso, é necessário que a tensão aplicada ultrapasse o limite da tensão crítica de início de reorientação (σ_s). A reorientação será completa se atingir a tensão crítica final de reorientação.

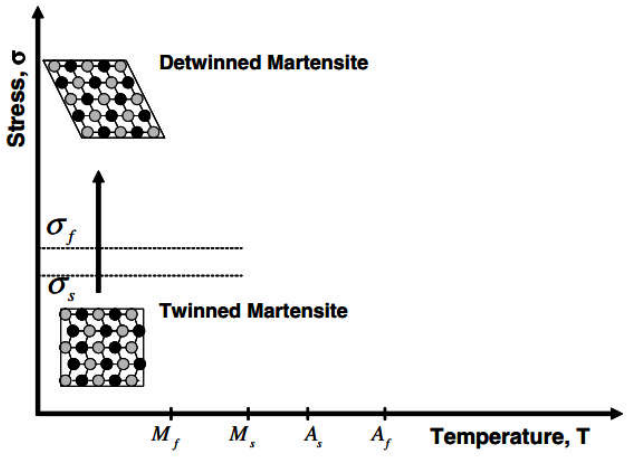


Figura III.6 – Remoção de maclas de uma amostra de SMA resfriada e formação da martensita não-maclada (induzida por tensão) (LAGOUDAS, 2008)

O processo de remoção das maclas acarreta mudança macroscópica na forma da amostra, onde uma deformação resultante continua mesmo após a remoção do carregamento

mecânico. Esta deformação pode ser recuperada com um novo aquecimento retomando assim, à forma original, como mostra a Figura III.7. O resultado deste novo aquecimento subsequente de um resfriamento faz com que o corpo de prova retorne para a variante martensita maclada. Isto dá origem ao fenômeno chamado efeito memória de forma. (LAGOUDAS, 2008)

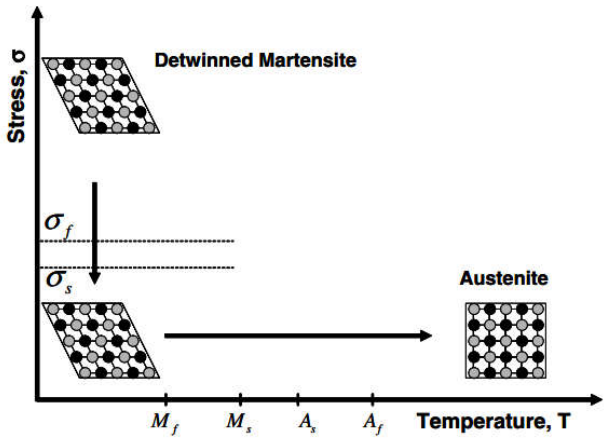


Figura III.7 - Descarregamento e aquecimento de uma liga de SMA. (LAGOUDAS, 2008)

O comportamento das ligas com memória de forma pode variar muito dependendo da temperatura em que se está trabalhando. Uma mesma liga pode apresentar o efeito peseudoelástico e o efeito memória de forma desde que a temperatura de trabalho seja acima de M_f ou abaixo de A_f, respectivamente. O fato que vai determinar o comportamento para uma mesma temperatura é a composição e concentração dos elementos que compõem a liga. (LA CAVA, 1999, LAGOUDAS, 2008)

III.2.1 O Efeito Pseudoelástico

O efeito pseudoelástico ou de superelasticidade pode ser observado durante um processo, a temperatura constante, no qual é aplicado um carregamento mecânico seguido de um descarregamento. Durante a etapa de carregamento mecânico o material experimenta uma transformação de fase de austenita para martensita (induzida por tensão). Na etapa de descarregamento ocorre o processo inverso e o material retorna à sua fase original (austenita) e também a sua forma original. A Figura III.8 mostra um exemplo do comportamento mecânico de uma liga com pseudoelasticidade.

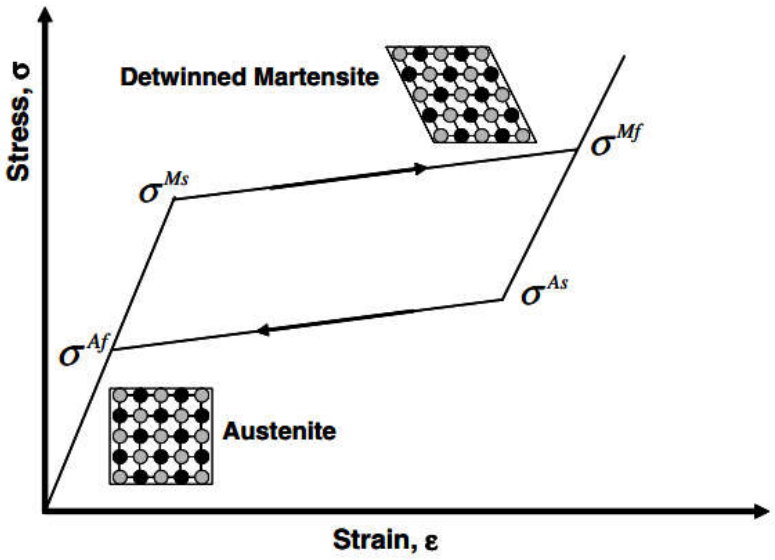


Figura III.8 – Efeito pseudoelástico. Curva tensão deformação durante um carregamento e descarregamento de uma liga de SMA a temperatura constante e abaixo de M_f. (LAGOUDAS, 2008)

Pode-se notar pela Figura III.8 que entre a origem e o ponto σ^{Ms} (tensão crítica de início de formação da martensita não-maclada) o material apresenta um comportamento linear – elástico. Entre o ponto σ^{Ms} e o ponto σ^{Mf} ocorre a transformação total austenita → martensita não-maclada (região não-linear). Esta não-linearidade constitutiva promove uma mudança de rigidez do componente de SMA. *A* partir do ponto σ^{Mf}, a liga apresenta, mais uma vez, um comportamento linear, porém com características mecânicas da martensita formada. No descarregamento, ao atingir σ^{AS}, dá-se o início do processo de transformação inversa, até atingir σ^{Af} e a liga retorna totalmente para fase austenítica. O processo pseudoelástico envolve a formação de laços de histerese, para os quais a área do laço, que se desenvolve entre os pontos de tensão crítica está associada à energia absorvida durante o processo. Isto faz com que as ligas de SMA quando apresentam o fenômeno da pseudoelasticidade possam ser utilizadas como atenuadores de vibrações. (LAGOUDAS, 2008; AGUIAR, 2011; da HORA, *et al*., 2013).

III.2.2 O Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma se divide em dois tipos: O primeiro, chamado de memória de forma de uma via *one way*, é representado na Figura III.9. Este efeito ocorre quando se tem uma amostra martensítica obtida a partir do resfriamento, partindo do ponto *A* para o ponto *B*, com formação de martensita maclada. Semelhantemente ao efeito pseudoelástico, do ponto *B* ao ponto de tensão crítica (σ_s), o material apresenta um comportamento linear-elástico. Porém, de σ_s a σ_f, não há mudança de fase, somente um processo de reorientação associado à

transformação de martensita maclada para martensita não-maclada, onde o comportamento volta a ser linear-elástico (após σ_f). Durante o descarregamento, do ponto *C* ao ponto *D,* observa-se que ainda há uma deformação oriunda do processo. Isto acontece porque a martensita induzida por tensão é estável a essa temperatura. A deformação pode ser recuperada com um aquecimento superior a temperatura de austenitização (de *D* para A, passando pelos pontos *E e F)*. O material ao ser resfriado retorna ao ponto *A*. Resfriando-se novamente a amostra, voltando para o ponto *B*, para o qual tem-se martensita induzida por temperatura (maclada). (FERNANDES, 2006; LAGOUDAS, 2008; PEREIRA, 2009).

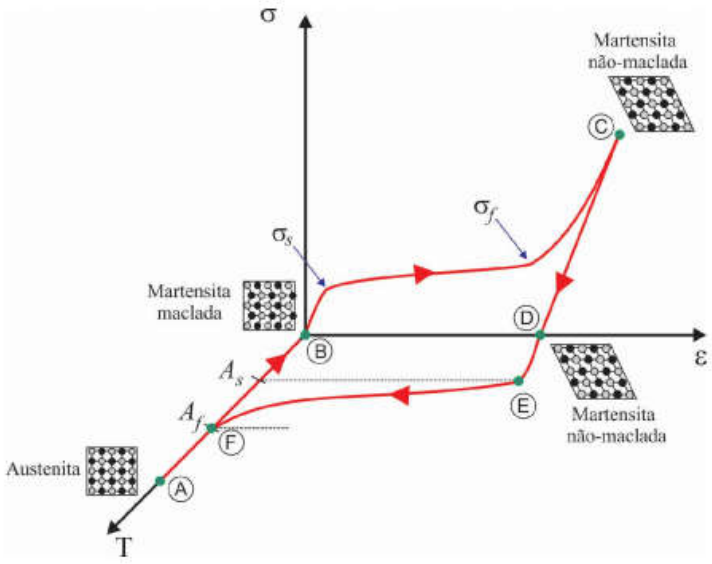


Figura III.9 - Tensão x deformação para o efeito memória de forma (LAGOUDAS, 2008).

O efeito de memória de forma de duas vias (*two way)* pode ser observado na Figura III.10 (a). Este efeito é obtido após submeter uma amostra que apresenta efeito memória de forma de uma via a um treinamento, que consiste em aplicar diversos ciclos temomecânicos, conforme mostrado na Figura III.10 (b). Este processo repetitivo permite atrelar uma forma geométrica macroscópica diferente para cada fase em função da temperatura. Assim, quando o material sofrer uma determinada variação de temperatura, consequentemente sofrerá uma mudança de sua forma também. Deve-se tomar cuidado ao submeter a liga a um processo de treinamento pois isso pode acarretar mudança das temperaturas críticas de transformação de fase, aumento das deformações residuais e também mudança nos laços de histerese. (Aguiar, 2011)

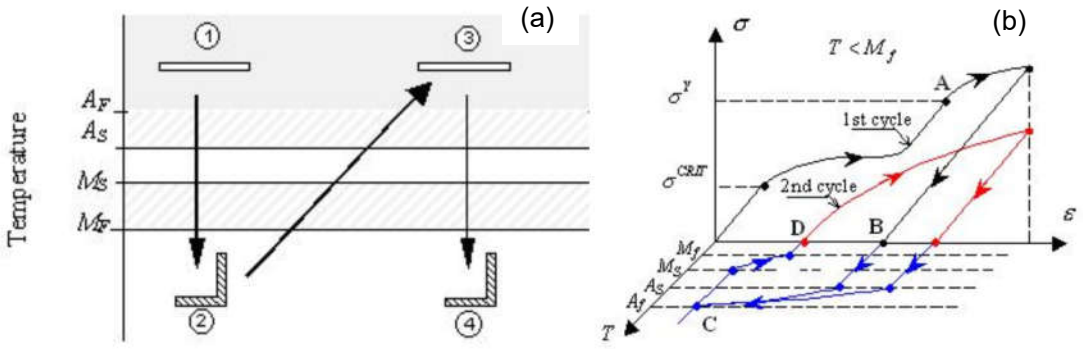


Figura III.10 – (a) Efeito memória de forma two-way e (b) curva tensão x deformação x temperatura. (PAIVA, 2004)

IV - Metodologia e Resultados de Caracterização

Neste capítulo, apresenta-se a metodologia experimental desenvolvida neste trabalho. Com o intuito de avaliar o desempenho e o comportamento de um componente de material piezelétrico acoplado a elementos de ligas com memória de forma, executou-se uma serie de experimentos. Os ensaios experimentais de vibração mecânica do sistema e de caracterização mecânica dos elementos de SMA foram realizados no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico dos Materiais (*LACTM* - CEFET/RJ). Os ensaios para caracterização das temperaturas de transformação dos elementos de SMA foram realizados no Laboratório de Mecânica Não Linear (*MECANON* – UFRJ) e os ensaios de tração no Laboratório de Adesivos e Compósitos (*LADES* – CEFET/RJ).

Os ensaios foram desenvolvidos em quatro etapas envolvendo quatro configurações diferentes, mostradas esquematicamente na Figura IV.1 com o objetivo de analisar as contribuições dos diversos elementos presentes:

1) Viga de alumínio engastada: Os ensaios são realizados com uma viga de alumínio com uma de suas extremidades engastada ao *shaker* e a outra extremidade livre para vibrar.
2) Viga de alumínio engastada com um elemento piezelétrico acoplado: É acoplado um elemento piezelétrico à viga de alumínio.
3) Viga de alumínio engastada com um elemento piezelétrico acoplado e molas de aço: Molas de aço são acopladas uma de cada vez à extremidade anteriormente livre da viga de alumínio substituindo as molas de aço. O elemento piezelétrico continua acoplado a viga de alumínio.
4) Viga de alumínio engastada com um elemento piezelétrico acoplado e molas de SMA: Molas de SMA são acopladas uma de cada vez a extremidade livre da viga de alumínio. O elemento piezelétrico continua acoplado a viga. As molas de SMA são aquecidas por corrente elétrica.

A Figura IV.1 mostra os quatro esquemas montados.

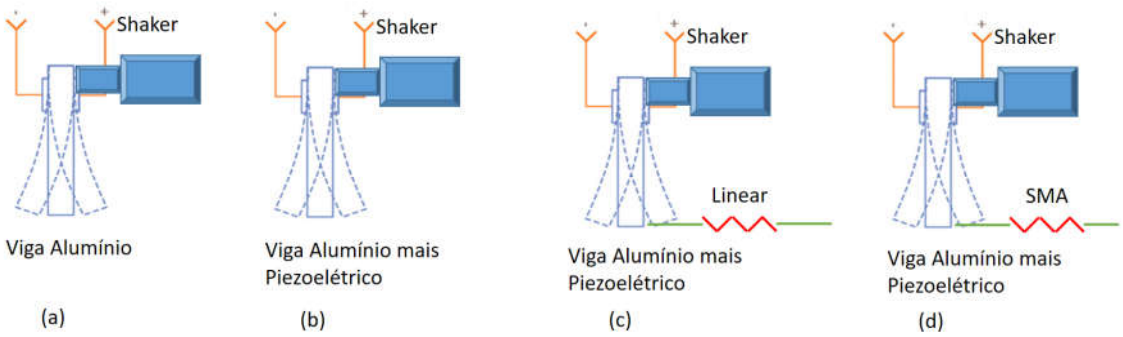


Figura IV.1 - Esquema das 4 configurações de ensaios desenvolvidos. (a) Viga de alumínio (b) Viga de alumínio e piezelétrico. (c) Viga de alumínio e piezelétrico com mola linear. (d) Viga de alumínio com piezelétrico e molas *SMA*.

A Tabela 2 mostra a descrição das configurações utilizadas neste trabalho com a nomenclatura adotada.

Tabela 2 – Nomenclatura adotada para as amostras estudadas

Configuração	**Descrição dos elementos utilizados**
VS (Viga Simples)	Viga de Alumínio
VP (Viga - Piezo)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado
VPM1 (Viga - Piezo - Mola 1)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado e mola de linear 1
VPM2 (Viga - Piezo - Mola 2)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado e mola linear 2
VPM3 (Viga - Piezo - Mola 3)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado e mola linear 3
Mola com efeito memória de forma (Viga - Piezo - Mola SMA)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado e mola de SMA com efeito de memória de forma
Mola Pseudoelástica (Viga - Piezo - Mola SMA)	Viga de Alumínio com o Piezelétrico acoplado e mola fabricada de SMA com efeito pseudoelástico

Para a realização deste trabalho, foram utilizados diversos equipamentos e transdutores, além de elementos como piezelétricos, molas de aço e molas de SMA. A seguir são apresentados os elementos utilizados nos procedimentos experimentais.

IV.1 Equipamento de Excitação de Vibração Mecânica – *Shaker*

Utilizou-se neste trabalho um excitador eletromecânico (*shaker*) encarregado de gerar as excitações externas sobre o sistema em estudo. O modelo utilizado é o V350 da *Data Physics* acoplado a um sistema de controle de vibração da *Cristal Instruments* modelo *Spider 81*. A rosca de fixação da base do *shaker* é do padrão M8. Desta forma, utilizou-se uma barra rosqueada (fuso) de 8 mm de diâmetro para acoplar a viga de alumínio ao *shaker*. A Figura IV.2 mostra o *shaker* V350 e seus sistema de controle de vibrações.



Figura IV.2 – *Shaker* modelo V350 e o sistema de controle de vibrações.

O sistema de controle de vibrações do *shaker* é composto pelo equipamento de controle, um acelerômetro e um computador. O acelerômetro utilizado para conectar o *shaker* ao sistema de controle é da fabricante *Dytran*, modelo *3055D4*.

O software de controle do *shaker* possui a opção de controle senoidal. Os parâmetros adotados nos experimentos desenvolvidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 – Especificações dos parâmetros utilizados nos testes realizados.

Acelerações	Amplitudes máximas constantes e iguais a 2 m/s², 6 m/s² e 9,8 m/s²
Faixa de frequências	De 50 a 100 Hz / 65 a 75 Hz
Forma de varredura	Linear
Taxa de varredura (*sweep ratio*)	1 Hz/s / 0,1 Hz/s

IV.2 Materiais e Equipamento de Geração de Energia

As amostras piezelétricas disponíveis no LACTM foram obtidas através da fabricante *Piezo Systems* modelo Q220-A4-503YB. Segundo o fabricante, o modelo é designado para utilização em geração de energia através de vibração (*vibrations energy harvesting*). A Figura IV.3 mostra o modelo utilizado. Este elemento piezelétrico é composto por uma viga cerâmica piezelétrica do tipo 5A (PiezoSystems, 2016).

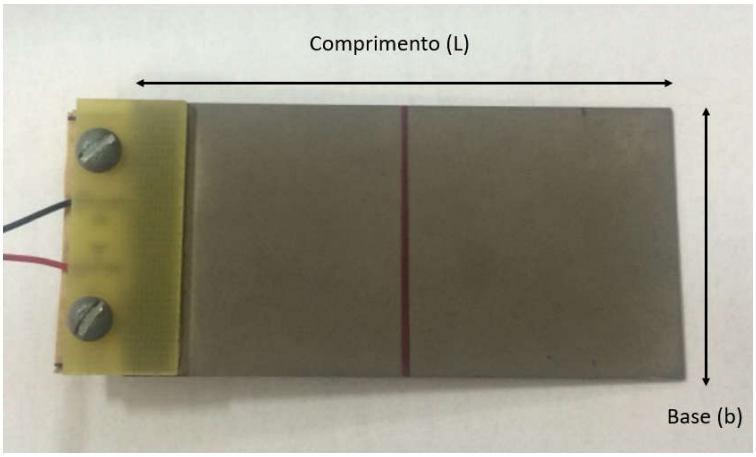


Figura IV.3 - Elemento piezelétrico utilizado. Piezo Systems – Modelo Q220-A4-503YB.

Devido ao curto comprimento do piezelétrico, foi necessário criar uma viga a fim de acopla-lo ao *shaker* e para que na condição de viga engastada *("cantlever beam")* houvesse amplitude suficiente na ponta da viga para produzir uma transformação de fase no elemento de SMA acoplado à viga. Posteriormente a viga foi construída a partir de uma chapa de alumínio e é mostrada acoplada ao *shaker* na Figura IV.4. Já a Figura IV.5 mostra a viga de alumínio

acoplada ao *shaker* com o elemento piezelétrico acoplado a ela. As dimensões do elemento piezelétrico bem como as da viga de alumínio podem são apresentadas na Tabela 4. A viga de alumínio possui um comprimento total de 150 mm, entretanto como há necessidade de acoplá-la ao *shaker* foi feito um furo do tamanho do diâmetro do parafuso (M8) que os une. O furo foi feito no ponto médio em relação a base e a 15 mm de uma das extremidades da viga o que promove um comprimento útil de 135 mm à viga de alumínio.

Tabela 4 – Dimensões do elemento piezelétrico e da viga de alumínio utilizada no experimento.

Elemento / Medidas	L – Comprimento	b – Base	h – Espessura
Piezelétrico	63,5 mm	31,8 mm	0,51 mm
Viga Alumínio	150 / 135 mm	60 mm	2 mm

Na outra extremidade da viga foi acoplado um olhal de metal dobrado, com o intuito de promover a conexão entre a viga de alumínio e a mola. O olhal foi acoplado utilizando uma cola adesiva comercial a base de epóxi. Na configuração envolvendo a mola de SMA, esta é aquecida por Efeito Joule através da aplicação de uma corrente elétrica. A fim de estabelecer um isolamento elétrico entre a mola e a viga de alumínio, de modo a evitar que correntes parasitas possam afetar a tensão elétrica do piezelétrico, foi colocado um revestimento de fita isolante no olhal.

Para ligar a mola a um suporte fixo, utilizou-se uma base magnética de relógio comparador com um fuso acoplado a sua extremidade. Um olhal metálico dobrado semelhante foi soldado ao fuso da base magnética para garantir que não haja interferência de movimento quando a mola estiver sob vibração. Também foi colocado um revestimento de fita isolante para evitar que correntes oriundas de outros equipamentos afetem o comportamento da viga/piezelétrico.

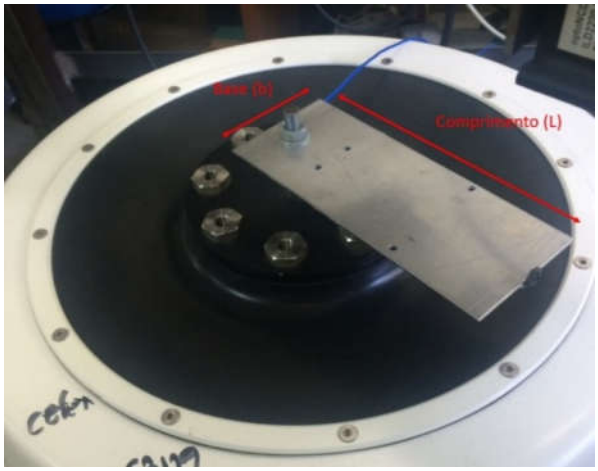


Figura IV.4 – Configuração envolvendo a viga de alumínio engastada ao *shaker*.

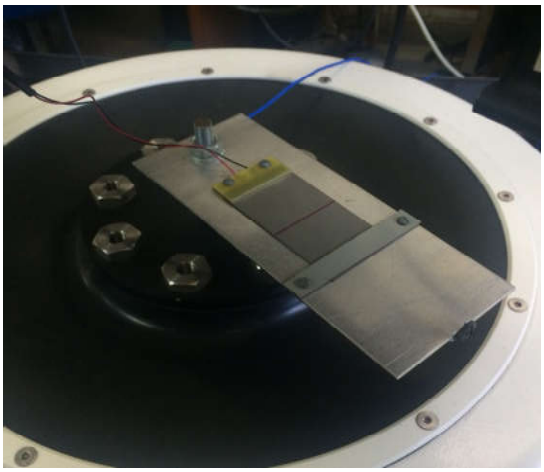


Figura IV.5 – Configuração com o elemento piezelétrico acoplado à viga de alumínio.

IV.3 Equipamento de Aquisição de Dados – *Spider* e Transdutores de Deslocamento

Para aquisição de dados, utilizou-se o sistema *Spider* modelo 600 Hz *Spider8* da *HBM*. Foram utilizados os canais 0, 2, 3 e 4, direcionados para aquisição do tempo, a saída de tensão elétrica do piezelétrico, sensor a laser com precisão de 100 μm, (Laser 2) e um segundo um sensor a laser com precisão de 50 μm (Laser 1) respectivamente da *Micro-Epsilon* (*με*) modelo *optonNCDT 2200*. A Figura IV.6 mostra o painel traseiro do sistema de aquisição de dados com

seus canais e algumas ligações. A taxa de aquisição selecionada no *Spider8* foi de 1200 amostras por segundo.

A resposta do sistema foi acompanhada através de transdutores de deslocamento tipo laser. A Figura IV.7 mostra os transdutores laser utilizados no experimento. O Laser 2 é posicionado para medir o deslocamento na extremidade engastada da viga representando a excitação de base da viga. O Laser 1 é posicionado para medir o deslocamento da extremidade não excitada (livre) da viga.

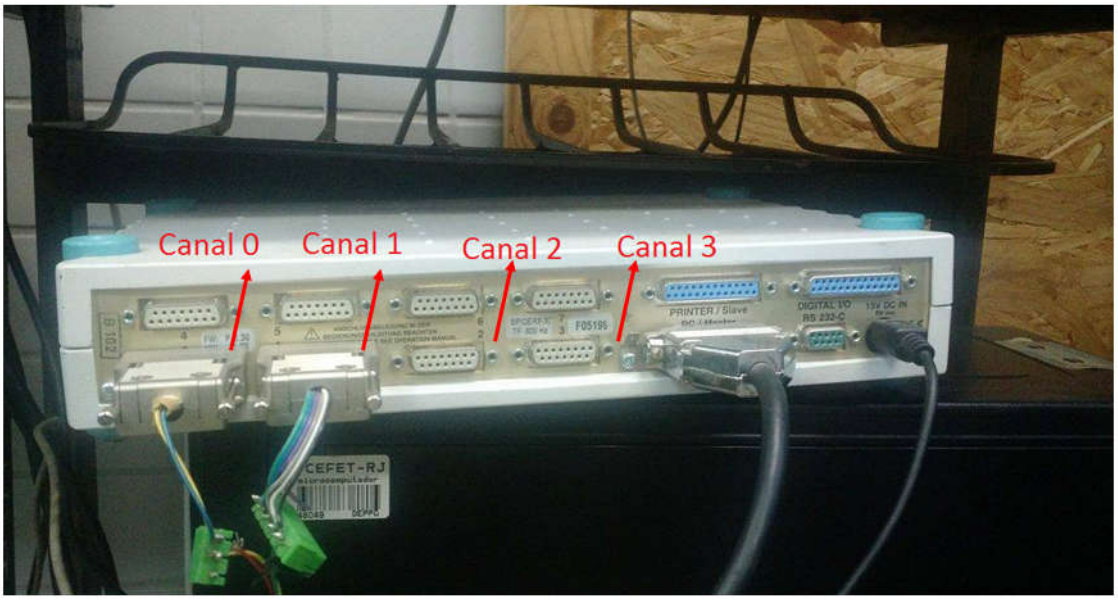


Figura IV.6 – Equipamento de aquisição de dados

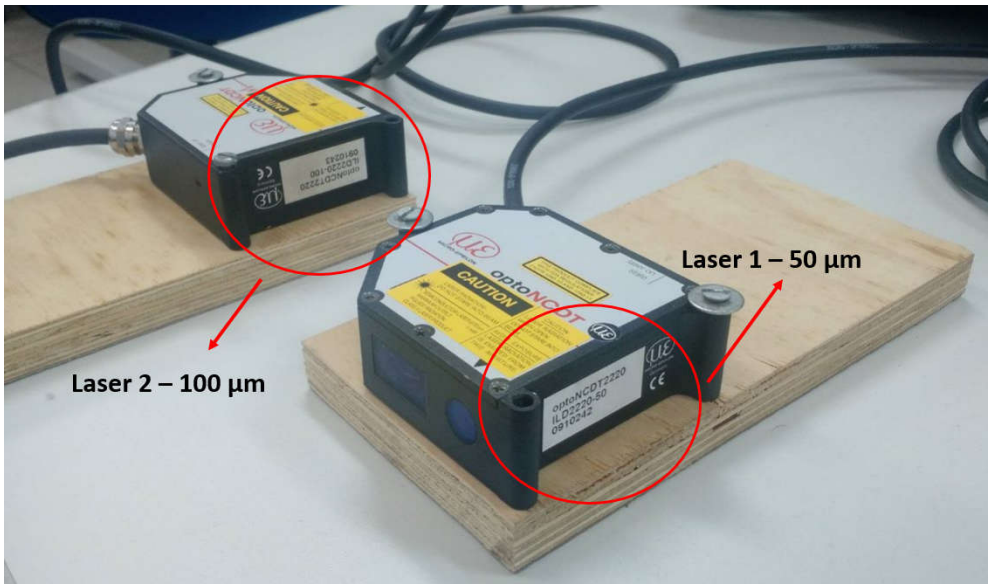


Figura IV.7 – Transdutores de posição tipo laser utilizados: Laser 1 – 50 µm e Laser 2 – 100 µm

O primeiro passo deste trabalho foi a identificação das acelerações a serem utilizadas. Para isto utilizou-se o Laser 2 (apontado para a extremidade excitada da viga), cujo intuito é averiguar se o eixo do *shaker* se desloca de acordo com o que é especificado através do software de controle. Inicialmente, foram desenvolvidos ensaios do sistema composto pelo piezelétrico acoplado à viga de alumínio para diferentes valores de aceleração 2 m/s², 6 m/s², 9,8 m/s² (1g), 19,6 m/s² (2g), 29,4 m/s² (3g). Verificou-se, devido a limitações do sistema de aquisição de dados, que os valores de tensão elétrica de saída do piezelétrico não puderam ser capturados corretamente para altos valores de aceleração. A Figura IV.8 (a), a Figura IV.9 (a) e a Figura IV.10 (a) mostram os valores de tensão elétrica geradas pelo piezelétrico e de deslocamento lido pelo Laser 2 em função da frequência do ensaio utilizando a varredura de frequências *up sweep* (de 50 a 100 Hz) e *down sweep* (de 100 a 50 Hz) para os casos de 29,43 m/s², 6 m/s² e 2 m/s², respectivamente. Vê-se que, para altos valores de aceleração (Figura IV.8 (a)) os sinais são cortados, uma vez que saturam o limite máximo de tensão elétrica permitido pela placa de aquisição. Sendo assim, escolheu-se trabalhar com os valores de 2 m/s² e 6 m/s². Já a Figura IV.8 (b), a Figura IV.9 (b) e a Figura IV.10 (b) mostram os resultados de deslocamento utilizando a varredura de frequências. Pode-se ver que, conforme a aceleração diminui, a leitura do deslocamento perde definição. Verificou-se, porém, que isto não é devido a falha do controle do sistema de excitação, mas sim da baixa resolução do sistema de aquisição de dados.

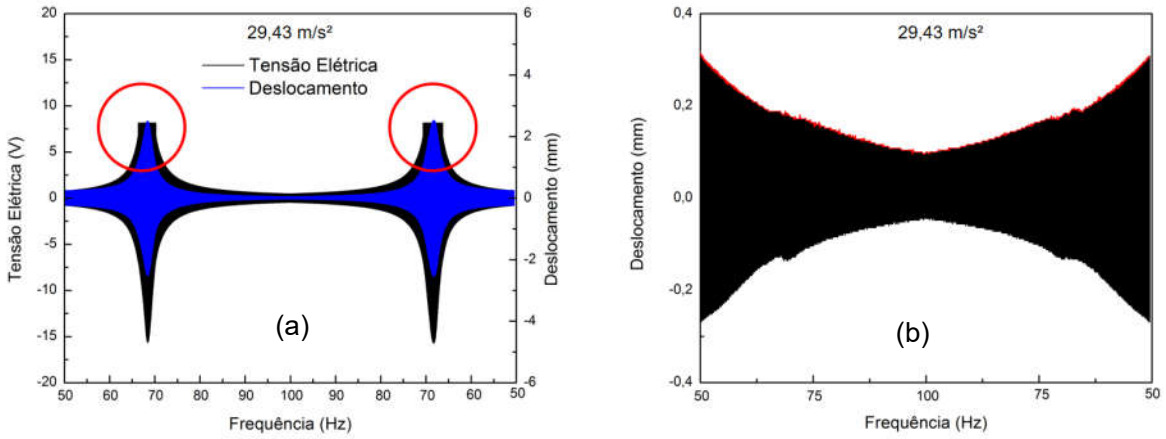


Figura IV.8 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 29,4 m/s².

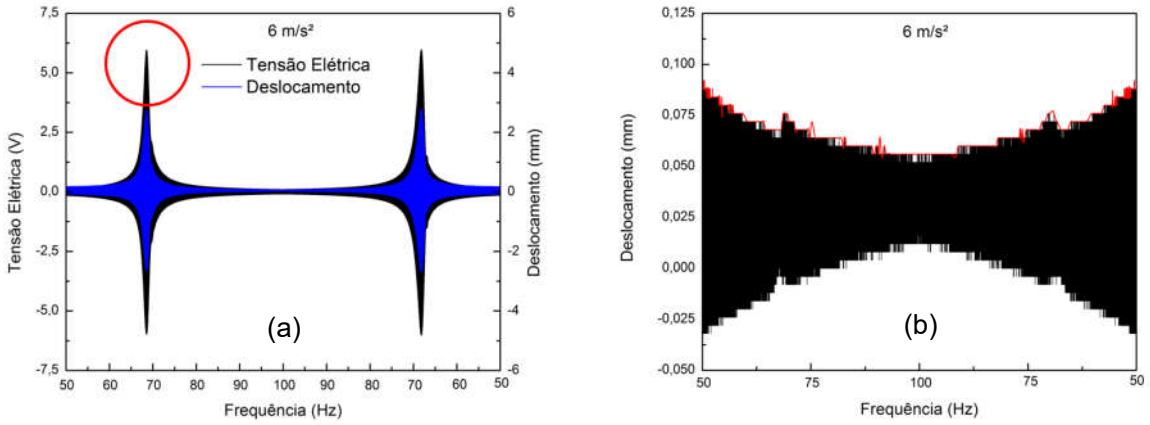


Figura IV.9 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 6 m/s².

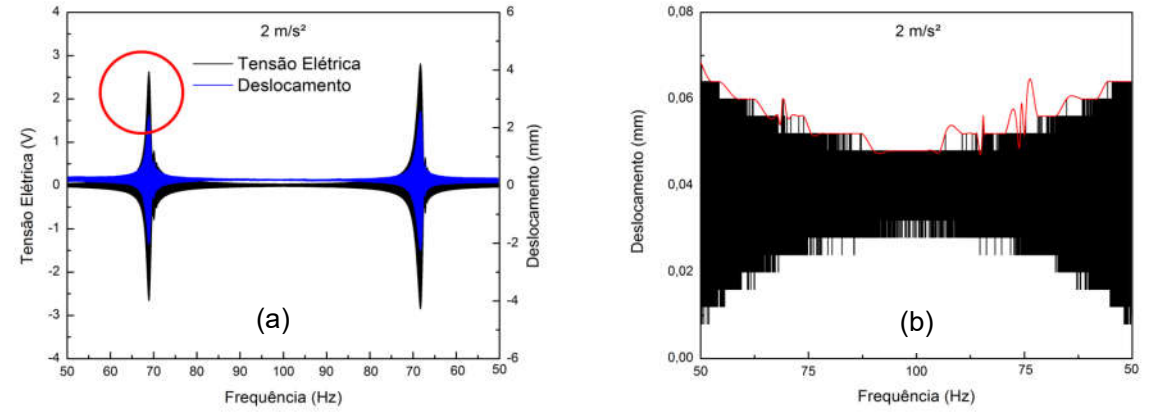
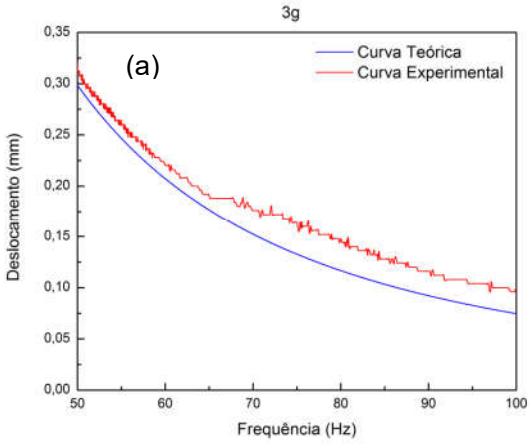


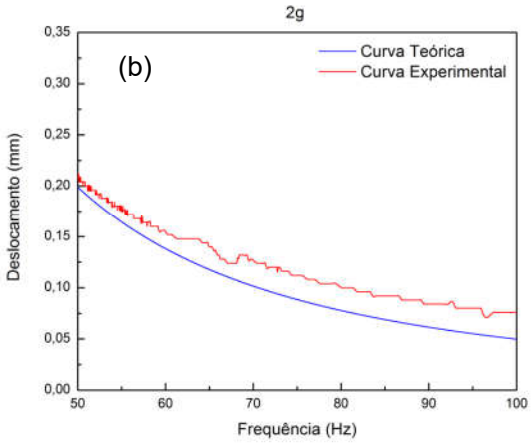
Figura IV.10 – (a) tensão elétrica gerada pelo piezelétrico e deslocamento medido pelo Laser 2 (base) em função da frequência (b) destaque da medida de deslocamento medido pelo Laser 2. Teste realizado com aceleração igual a 6 m/s².

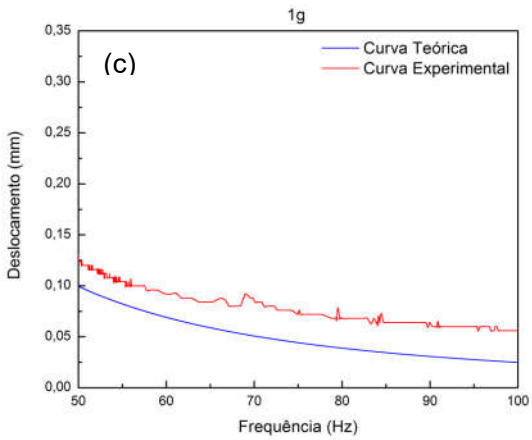
No intuito de verificar a justificativa anterior, realizou-se um procedimento de comparação das curvas experimentais extraídas de testes iniciais com a resposta teórica do deslocamento associado à base de vibração da viga. A resposta teórica pode derivada das equações de movimento harmônico simples.

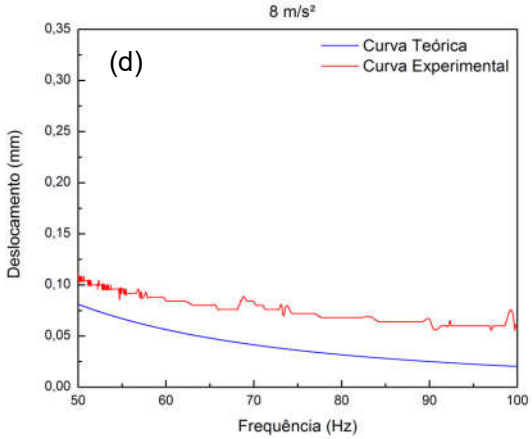
$$x = a_{máx}\frac{1000}{(2\pi\omega)^2} \tag{5}$$

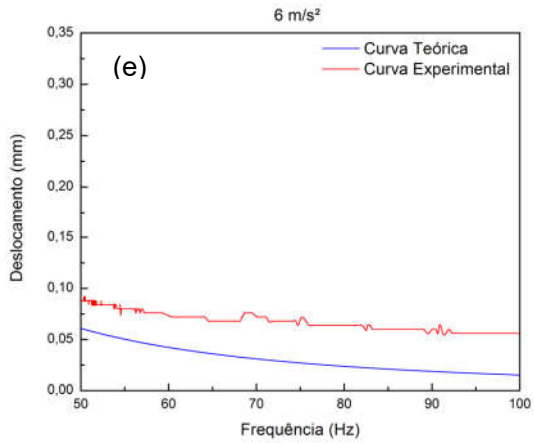
onde x é o deslocamento da base da viga, $a_{máx}$ é o pico máximo de aceleração programado no *shaker*, ω é a frequência de excitação. A comparação entre as respostas experimentais e teóricas é apresentada na Figura IV.11 para diversas amplitudes de excitação na faixa de frequências analisadas.

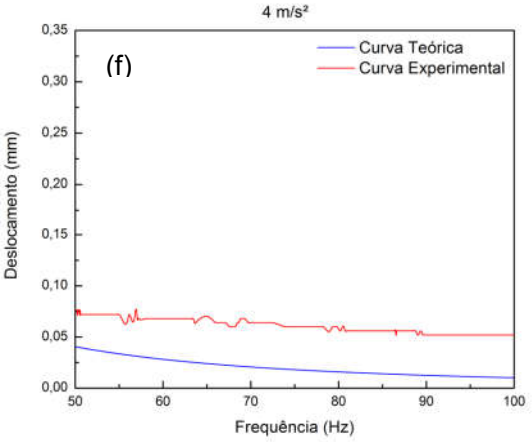

3g
(a)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)


2g
(b)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)


1g
(c)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)


8 m/s²
(d)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)


6 m/s²
(e)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)


4 m/s²
(f)
Curva Teórica
Curva Experimental
Deslocamento (mm)
Frequência (Hz)

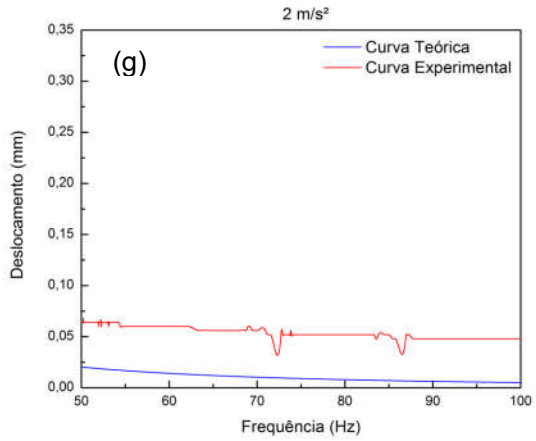


Figura IV.11 - Comparação entre as respostas teórica / experimental do movimento de excitação da base da viga para diversas amplitudes. (a) $a_{máx}$ = 3g. (b) $a_{máx}$ = 2g. (c) $a_{máx}$ = 1g. (d) $a_{máx}$ = 8 m/s². (e) $a_{máx}$ = 6 m/s². (f) $a_{máx}$ = 4 m/s². (g) $a_{máx}$ = 2 m/s².

Percebe-se que há uma diferença entre a curva teórica com a curva experimental, mas que essa diferença se mantém muito pequena e próximas umas das outras para todas as acelerações testadas. Foi calculado para cada ponto em cada caso de aceleração a diferença entre as curvas teórica e experimental. A média dessa diferença, o desvio padrão e o erro de cada caso apresentado na Figura IV.11 pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 - Erro associado a cada aceleração entre a curva teórica e experimental.

Aceleração (m/s²)	29,4	19,6	9,8	8	6	4	2
Média da diferença (mm)	0,021	0,020	0,028	0,034	0,036	0,040	0,043
Desvio Padrão (mm)	0,006	0,005	0,004	0,005	0,004	0,002	0,003
Erro Padrão	2,595e-5	2,066e-5	1,676e-5	2,169e-5	1,820e-5	1,185e-5	1,365e-5

Tanto o erro quanto o desvio padrão associados à Tabela 5 foram calculados pelo próprio programa de análise de dados (*Origin Lab*) respeitando as seguintes equações:

- Desvio padrão:

$$D = \sqrt{\frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{6}$$

onde D é o desvio padrão, x_i representa o valor do elemento em questão, $\bar{x}$ representa a média aritmética de todos os elementos envolvidos na curva e n o número total de elementos que compõem a média.

- Erro padrão:

$$E = \frac{D}{\sqrt{n}} \tag{7}$$

onde E é o erro padrão, D o desvio padrão.

A partir da Tabela 5 pode-se notar que a média das diferenças são muito pequenas, podendo estas diferenças serem associadas a um erro associado a calibração do Laser 2. Entretanto, embora com um pequeno acréscimo há compatibilidade qualitativa das curvas teóricas e experimentais, o que garante que o *shaker* está se comportando conforme programado no software de controle.

IV.4 Elemento de fixação dos sensores e do *shaker*

Para fixação dos sensores lasers na vertical, de forma a medir o movimento das duas extremidades da viga de alumínio e realizar o acoplamento das molas, foi necessário construir uma estrutura metálica que envolvesse o *shaker* e fosse capaz de oferecer estabilidade para os sensores e a mola. A estrutura foi construída a partir de chapas e tubos quadrados de aço, e soldada. Para garantir que a estrutura não sofresse influência da vibração provocada pelo *shaker*, tomou-se o cuidado de instalar quatro equipamentos de absorção de vibração (*vibra-stop*) nas bases da estrutura e seis *vibra-stops* no *shaker*. O *shaker* foi posicionado em cima de um bloco de concreto com dimensões 1m x 1m x 1m sendo 0,9 m da altura do bloco localizada abaixo do solo e 0,1 m acima do solo. A estrutura pode ser vista na Figura IV.12 bem como alguns *vibra-stops* na Figura IV.13.

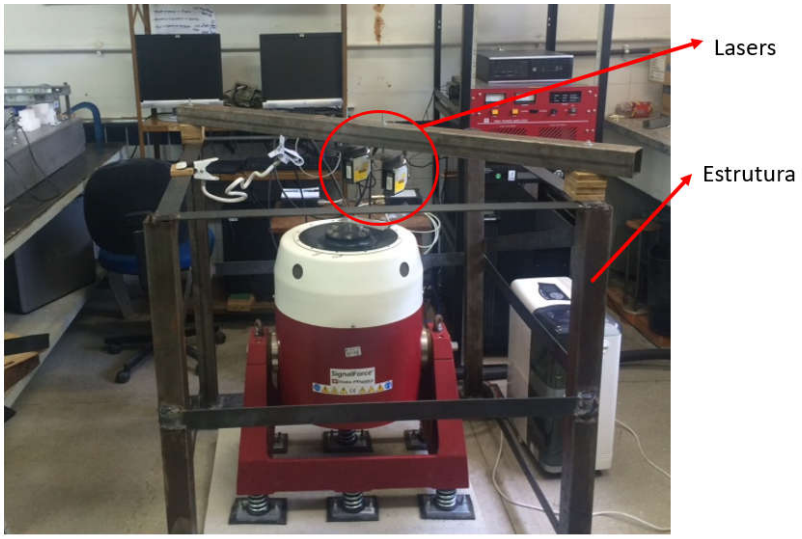


Figura IV.12 - Estrutura metálica para sustentação dos sensores a laser.

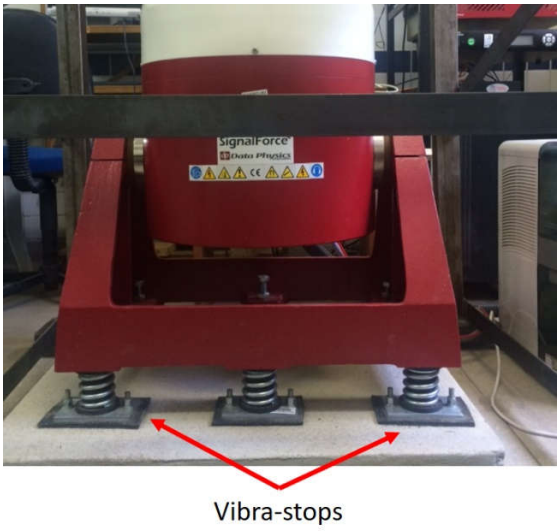


Figura IV.13 - *Vibra-stops* para absorção de vibrações produzidas pelo *shaker*.

IV.5 Elementos de mudança de rigidez (Molas)

Um elemento mecânico pode ser acoplado à um elemento piezelétrico a fim de promover alterações no comportamento dinâmico do sistema e, dessa forma, aumentar a faixa operacional. O experimento desenvolvido considera a utilização de molas de aço trabalhando no regime de material linear elástico e molas de *SMA*.

IV.5.1 Molas Helicoidais de Aço

Inicialmente, foram selecionadas 3 molas helicoidais de: aço de baixa, intermediária e alta rigidez, para serem analisadas no experimento. As molas utilizadas no experimento podem ser vistas na Figura IV.14 bem como a nomenclatura adotada.

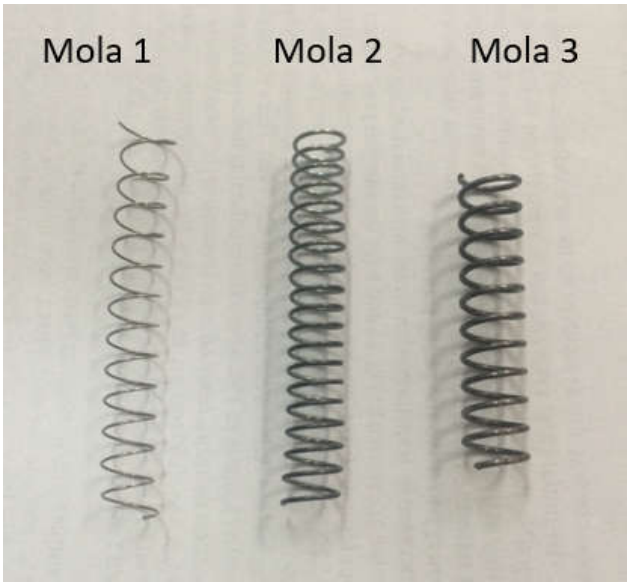


Figura IV.14 - Molas helicoidais de aço utilizadas no experimento.

Para caracterizar as molas, foram feitos três ensaios de tração na máquina de ensaios mecânicos Instron modelo 5966 do LADES - CEFET/RJ. A Figura IV.15 mostra a montagem experimental. A Figura IV.16, a Figura IV.17 e a Figura IV.18 mostram os resultados obtidos dos testes para as molas 1, 2 e 3 respectivamente utilizando carregamentos com deslocamento prescrito. A Tabela 6 mostra os valores calculados para rigidez mecânica das molas helicoidais de aço na região de operação linear bem como outras características físicas de cada mola. Os valores de rigidez das molas foram extraídos através do método da tangente segundo os dados fornecidos pelos testes de tração na *Instron*.

$$K_{mola} = \frac{\Delta F}{\Delta x} \tag{8}$$

onde ΔF é a variação da força em um intervalo de deslocamento Δx.

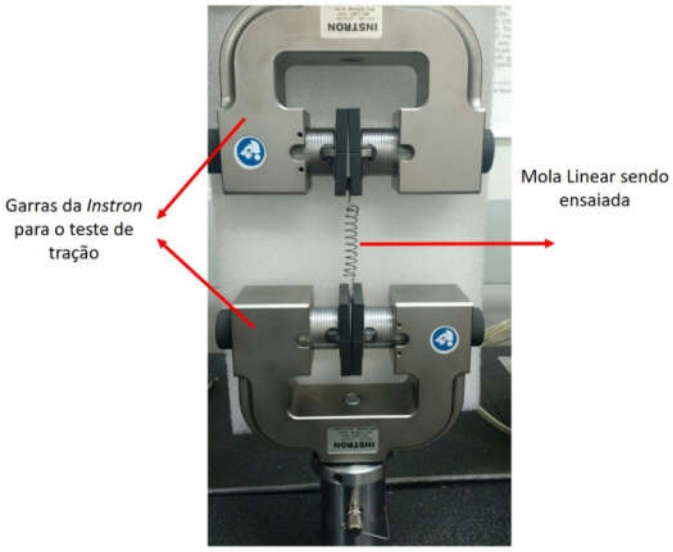


Figura IV.15 - Teste de tração com molas helicoidais de aço.

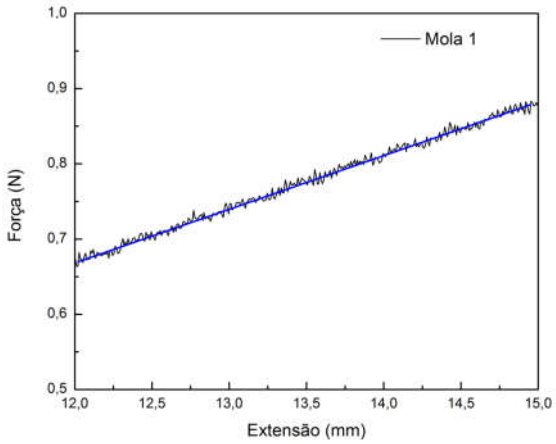


Figura IV.16 - Teste de tração - Mola 1.

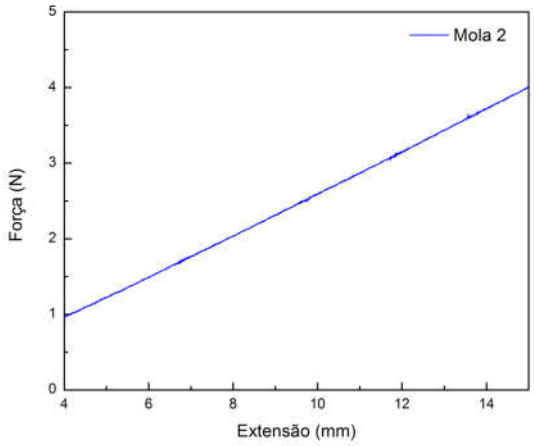


Figura IV.17 - Teste de tração - Mola 2.

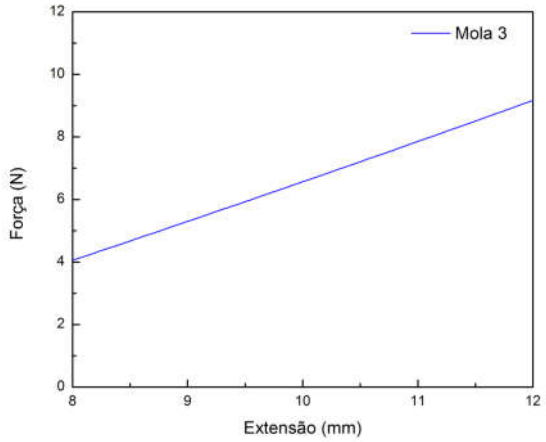


Figura IV.18 - Teste de tração - Mola 3.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas das molas lineares utilizadas no experimento.

Propriedade/Mola	Mola 1	Mola 2	Mola 3
Rigidez	60 N/m	270 N/m	1200 N/m
Diâmetro do fio	0,4 mm	0,65 mm	0,9 mm
Diâmetro externo da espira	7,2 mm	7,9 mm	8,7 mm
Número de espiras	11	17	9

IV.5.2 Fabricação da Mola de SMA - Pseudoelástica

Elementos de SMA podem ter a rigidez alterada em função da fase microestrutural presente (austenita ou martensita). A austenita e a martensita apresentam módulos de elasticidade distintos, o que faz com que a rigidez de um elemento de SMA possa ser afetada pela fase presente. Este efeito pode alterar o comportamento dinâmico de um sistema que possua elementos de SMA. Fios de SMA são atualmente a forma com a maior disponibilidade. No entanto, em algumas situações não são os elementos mecânicos mais adequados para sistemas vibratórios, uma vez que eles não podem facilmente ser comprimidos, ocasionando flambagem do fio e assim, afetando de maneira significativa a resposta do sistema. Para o experimento desenvolvido, optou-se pela fabricação de molas helicoidais de SMA com boa capacidade de se deformar mecanicamente, sendo o problema da flambagem eliminado através de uma pré-extensão inicial, de modo a garantir que trabalhe sempre sob esforços trativos. Devido à dificuldade de se encontrar molas de SMA comerciais já prontas e com características similares ou próximas das necessárias para este trabalho, algumas molas de SMA foram fabricadas no LACTM.

Cinco diâmetros de fios pseudoelásticos diferentes estavam disponíveis no LACTM. Os fios são compostos de uma liga de NiTi F2063, segundo a empresa fornecedora "*Sandinox*" (http://www.sandinox.com.br/, 2016). Os diâmetros são respectivamente: 0,30; 0,48; 0,70; 0,90 e 1,30 mm. Selecionou-se o fio de diâmetro 0,9 mm para fabricação da mola helicoidal de SMA.

Uma vez que o fornecedor dos fios disponibiliza apenas informação básicas sobre os fios, houve a necessidade de se realizar um estudo de caracterização dos fios. Este estudo consiste de dois tipos de testes diferentes:

- Testes para determinar as temperaturas de transformação de fase do fio realizadas num equipamento *DSC – Differential Scanning Calorimetry*
- Testes de Tração para caracterizar o comportamento mecânico do fio: realizado em uma máquina de ensaios mecânicos.

Os testes no *DSCs* foram realizados no laboratório do Centro de Mecânica Não-linear (MECANON) da COPPE/UFRJ em um equipamento da Netzsch modelo DSC 200 F3. Os testes de tração foram realizados em uma máquina de ensaios mecânicos *Instron* modelo 5966 do Laboratório de Adesivos e Compósitos (LADES) do CEFET/RJ. A Figura IV.19 e a Figura IV.20 mostram os equipamentos utilizados e os procedimentos para realização dos testes *DSCs*.



Figura IV.19 - Instrumento para vedar os cadinhos das amostras e balança de micro precisão.



Figura IV.20 - Sistema de refrigeração a nitrogênio líquido e máquina de DSC (Mecanon – COPPE/UFRJ).

Os testes no DSC foram realizados segundo o seguinte procedimento: cortou-se duas amostras de cada diâmetro de fio pseudoelástico. As amostras foram cortadas em uma máquina "*Isomet*" da marca *Struers* modelo *Miniton* cujo corte é feito por um disco de fio diamantado. Essas amostras foram pesadas em uma balança de micro precisão assim como os cadinhos vazios. As amostras cortadas na *Isomet* continham entre 5 e 15 µg. Como havia duas amostras para cada diâmetro, uma média entre as temperaturas de cada teste, de início e fim das transformações de fase martensita → austenita e austenita → martensita foram calculadas. A Figura IV.21 mostra um exemplo do resultado de um teste de *DSC* e a Tabela 7 mostra os resultados obtidos para os testes de *DSC* realizados com o fio de 0,9 mm de diâmetro.

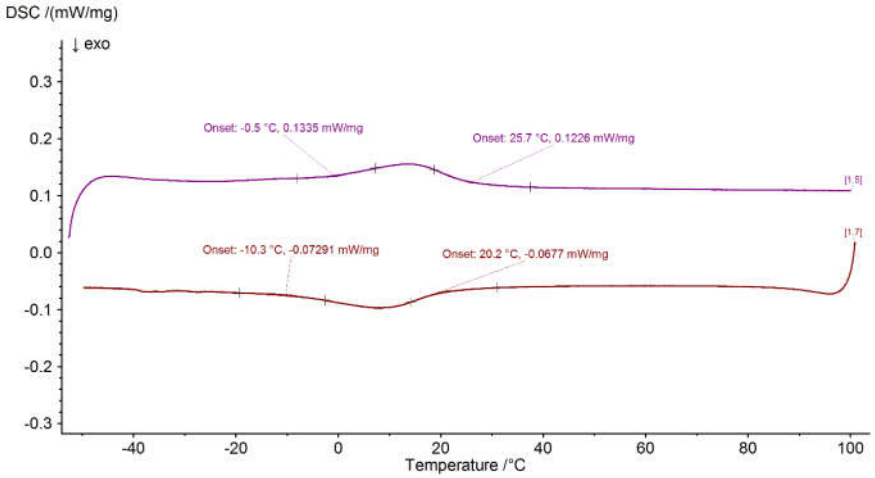


Figura IV.21 - Exemplo do resultado de um teste de *DSC*.

Tabela 7 - Rsultados dos testes de *DSCs* e temperaturas médias calculadas.

	Temperaturas Críticas de transformação - Amostra I (ºC)				Temperaturas Críticas de Transformação - Amostra II (ºC)				Temperaturas Críticas de transformação - Média (ºC)			
Fio (mm)	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f
0,90	-10,3	20,2	-0,5	25,7	-8,5	18,5	0,1	25,9	-9,4	19,35	-0,2	25,8

Os testes de tração foram realizados através dos seguintes procedimentos. Removeu-se de cada rolo de fios três amostras de 150 mm cada uma. Desses 150 mm, 50 mm foram utilizados para fixação do corpo de prova nas garras da *Instron*, deixando assim 100 mm de comprimento útil para realização do teste. Os parâmetros foram ajustados garantindo uma taxa de carregamento e descarregamento de 2 mm/min atingindo uma tensão máxima de 900 MPa. Assim, 20 ciclos de carregamento e descarregamento foram realizados. A Figura IV.22 mostra o aparato utilizado para realizar os testes de tração com os fios.



Figura IV.22 - Máquina *Instron* utilizada para os testes de tração (LADES – CEFET/RJ).

Através da Figura IV.23 percebe-se que houve estabilização dos laços de histerese e das tensões de transformação de fase (treinamento). Este é um exemplo de um teste realizado com um fio virgem (na condição de “como recebido”) de 0,90 mm de diâmetro. Por isso, selecionou-se os três últimos ciclos de cada corpo de prova e calculou-se a média entre esses ciclos, para o primeiro corpo de prova. O mesmo se repetiu para os corpos de provas restantes e finalmente uma média entre as médias dos últimos ciclos foi calculada. As médias finais podem ser vistas na Figura IV.24 (a) e (b), onde estão representados os gráficos *força x deslocamento* e *tensão x deformação* para um fio de diâmetro igual a 0,9 mm.

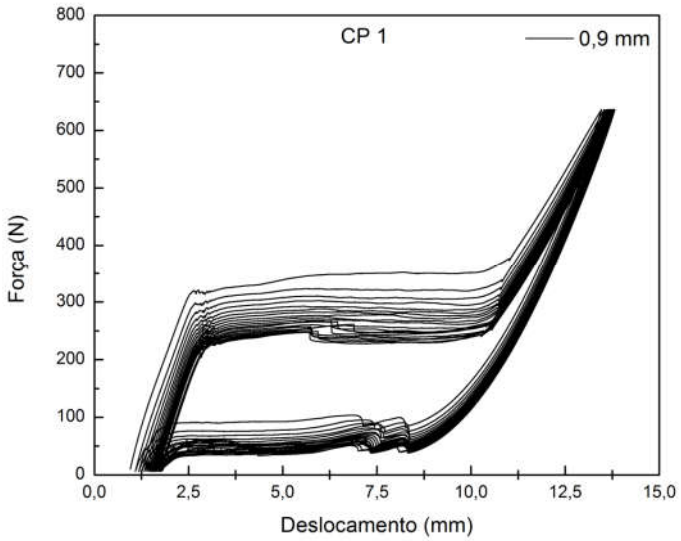


Figura IV.23 – Curva força x deslocamento de um ensaio de tração com um fio de SMA na condição de “como-recebido”

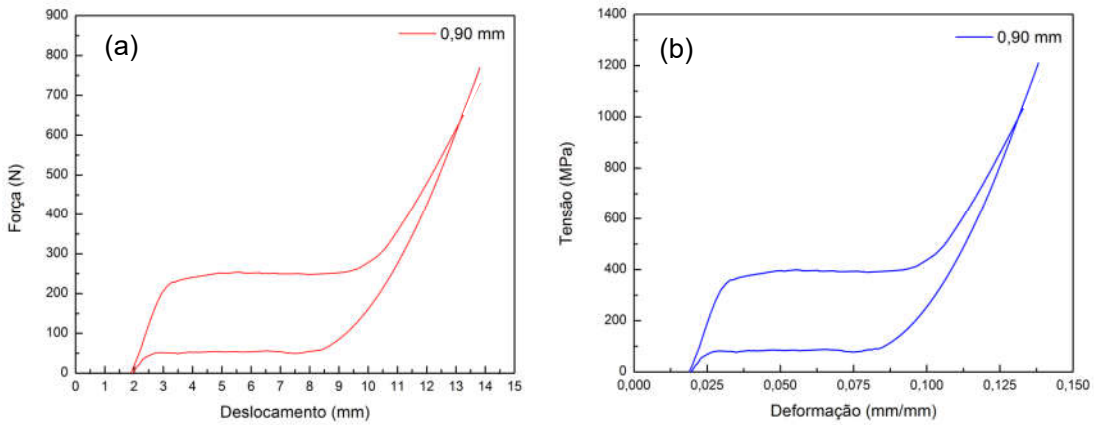


Figura IV.24 - Resultado das médias dos ultimos ciclos de treinamento. (a) Força x Deslocamento. (b) Tensão x Deformação. Diâmetro = 0,9 mm.

Para confecção das molas de SMA, foram adotados os mesmos procedimentos semelhantes aos utilizados por da Hora, *et al*., (2014). Um determinado comprimento do fio de diâmetro igual a 0,9 mm foi enrolado em uma barra rosqueada de diâmetro 12 mm e preso em suas extremidades por porcas de maneira a conforma-los mecanicamente na barra rosqueada. Em seguida, o conjunto foi levado a um forno pré-aquecido a 490 ºC e deixados por 45 minutos para homogeneização da microestrutura. Após 45 minutos, a amostra foi removida do forno e colocada imediatamente em banho de água estável à temperatura ambiente, de modo a realizar o tratamento térmico de têmpera. Após o tratamento térmico, o fio é retirado da barra rosqueada e assume a forma de uma mola helicoidal. Para avaliar o efeito do tratamento térmico no fio, um pedaço de fio reto foi colocado no forno junto com a mola, sofrendo o mesmo processo no forno e no resfriamento. A Figura IV.25 mostra o fio peseudoelástico fixado na barra rosqueada, pronto para ser colocado no forno.

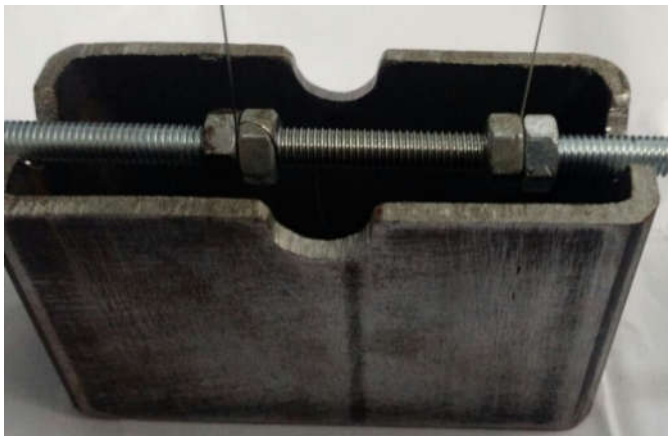


Figura IV.25 – Fio pseudoelástico enrolado na barra rosqueada e fixado com porcas. Pronto para ir ao forno pré-aquecido.

A mola proveniente deste procedimento apresentou características pseudoelásticas após o tratamento térmico. A Figura IV.26 (a) mostra o resultado *força x deslocamento* do teste de tração para uma amostra de fio de 0,9 mm de diâmetro após o tratamento térmico. Ainda a Figura IV.26 (b) mostra os últimos 3 ciclos de treinamento dessa amostra num gráfico *tensão x deformação*. A Figura IV.27 mostra a mola fabricada e apresenta-se na Figura IV.28 (a) seu processo de treinamento com características peseudoelásticas e Figura IV.28 (b) os três últimos ciclos do treinamento.

Tabela 8 mostra algumas propriedades mecânicas e geométricas da mola pseudoelástica.

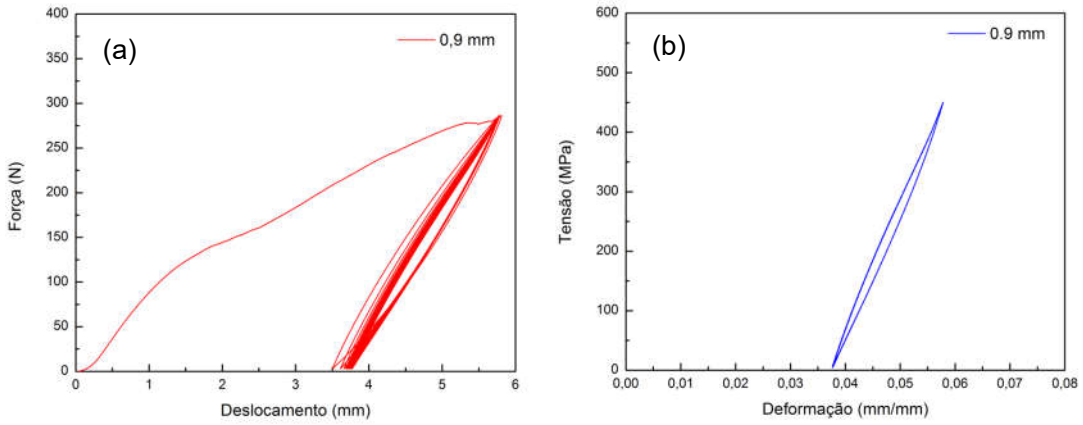


Figura IV.26 - Resultado do teste de tração de uma amostra de fio após o tratamento térmico. (a) Força x Deslocamento. (b) Tensão x deformação para o último ciclo. Fio de diâmetro 0,9 mm.



Figura IV.27 - Mola austenítica fabricada.

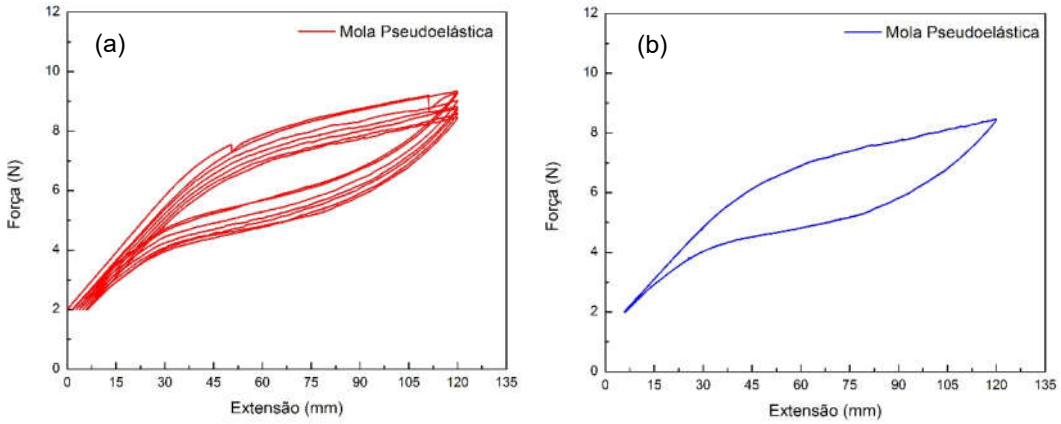


Figura IV.28 – (a) Processo de treinamento da mola de SMA pseudoelástica fabricada. (b) Últimos três ciclos do treinamento.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e geométricas da mola pseudoelástica fabricada.

Rigidez inicial e a temperatura ambiente	≅ 117 N/m
Diâmetro do fio da mola	0,9 mm
Diâmetro interno da mola	12 mm
Número de espiras ativas	10

Em seguida, foi efetuado um teste de *DSC* após a confecção da mola pseudoelástica com o objetivo de encontrar as temperaturas de transformação de fase da mola fabricada. Foram retiradas duas amostras da mola fabricada e feito um ensaio para cada amostra. Os resultados podem ser vistos na Tabela 9 onde mostra as temperaturas encontradas e a média entre elas.

Tabela 9 – Temperaturas de transformação de fase da mola pseudoelástica.

	Temperaturas Críticas de transformação - Amostra I (ºC)				Temperaturas Críticas de Transformação - Amostra II (ºC)				Temperaturas Críticas de transformação - Média (ºC)			
Fio (mm)	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f
0,90	-10,4	1,6	-1,2	14,4	-10,3	0,6	-6,9	12,1	-10,35	1,1	-4,05	13,25

Com o intuito de explorar o efeito de memória de forma apresentado pelas ligas com memória de forma, foi utilizada uma mola de SMA comercial da Flexinol já existente e disponível no LACTM. A mola apresenta efeito memória de forma (EMF) à temperatura ambiente. A Figura IV.29 mostra a mola em questão e a Tabela 10 suas propriedades e características mecânicas. Os fios condutores acoplados as extremidades da mola foram utilizados para aquecimento via corrente elétrica como será explica no item seguinte.



Figura IV.29 – Mola martensítica comercial Flexinol.

Tabela 10 - Propriedades mecânicas e geométricas da mola martensítica de memória de forma já disponível.

Rigidez inicial e a temperatura ambiente	≅ 110 N/m
Diâmetro do fio da mola	0,8 mm
Diâmetro interno da mola	5,6 mm
Número de espiras ativas	20

Também foi realizado um teste de tração na *Instron* com a mola com memória de forma Flexinol e o resultado é apresentado na Figura IV.30.

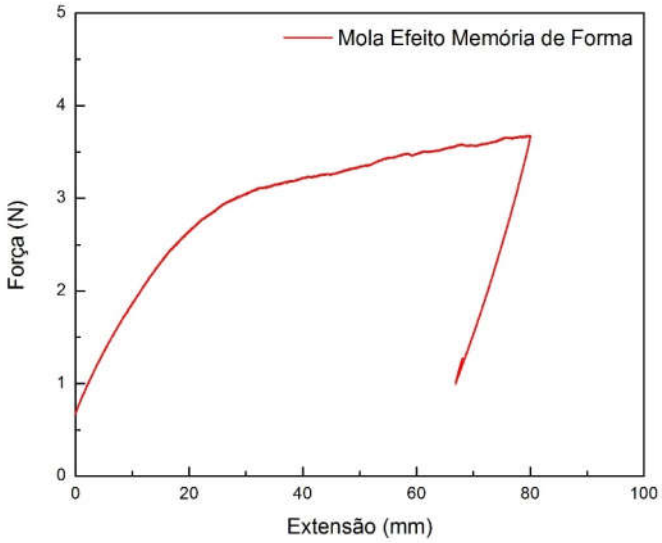


Figura IV.30 – Ensaio de tração da mola comercial da Flexinol com efeito de memória de forma à temperatura ambiente.

Assim como para a mola pseudoelástica, foi realizado um ensaio de DSC com amostras retiradas da mola Flexinol (efeito memória de forma). Foram seguidos os mesmos parâmetros de testes e procedimentos de execução e os resultados obtidos podem ser encontrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Temperaturas de transformação de fase da mola pseudoelástica.

	Temperaturas Críticas de transformação - Amostra I (ºC)				Temperaturas Críticas de Transformação - Amostra II (ºC)				Temperaturas Críticas de transformação - Média (ºC)			
Fio (mm)	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f	M_f	M_s	A_s	A_f
0,80	32,1	42,2	26,4	50,9	31,4	41,1	25,8	49,9	31,75	41,65	26,1	50,04

IV.6 Fonte de corrente para aquecimento das Molas de SMA

As molas de SMA, tanto a fabricada no LACTM (efeito peseudoelástico à temperatura ambiente) como a comercial da Flexinol (efeito memória à temperatura ambiente) foram aquecidas por Efeito Joule com a intenção promover a alteração de suas propriedades mecânicas alterando suas características de rigidez e dissipação. Dessa forma, é possível altear o comportamento dinâmico do sistema estudado através da alteração da temperatura da mola.

A uma fonte de corrente elétrica mostrada na Figura IV.31 e o esquema montado mostrando a conexão da fonte com a mola. Utilizou-se correntes iguais 0,5 A, 1,0 A e 1,5 A.



Figura IV.31 – Fonte de corrente elétrica utilizada no experimento.

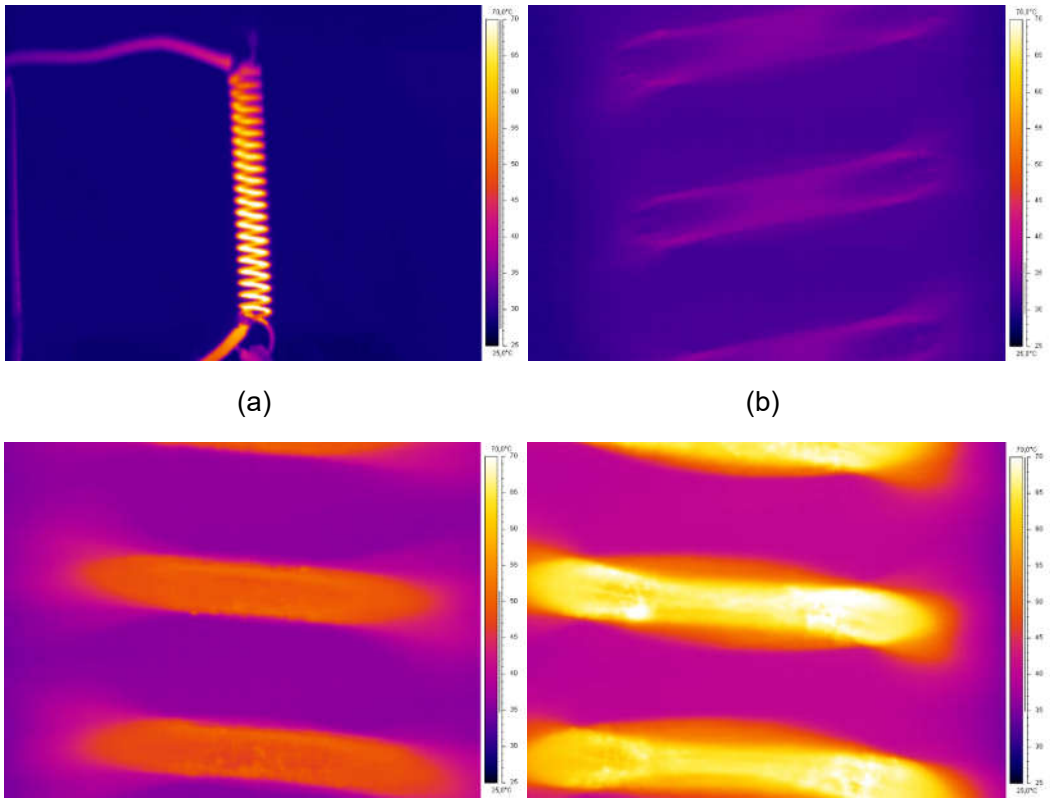
Como a maneira utilizada para aquecimento dos componentes de SMA é o uso de corrente elétrica e, portanto, através do efeito Joule, houve a necessidade de estabelecer uma correlação entre a corrente elétrica aplicada e a temperatura que à corresponde. Para isso, utilizou-se uma câmera termográfica (*Flir* modelo *A320*). Os ensaios foram realizados uma vez para cada corrente aplicada com a mola de memória de forma acoplada ao experimento na condição estática (sem vibração) e durante um intervalo de tempo de 10 segundos. A Figura IV.32 mostra a mola aquecida e as correspondentes temperaturas ao longo do fio da mola. A escala de temperatura da Figura IV.32 varia entre 25°C e 70°C.

A Tabela 12 mostra as temperaturas médias entre o intervalo de tempo gravado em um ponto de uma espira para cada uma das correntes utilizadas.

Tabela 12 – Temperaturas médias correspondentes as correntes elétricas utilizadas.

Corrente Elétrica	Temperatura média associada
0,5 A	35°C
1,0 A	46C
1,5 A	63°C

Os resultados apresentados na Figura IV.32 foram obtidos a partir de ensaios estáticos. Sabe-se que as temperaturas reais dos ensaios realizados com vibrações podem diferir consideravelmente em relação aos dos ensaios estáticos, uma vez que as perdas de calor por convecção são diferentes, mas estes resultados mostram um indicativo das temperaturas em que a mola se encontra ao iniciar um ensaio de vibração para cada uma das correntes utilizadas.



(a) (b)

(c) (d)

Figura IV.32 - Correlação corrente elétrica - temperatura na mola com efeito memória de forma: (a) Vista expandida. (b) Foco na espira – Mola com corrente 0,5 A. (c) Foco na espira – Mola com corrente 1,0 A. (d) Foco na espira – Mola com corrente 1,5 A.

A Figura IV.33 mostra o esquema final do experimento montado.

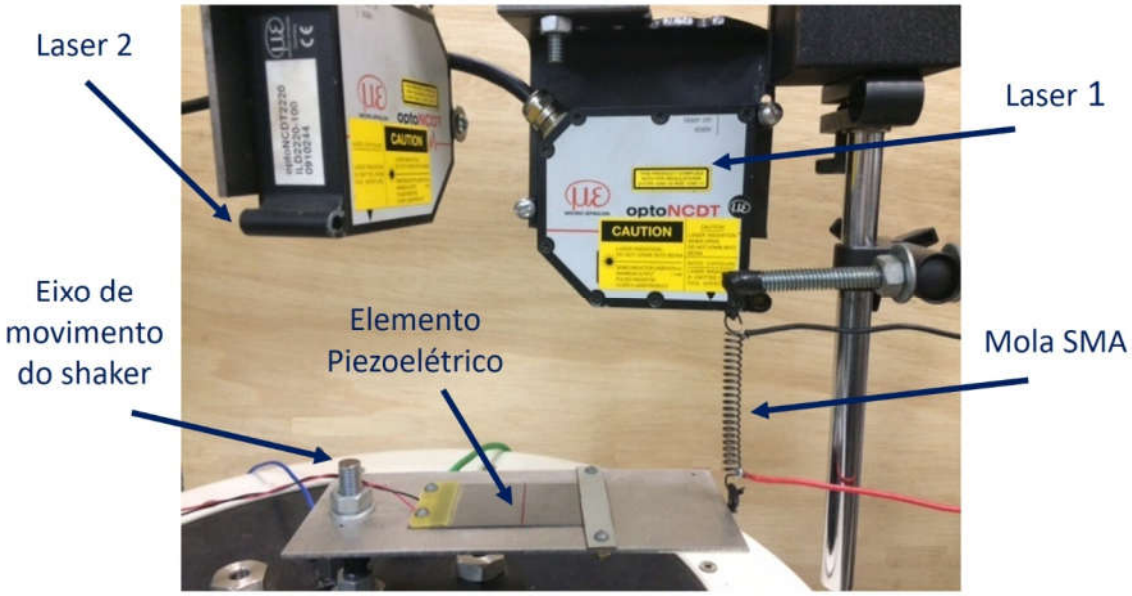


Figura IV.33 – Esquema final da montagem do experimento

V - Resultados e Discussão

Este capítulo se dedica a mostrar os resultados obtidos a partir do experimento descrito no capítulo IV. Serão apresentados resultados em duas seções: Resultados com molas de aço e resultados com molas de (*SMA*).

V.1 Resultados com molas de aço

Fora realizada uma sequência de testes da seguinte maneira: Monta-se o experimento acoplando-se a viga de alumínio ao *shaker*. O *shaker* excita harmonicamente a viga varrendo as frequências de oscilação e aplicando as duas acelerações descritas na seção IV.1 uma de cada vez. Para garantir a repetitividade dos resultados, repete-se este procedimento 3 vezes para cada uma das acelerações. Em seguida, acopla-se o elemento piezelétrico à viga de alumínio. Novamente, o *shaker* excita a viga 3 vezes para cada uma das 2 acelerações. Então, a "Mola 1" é adicionada ao sistema e as 2 acelerações são usadas 3 vezes novamente. O mesmo procedimento se repete para a "Mola 2" e a "Mola 3". Os procedimentos até então descritos somam um total de 6 testes (três vezes duas acelerações) para cada um dos 5 tipos de viga (Viga Simples, Viga Piezo, Viga Piezo Mola 1, Viga Piezo Mola 2 e Viga Piezo Mola 3) totalizando 30 testes.

A Figura V.1 e a Figura V.2 mostram, respectivamente, a resposta experimental da amplitude de tensão elétrica do elemento piezelétrico e da amplitude de deslocamento da extremidade não excitada da viga para um teste efetuado com a configuração Viga Piezo e aceleração de 6 m/s². Para ambos os casos, os resultados apontam para um comportamento simétrico entre os picos de ressonância da primeira varredura de frequências (de 50 Hz a 100 Hz), chamada em inglês de "*up - sweep*", e da segunda varredura (de 100 Hz a 50 Hz), chamada em inglês de "*down – sweep*" no caminho de volta do *shaker.* O mesmo acontece para os resultados obtidos pelo Laser 1 (apontado para a extremidade não excitada da viga).

Os resultados também apresentaram boa simetria quanto aos valores acima e abaixo do eixo das abcissas. Em função destes comportamentos, que se repetem para as outras condições estudadas neste trabalho, somente serão mostrados os resultados positivos e para a primeira varredura de frequências, associados à região circulada em vermelho na Figura V.1 e na Figura V.2

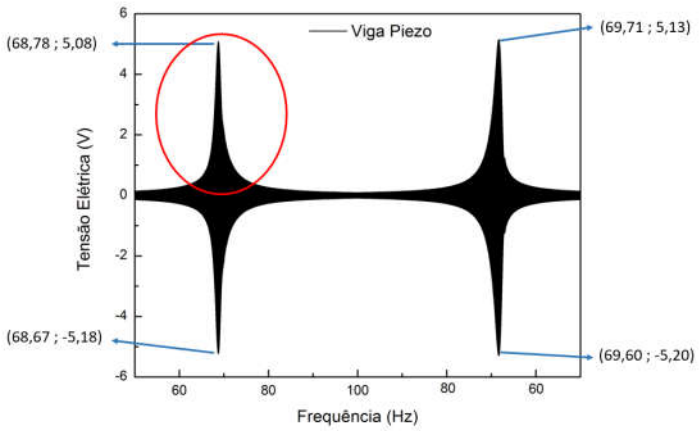


Figura V.1 - Resultado experimental de tensão elétrica de uma viga com elemento piezelétrico em vibração no experimento. Aceleração de base de 6 m/s².

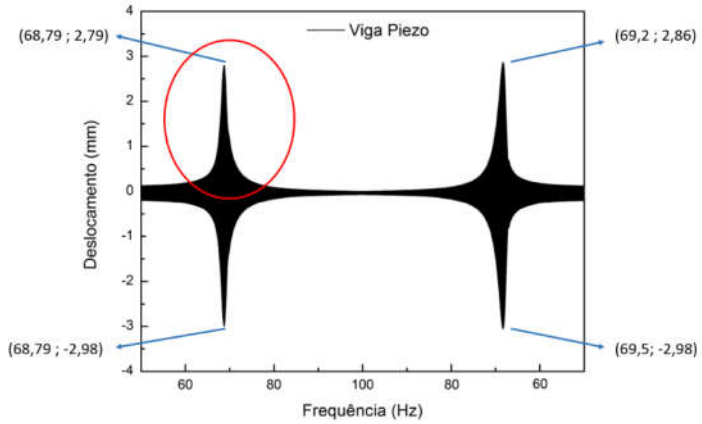


Figura V.2 - Resultado experimental do deslocamento da extremidade associada ao Laser 1 de uma viga com elemento piezelétrico em vibração no experimento. Aceleração de base de 6 m/s².

Para avaliar a dispersão dos resultados entre os ensaios experimentais desenvolvidos, foi realizado um estudo estatístico. As curvas apresentadas neste capítulo são curvas médias de todos os testes realizados e por isso são apresentados também o desvio padrão e o erro padrão entre a média de cada curva no ponto de pico de ressonância. Tanto o erro quanto o desvio padrão foram calculados do mesmo modo descrito no item IV.3 utilizando o próprio programa de análise de dados (*Origin Lab*).

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos diversos ensaios desenvolvidos sem a incorporação do elemento de material com memória de forma. Inicialmente estuda-se o comportamento de uma viga simples. Em seguida, incorpora-se à viga o elemento piezelétrico. Finalmente incorpora-se ao sistema molas de aço na extremidade não excitada da viga. Conforme já comentado, houve a necessidade de uma pré-extensão nas molas para que estas

estivessem sempre submetidas somente a esforços trativos. A Tabela 13 apresenta algumas características das molas de aço, assim como os valores de pré-extensão utilizados para cada uma das molas de aço utilizadas.

Tabela 13 – Comprimento original, comprimento final e pré-extensão das molas de aço.

Mola	**Comprimento original**	**Comprimento final**	**Pré-extensão**
Mola 1	50 mm	80 mm	30 mm
Mola 2	48 mm	75 mm	27 mm
Mola 3	32 mm	50 mm	18 mm

A Figura V.3 e a Figura V.4 mostram respectivamente, as amplitudes dos sinais de tensão elétrica e de deslocamento em função das frequências de excitação para amplitudes de excitação de 2 a 6 m/s². As curvas são envoltórias dos resultados obtidos conforme comentado neste capítulo.

As Tabelas 13 - 16 apresentam os valores máximos médios dos picos de ressonância, o valor da frequência em que eles ocorreram, o desvio padrão e o erro padrão anteriormente citados para os casos estudados.

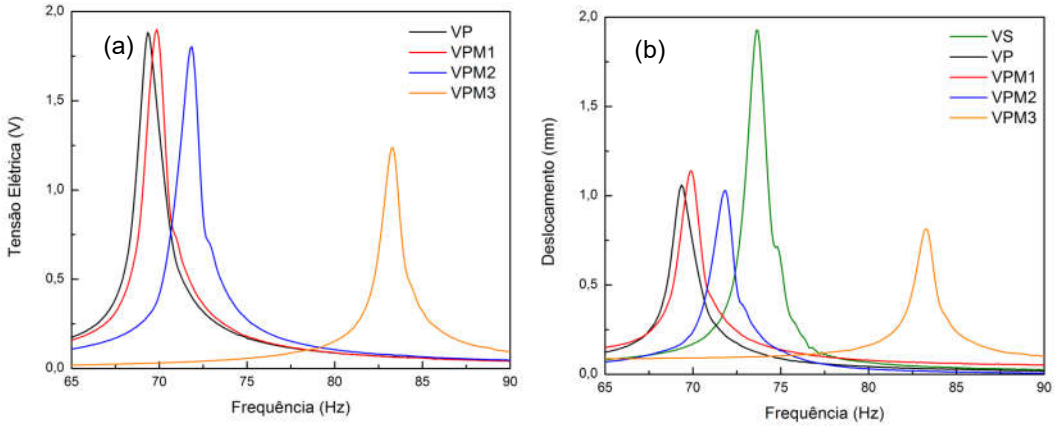


Figura V.3 – (a) Amplitude da tensão elétrica e (b) do deslocamento da extremidade da viga, em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 2 m/s².

Tabela 14 - Tensão elétrica média no ponto máximo de ressonância – 2 m/s²

Tipo de Viga	Frequência de Ressonância (Hz)	Pico de Tensão Elétrica (V)	Desvio Padrão (V)	Erro
VP	69,351	1,883	0,025	0,014
VPM 1	69,852	1,900	0,041	0,029
VPM 2	71,858	1,803	0,039	0,027
VPM 3	83,232	1,235	0,007	0,004

Tabela 15 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 2 m/s²

Tipo de Viga	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
VS	73,702	1,926	0,010	0,006
VP	69,351	1,061	0,009	0,005
VPM 1	69,852	1,139	0,003	0,002
VPM 2	71,858	1,030	0,019	0,014
VPM 3	83,232	0,814	0,006	0,003

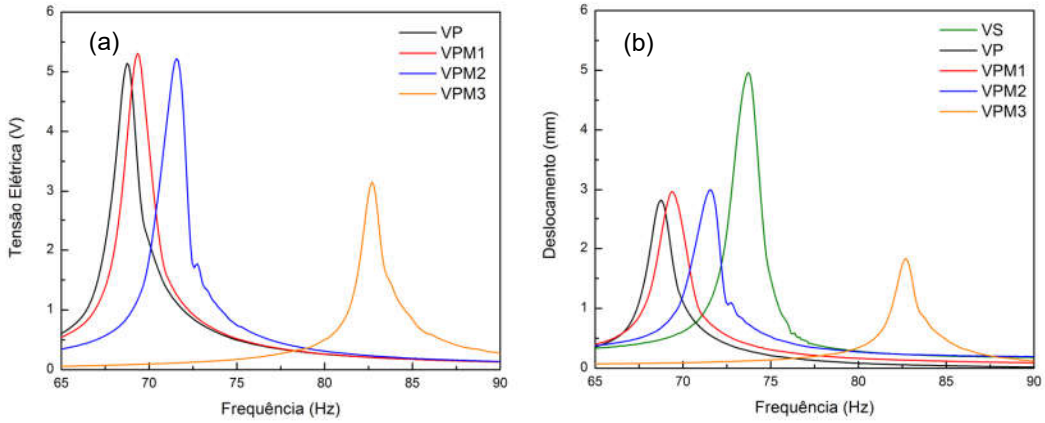


Figura V.4 – (a) Amplitude da tensão elétrica e (b) do deslocamento da extremidade da viga, em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s².

Tabela 16 - Tensão elétrica média no ponto máximo de ressonância - 6 m/s²

Tipo de Viga	Frequência de Ressonância (Hz)	Pico de Tensão Elétrica (V)	Desvio Padrão (V)	Erro
VP	68,749	5,141	0,054	0,031
VPM 1	69,351	5,308	0,039	0,028
VPM 2	71,557	5,222	0,032	0,018
VPM 3	82,686	3,153	0,028	0,016

Tabela 17 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 6 m/s²

Tipo de Viga	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
VS	73,741	4,961	0,043	0,025
VP	68,749	2,825	0,027	0,015
VPM 1	69,351	2,965	0,049	0,034
VPM 2	71,557	3,000	0,032	0,019
VPM 3	82,686	1,834	0,013	0,007

A Figura V.3 e a Figura V.4 mostram que qualitativamente, o sinal da tensão elétrica acompanha o sinal do sensor de deslocamento a laser. A adição de um elemento piezelétrico e seus elementos de conexão conforme mostrado no experimento, promove um resultado combinado de mudança de rigidez, mudança de dissipação e assimetria. Isto faz com que a frequência natural do sistema diminua aproximadamente 5 Hz para ambas as condições de forçamento apresentadas com Viga Simples. Além disso, percebe-se também um decaimento da amplitude de deslocamento da extremidade livre da viga de 44,91 % no caso de 2 m/s² e 43,05% para o caso de 6 m/s².

A adição de uma mola de aço conforme a configuração utilizada no experimento pode promover o aumento de rigidez do sistema, deslocando o valor da frequência natural do sistema para um valor acima do obtido para um sistema sem a mola. Dessa forma, um aumento da rigidez do sistema, embora diminua a amplitude da tensão elétrica e do deslocamento da extremidade não excitada da viga, permite que o sistema possa gerar mais energia caso ele seja excitado com uma frequência acima da de seu valor sem a mola. A Figura V.3 e a Figura V.4 mostram um exemplo deste comportamento. Comparando o caso da Viga Piezo e da Viga Piezo Mola 3 (curvas pretas e laranjas), nota-se que, para o caso de 6 m/s², em termos de valores absolutos de tensão, a VP gera 5,141 V no seu pico de ressonância enquanto que a VPM3 gera 3,153 V no seu. Para esta situação houve uma queda de 1,988 V, o que representa uma diminuição de 38,66 %. Entretanto para a condição de ressonância da VPM3 a VP produziria 0,204 V enquanto que a VPM3 3,153 V. Isto mostra um aumento comparativo de 2,949 V ou em termos percentuais, de 1445,5 %.

Evidentemente, a troca de uma mola em um dispositivo que necessite acompanhar as mudanças de forçamento oriundas da natureza com o objetivo de variar sua frequência de ressonância rapidamente não é um método apropriado. Uma forma mais eficiente de promover a mudança de frequência de ressonancia consite em utilizar uma mola que seja capaz de alterar assuas característica mecânicas de modo a pode assumir configurações similares às apresentadas neste item sem a necessidade da troca do elemento. Os materiais com memória de forma atendem essa demanda. Assim, foram desenvolvidos experimentos com molas de SMA com o objetivo de avaliar o seu desempenho no sistema proposto.

V.2 Resultados com molas de SMA

Uma nova abordagem foi utilizada para explorar os efeitos da adição de molas de SMA ao sistema em questão. As molas de aço foram substituídas pelas molas apresentadas na seção IV.5.2. Para uma melhor identificação dos efeitos ocasionados pelas molas de SMA e um maior controle do forçamento de excitação do sistema, alguns parâmetros foram modificados outra metodologia foi adotada. Inicialmente, a taxa de avanço do *shaker* foi modificada de 1 Hz/s para 0,1 Hz/s. Em segundo lugar, a faixa de frequências a serem varridas foi modificada de 50 a 100 Hz para de 65 a 75 Hz, dando maior enfoque na região de ressonância do dispositivo. Por fim, as acelerações de forçamento de excitação foram aumentadas de 2 e 6 m/s² para 6 e 9,8 m/s². A pré-extensão utilizada nos ensaios tanto com mola pseudoelástica quanto mola de memória de forma pode ser visualizada na Tabela 18. Os testes foram realizados para 4 condições de corrente elétrica diferentes. 0,0 A, 0,5 A, 1,0 A e 1,5 A onde 0,0 A indica a mola de SMA a temperatura ambiente.

Para garantir condições iniciais similares nas molas, antes do início de qualquer teste, estas são submetidas a uma condição livre de carregamento mecânico (tensão igual a zero) e uma corrente de 1,0 A durante um intervalo de 60 s conforme adotado por AGUIAR, (2011). Em seguida uma etapa de resfriamento de 5 minutos foi utilizada para que a temperatura da mola entrasse em equilíbrio com a temperatura ambiente do laboratório sem utilizar nenhuma fonte de resfriamento extra. Procura-se com este processo homogeniar a estrutura cristalina do material.

Os testes foram feitos com temperatura ambiente do laboratório entre 24 ºC e 26 ºC controlada pelo ar condicionado do laboratório e medida com um termopar. Em seguida, acoplou-se a mola ao sistema através dos olhais de fixação e, adotando o mesmo procedimentos inicial, uma corrente de 1,0 A foi aplicada por 60 segundos e, posteriormente, foi estabelecido um intervalo de resfriamento de 5 minutos antes de iniciar o teste na condição de 0,0 A. O teste para uma condição de corrente elétrica foi executado 3 vezes consecutivas e então finalizado. Sem remover a mola do sistema, novamente a mola foi submetida a uma corrente de 1,0 A durante

60 s e ao mesmo intervalo de resfriamento. Só então passou-se para a condição seguinte de 0,5 A de corrente elétrica na mola sendo o mesmo procedimento aplicado aos 3 testes consecutivos realizados. Novamente a mola foi submetida a corrente de 1,0 A por 60 s sem ser removida do sistema e, em seguida, ao mesmo intervalo de resfriamento, antes de mudar para a condição de corrente elétrica seguinte. Utilizando agora uma corrente de 1,0 A, o teste foi realizado 3 vezes consecutivas novamente e o mesmo procedimento de aquecimento e resfriamento foi utilizado antes de comeceçar os 3 testes na condição final de 1,5 A. Então a mola era removida, aquecida com 1,0 A de corrente elétrica e resfriada novamente com um intervalo de resfriamento de 5 minutos dando fim ao teste com uma mola. Este procediento foi repetido para a mola seguinte totalizando 24 testes para cada mola e 48 testes no total com molas de SMA.

As curvas apresentadas nesta seção também são curvas médias de todos os testes realizados. Novamente, um estudo estatístico é apresentado, mostrando o erro padrão e o desvio padrão entre os três testes realizados para cada condição no ponto de pico de ressonância de cada curva. Tanto o erro quanto o desvio padrão foram calculados do mesmo modo que no item IV.3 pelo próprio programa de análise de dados (*Origin Lab*). A Tabela 18 apresenta as características da mola e da pré-extensão aplicada as molas peseudoelásticas e as com efeito memória de forma.

Tabela 18 - Comprimento original, comprimento final e pré-extensão das molas de SMA

Mola	**Comprimento Original**	**Comprimento Final**	**Pré-extensão**
Mola Pseudoelástica	22 mm	65 mm	42 mm
Mola com Efeito Memória de Forma	25 mm	65 mm	45 mm

A seguir, são apresentados os resultados obtidos nos ensaios com molas de SMA, bem como os valores máximos médios dos picos de ressonância, o valor da frequência em que eles ocorreram, o desvio padrão e o erro padrão anteriormente citados (Tabela 19 - 23). Novamente, as curvas são médias e envoltórias dos resultados obtidos.

V.2.1 Resultados com Mola Pseudoelástica

A Figura V.5 e a Figura V.6 mostram os resultados obtidos quando a mola pseudoelástica à temperatura ambiente foi acoplada ao sistema em questão para acelerações de excitação de base de 6 e 9,8 m/s² respectivamente.

Inicialmente, para as condições descritas, o aumento de temperatura não se mostra muito eficiente. Tanto para o caso de 6 m/s² quanto 9,8 m/s², conforme a temperatura aumenta, as amplitudes dos picos de tensão elétrica e de deslocamento da viga caem em relação à mola a temperatura ambiente. Há uma queda de tensão de aproximadamente 0,15 V o que representa 5,05 % entre a mola submetida a 0,0 A e 1,5 A para o caso de 6 m/s² e 0,51 V - 9,96 % para o caso de 9,8 m/s². Com a mola pseudoelástica, há uma variação de frequência natural aferida pelo experimento entre 0,06 Hz (caso de 0,5 A e 1,5 A) para 6 m/s² e 0,18 Hz (caso 0,0 A e 1,5 A) para 9,8 m/s².

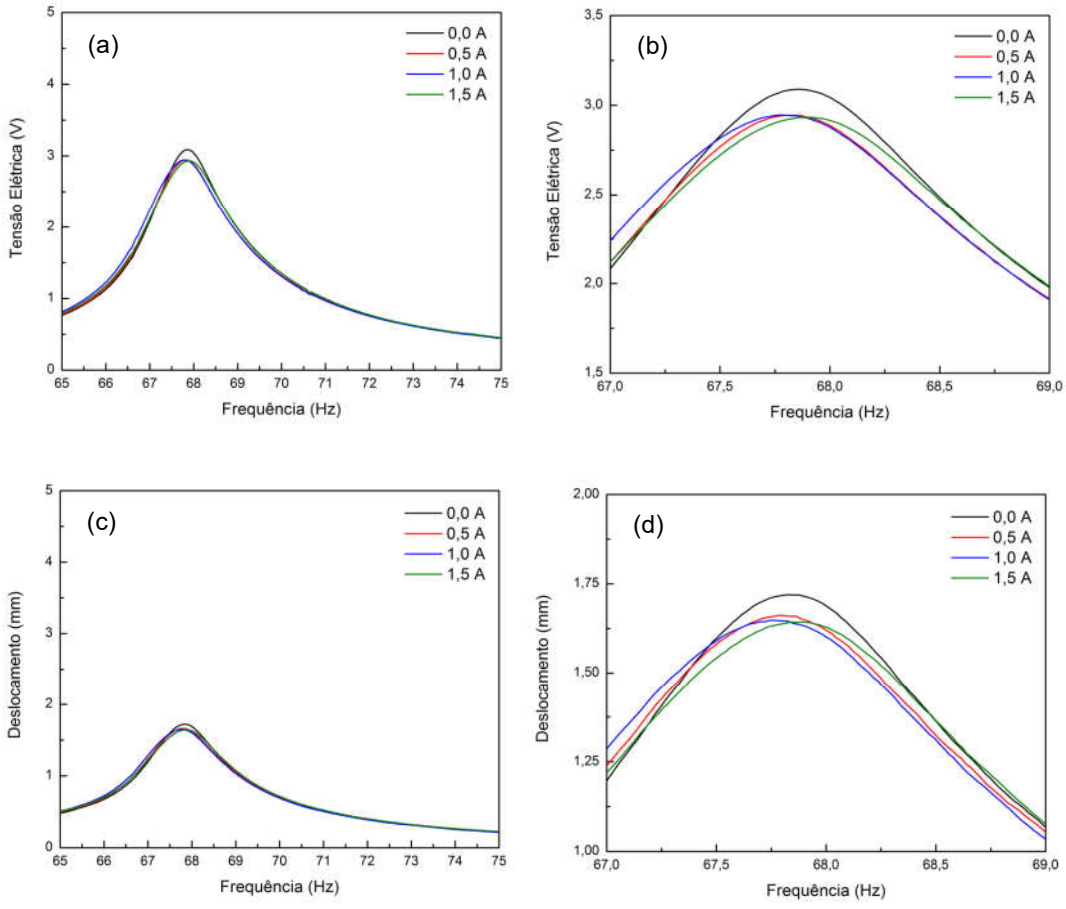


Figura V.5 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura "*a*". (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura "*c*". Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s².

Tabela 19 – Tensão Elétrica média no ponto máximo de ressonância – 6 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Tensão Elétrica (V)	Desvio Padrão (V)	Erro
0,0	67,854	3,089	0,019	0,011
0,5	67,840	2,944	0,004	0,002
1,0	67,786	2,945	0,003	0,001
1,5	67,908	2,933	0,023	0,013

Tabela 20 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 6 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
0,0	67,832	1,719	0,004	0,002
0,5	67,799	1,661	0,002	0,001
1,0	67,744	1,6477	0,017	0,010
1,5	67,847	1,642	0,010	0,005

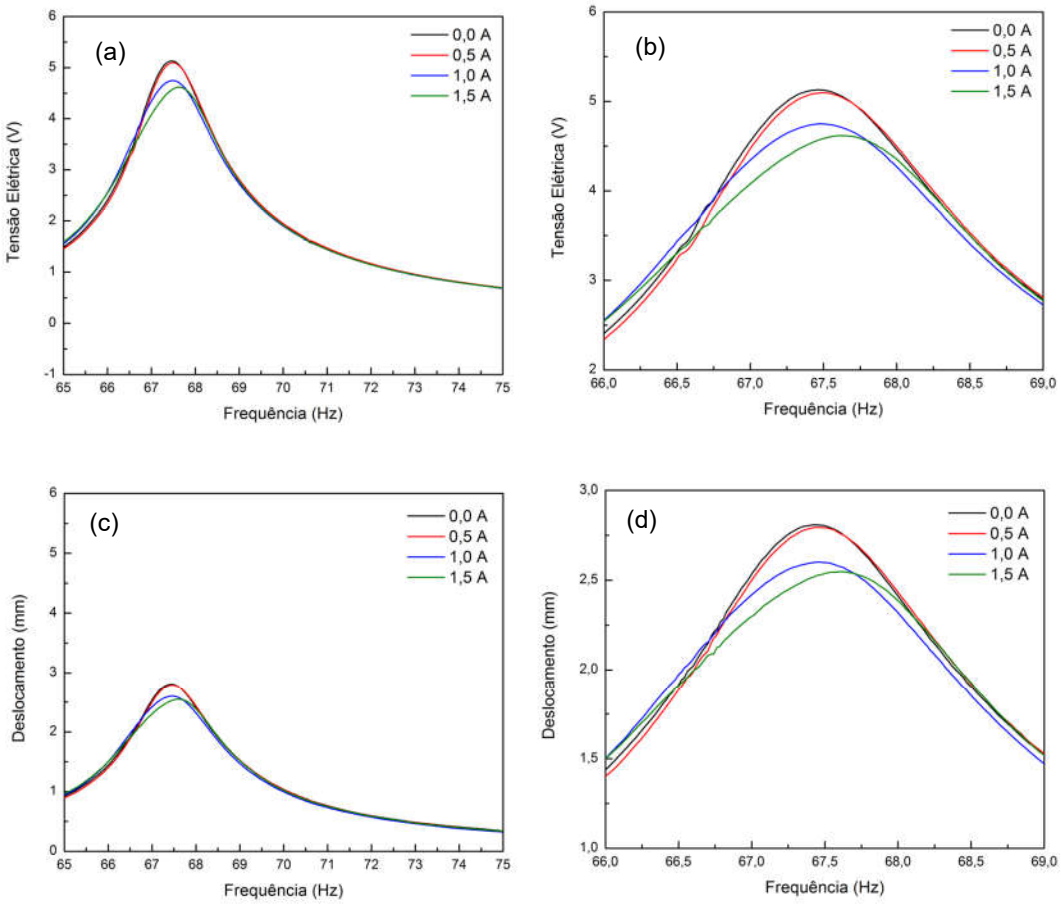


Figura V.6 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura “a”. (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura “c”. Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 9,8 m/s².

Tabela 21 – Tensão Elétrica média no ponto máximo de ressonância – 9,8 m/s²

Corrente Elétrica (A)	**Frequência de Ressonância (Hz)**	**Tensão Elétrica (V)**	**Desvio Padrão (V)**	**Erro**
0,0	67,462	5,129	0,030	0,017
0,5	67,524	5,090	0,017	0,010
1,0	67,482	4,750	0,130	0,075
1,5	67,647	4,618	0,002	0,001

Tabela 22 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 9,8 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
0,0	67,421	2,808	0,012	0,007
0,5	67,482	2,790	0,011	0,006
1,0	67,462	2,601	0,071	0,041
1,5	67,647	2,547	0,004	0,003

Para os valores de amplitude de vibração utilizados, o sistema apresenta resultados bastante parecidos para qualquer valor de temperatura explorado. Esses resultados são coerentes aos encontrados por SILVA et al., (2015) e podem ser visualizados na Figura V.7. Caso as transformações de fase sejam quase completas para as diferentes temperaturas do ensaio, os ciclos de histerese possuem áreas similares causando dissipações semelhantes, além disso, os valores de rigidez também variam pouco. Em outras paravas, durante os carregamentos cíclicos, ocorre a transformação defase de austenita (A) para martensita induzida por tensão (M^+). Assim, existem efeitos acoplados de mudança de rigidez e alteração de dissipação semelhantes.

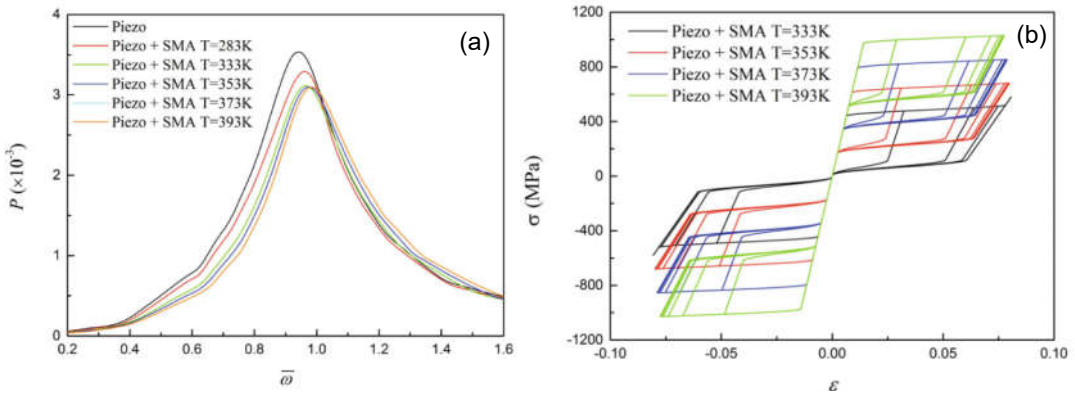


Figura V.7 – (a) Curva Potência x frequência de oscilação. (b) Curvas tensão – deformação em diferentes temperaturas para um valor de frequência angular adimensionalizado ($\bar{\omega}$). Encontrados em SILVA et al., (2015).

V.2.2 Resultados com Mola Efeito Memória de Forma

Para uma mola martensítica que apresenta o efeito memória de forma à temperatura ambiente, conforme a temperatura aumenta, a martensita não maclada, gerada por tensão, se transforma em austenita. Isto acarreta mudança da dissipação do sistema, uma vez que a porcentagem de martensita está diminuindo, mas também um aumento de rigidez, já que a porcentagem de austenita está aumentando e seu módulo de elasticidade é maior que o da martensita ($E_A > E_M$). Esta disputa entre aumento de rigidez e dissipação influenciam a resposta do sistema.

Na Figura V.8, que mostram resultados para a condição de 6 m/s², observa-se que o aumento da corrente elétrica para 0,5 A, promove um aumento de amplitude de tensão elétrica de 0,21 V – 5,76 % e uma pequena variação na frequencia de ressonância de 0,07 Hz. Este comportamento indica que ocorreu uma redução na dissipação. Em seguida, com 1,0 A, observa-se um aumento maior na rigidez, o que ocasionou uma mudança da frequência de ressonância em 0,363 Hz , além de um aumento na amplitude de 0,366 V – 9,48 %. Ao aplicar a corrente de 1,5 A, a frequência de ressonância aumenta mais 0,571 Hz em relação à anterior e a amplitude da tensão elétrica aumenta 0,181 V – 4,28 % em relação à anterior. Assim, houve uma variação de frequência de 0,93 Hz (de 0,5 A para 1,5 A) e um aumento de amplitude de 0,36 V – 20,95 % total para o caso de 6 m/s².

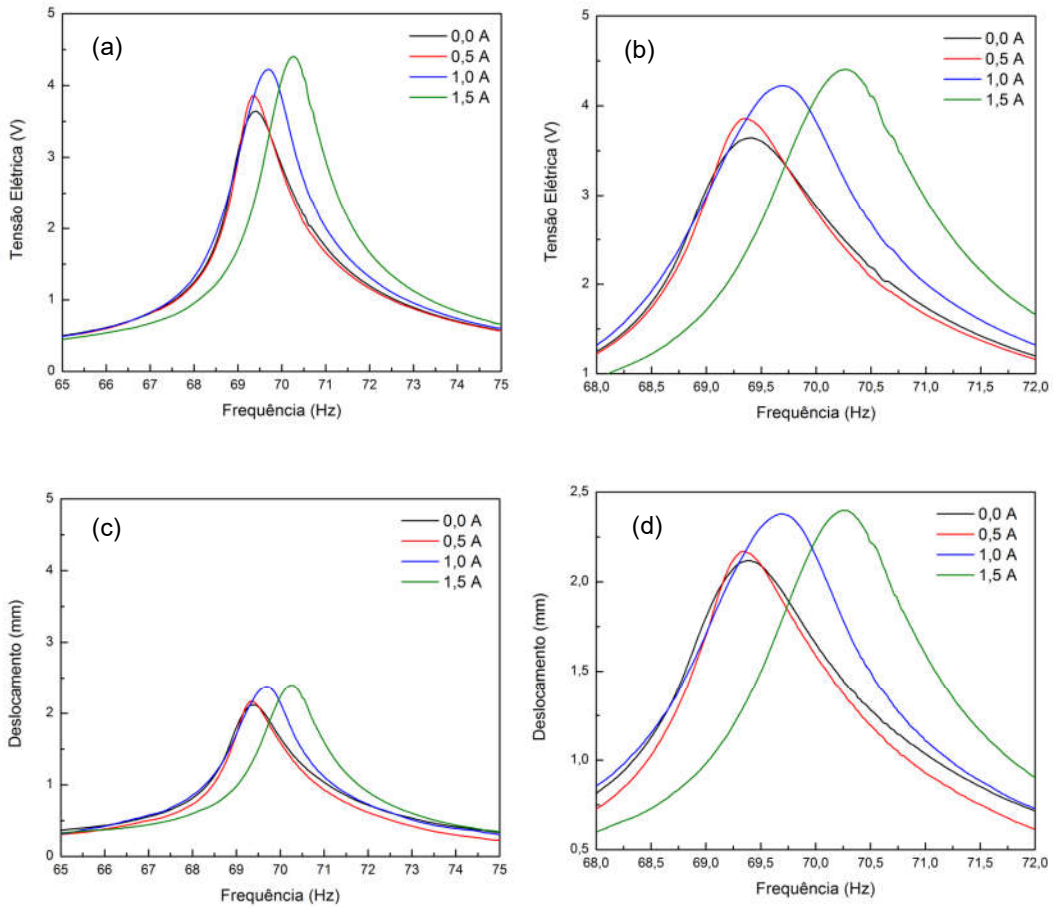


Figura V.8 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura “a”. (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura “c”. Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 6 m/s².

Tabela 23 – Tensão Elétrica média no ponto máximo de ressonância – 6 m/s²

Corrente Elétrica (A)	**Frequência de Ressonância (Hz)**	**Tensão Elétrica (V)**	**Desvio Padrão (V)**	**Erro**
0,0	69,409	3,642	0,032	0,018
0,5	69,334	3,858	0,039	0,023
1,0	69,697	4,224	0,019	0,011
1,5	70,268	4,405	0,014	0,008

Tabela 24 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 6 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
0,0	69,409	2,117	0,013	0,007
0,5	69,354	2,170	0,063	0,036
1,0	69,677	2,379	0,050	0,028
1,5	70,248	2,398	0,031	0,018

Na Figura V.9, que mostra a resposta para o sistema excitado com 9,8 m/s², percebe-se para o caso 0,5 A que ocorre uma leve mudança do pico de ressonância para um valor menor do que na condição da mola sem corrente e um pequeno aumento da amplitude de tensão elétrica gerada. Este mudou de 69,460 Hz (0,0 A) para 69,347 Hz (0,5 A) acarrentando um aumento de 0,089 V e 1,62 % na tensão elétrica e um recuo da frequência de ressonância de 0,113 Hz. Em seguida, com 1,0 A, a frequência natural do sistema assume um valor maior que o observado para 0,0 A e ainda maior que 0,5 A, indo para 69,717 Hz e a tensão máxima fica em 5,563 V, o que representa uma queda de 0,005 V - 0,08 %, ou seja, muito pouco em relação à condição anterior, mostrando mais expressivamente uma varição de frequência de ressonância apenas. Com o aumento da corrente elétrica para 1,5 A, a frequência de ressonância continua aumentando e o pico de tensão elétrica também. O valor da frequência de ressonância aumenta em 0,51 Hz – 0,73 % e o máximo de voltagem sofre um amunento de 0,575 V e 10,33 %. Nesta condição de excitação da base, a variação total de frequência de ressonância foi de 0,88 Hz e o aumento de amplitude de tensão elétrica foi de 0,659 V e 12,027 %.

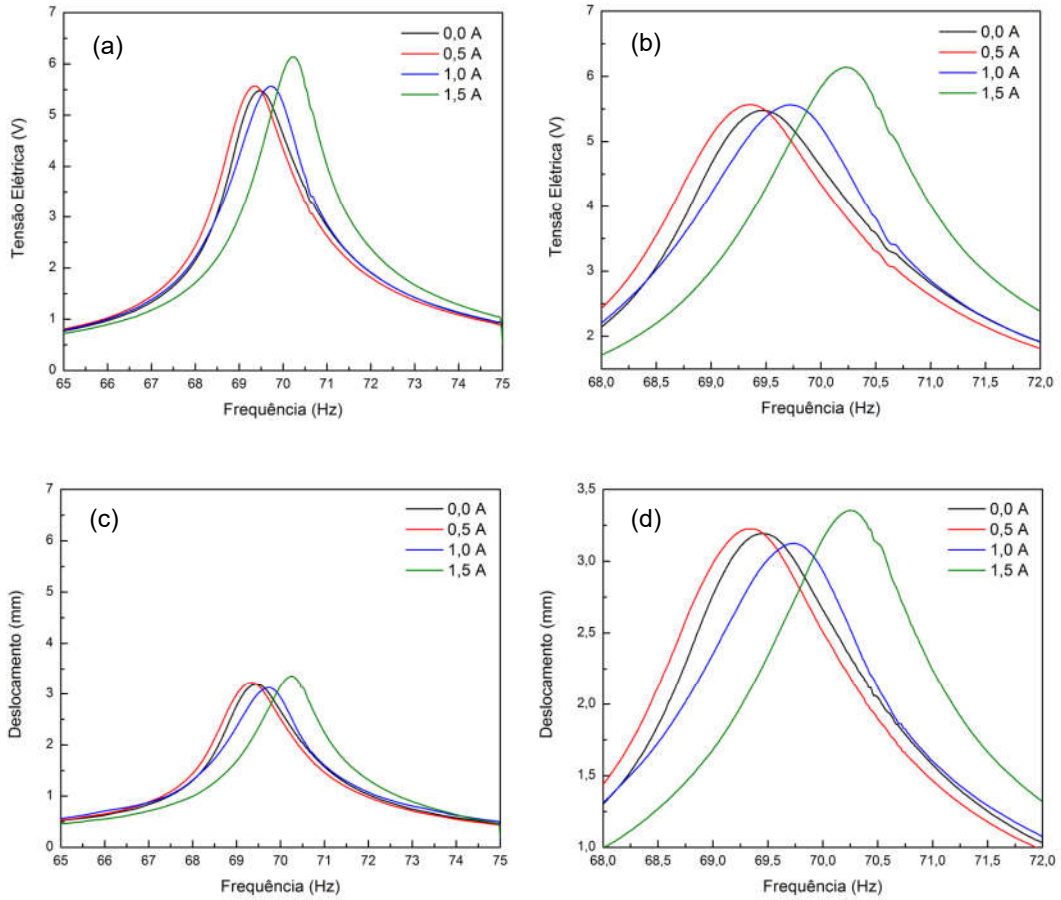


Figura V.9 – (a) Amplitude da tensão elétrica. (b) Zoom da Figura “a”. (c) Amplitude do deslocamento da extremidade da viga. (d) Zoom da Figura “c”. Todos em função da frequência de excitação. Amplitude de aceleração da base de 9,8 m/s².

Tabela 25 – Tensão Elétrica média no ponto máximo de ressonância – 9,8 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Tensão Elétrica (V)	Desvio Padrão (mm)	Erro
0,0	69,460	5,479	0,008	0,005
0,5	69,347	5,568	0,010	0,006
1,0	69,717	5,563	0,019	0,011
1,5	70,227	6,138	0,027	0,016

Tabela 26 - Deslocamento médio no ponto máximo de ressonância – 9,8 m/s²

Corrente Elétrica (A)	Frequência de Ressonância (Hz)	Deslocamento (mm)	Desvio Padrão (mm)	Erro
0,0	69,460	3,194	0,001	0,001
0,5	69,326	3,226	0,006	0,003
1,0	69,737	3,124	0,046	0,026
1,5	70,247	3,354	0,007	0,004

Como mostrado em SILVA et al., (2015), para um elemento de memória de forma submetido a uma excitação de base suficiente para transformações de fase incompletas, o aumento da temperatura pode promover aumento das tensões críticas associadas ao processo de transformação de fase. SILVA et al., (2015), mostram através de simulações numéricas que o aumento de temperatura em uma mola pseudoelástica, pode promover aumento nos valores de tensões críticas de transformação de fase e consequentemente os laços de histerese ficam mais curtos para um mesmo carregamento mecânico pois posicionam a curva tensão x deformação em posições acima de uma associada a uma condição de menor temperatura. Os resultados encontrados em SILVA et al., (2015) para estas condições podem ser vistos novamente na Figura V.10 (a) e os laços de histerese incompletos na Figura V.10 (b) e assemelham-se com os apresentados nesta seção.

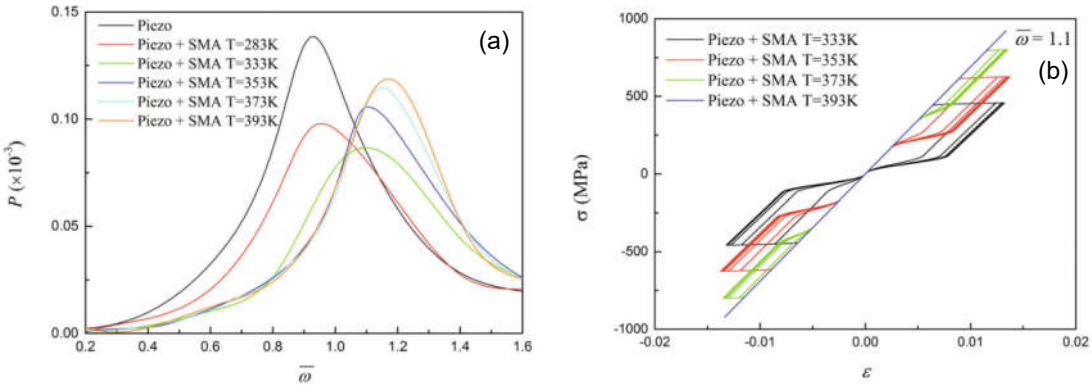


Figura V.10 – (a) Curva Potência x frequência de oscilação. (b) Laços de histerese para as condições citadas. Encontrados em SILVA et al., (2015).

Provavelmente, com o uso de uma corrente elétrica ainda maior que 1,5 A, a mola alcançaria um nível em que esta trabalharia apenas no regime elástico da fase austenítica e não apresentaria mais mudança da frequência natural medida nas curvas de tensão elétrica e deslocamento para temperaturas maiores, uma vez que a tensão crítica de início da transformação assumiria um valor muito além do carregamento em que a mola está sendo submetida.

A Figura V.11 faz uma comparação dos resultados obtidos para Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma para a condição 0,0 A e resultados obtidos para diferentes correntes elétricas ambos para uma aceleração da base de 6 m/s². Pode-se notar que, caso fosse possível implementar um sistema de controle ativo capaz de reconhecer as frequências de forçamento das quais o dispositivo é submetido e aquecer a Mola com Efeito Memória de Forma, seria possível mudar o sistema da condição marcada no ponto verde (aproximadamente 2,488 V) para a condição ótima de máxima geração de energia da curva com a mola de SMA, o que representa 4,405 V que ocorre em 70,268 Hz. Um aumento de aproximadamente 77 % é alcançado.

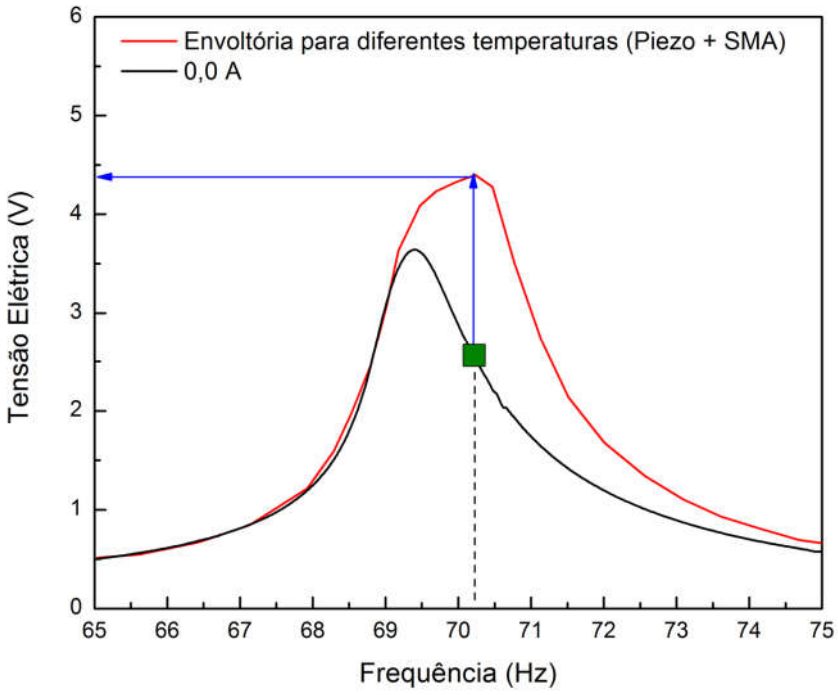


Figura V.11 - Comparação do sistema Piezo + Mola Efeito Memória de forma para condição 0,0 A e envoltória para as correntes utilizadas.

Já a Figura V.12 mostra uma comparação da curva Viga Piezo (apresentada no item V.1) com a curva da Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma para todas as temperaturas utilizadas a partir de um critério de largura de banda. Definiu-se como critério pontos onde 50% do total de tensão elétrica para cada caso foi analisado. Também foi definido como Δf_L a largura de banda para este critério de um dispositivo linear (Viga Piezo) e Δf_{NL} a largura de banda de um

dispositivo não linear (Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma). Pode-se notar que enquanto o dispositivo Viga Piezo varia de 67,747 Hz para 69,652 Hz totalizando Δf_L = 1,905 Hz o dispositivo Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma que varia entre 68,651 Hz e 71,501 Hz totalizando Δf_{NL} = 2,850 Hz. Assim, pode-se dizer que houve um aumento de aproximadamente 50% da faixa de frequência operacional do sistema, tornando-o um banda-larga.

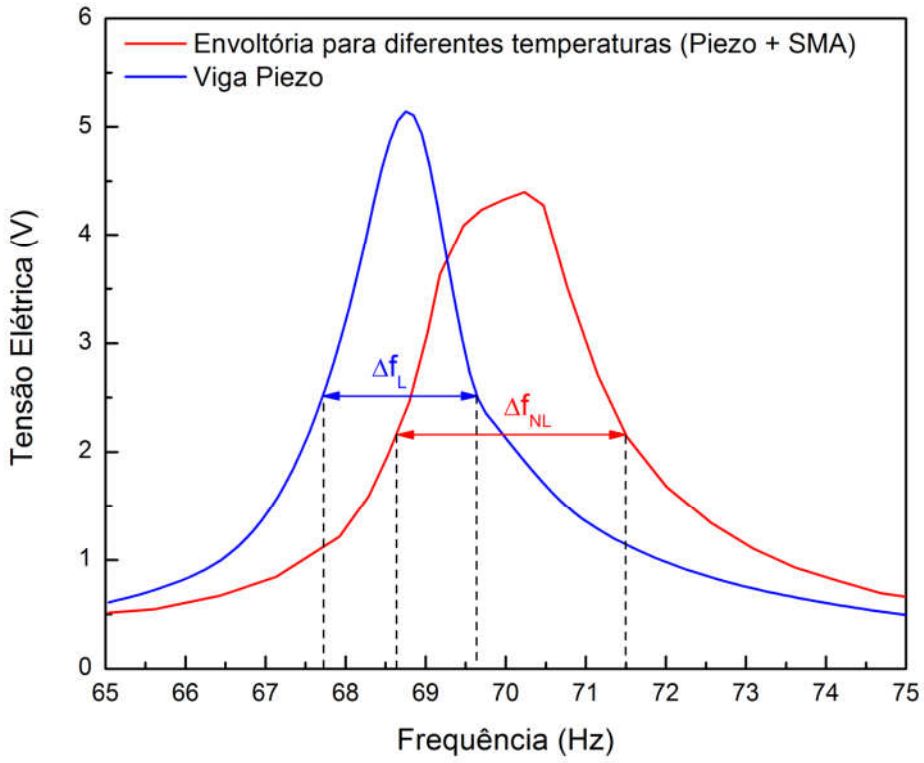


Figura V.12 - Comparação da faixa de frequência: Viga Piezo e Viga Piezo Mola Efeito Memória de Forma.

VI - Conclusões

A tecnologia chegou a uma fase que deve-se levar em conta não só sua performance, mas também sua economia e relação com o meio ambiente. A geração de energia limpa através de piezelétricos é responsável por um grande percentual no meio de geração de energia limpa devido a sua alta densidade de potência para uma ampla faixa de tensão elétrica. Algumas fontes de excitação encontradas na natureza são: vento, maré, chuva, e outros relacionados ao corpo humano que também são potenciais fontes de vibrações. Os materiais piezelétricos se encaixam perfeitamente neste cenário devido a seu acoplamento eletromecânico e o efeito piezelétrico direto que converte uma deformação mecânica em tensão elétrica. Entretanto, instabilidades nos níveis de frequências de oscilação são encontrados nas vibrações mecânicas disponíveis na natureza. Assim, foi criado um experimento com o objetivo de variar as frequências naturais de um sistema dinâmico e aumentar a faixa de operação e a eficiência de um dispositivo piezelétrico de conversão de energia mecânica em energia elétrica mesmo quando excitado por diferentes frequências.

A maneira utilizada para promover características de mudança de faixa de operação foi a adição de uma mola feita de liga de memória de forma e explorar seus efeitos de pseudoelasticidade e memória de forma. Estes efeitos estão associados a transformação de fase de austenita para martensita e vise e versa que promovem uma mudança da rigidez da liga quando submetida a um carregamento térmico ou mecânico.

Diversos autores publicaram trabalhos sobre geração de energia através de materiais piezelétricos. Uma revisão bibliográfica foi apresentada mostrando experimentos capazes de converter vibrações mecânicas em energia elétrica utilizando piezeletricidade. Alguns autores exploraram fenômenos não lineares associados a dispositivos piezelétricos mostrando a capacidade deste dispositivo aumentar sua eficiência em determinadas condições. Este trabalho explorou fenômenos lineares e não lineares associados a molas de aço e molas de ligas com memória de forma respectivamente. Foi apresentado uma fundamentação teórica seguida de uma metodologia onde os principais equipamentos utilizados no experimento e alguns resultados iniciais são citados para descrição do experimento.

Os resultados experimentais foram apresentados junto de uma discussão sobre o comportamento do sistema com diferentes níveis de vibração. Inicialmente foi ensaiado o comportamento de uma viga de alumínio acoplada a um equipamento de excitação eletromecânico (*shaker*) na tentativa de reproduzir a configuração de "*cantilever beam*", modo amplamente estudado para geração de energia através de dispositivos piezelétricos. Em seguida, adicionou-se a viga simples um elemento piezelétrico, o que ocasionou uma queda de

amplitude de deslocamento da extremidade livre da viga e uma redução da frequência natural do sistema.

Molas de aço foram adicionadas com o objetivo de mudar a frequência natural do sistema. Constatou-se que a adição de molas de aço, são capazes de aumentar a rigidez do sistema, deslocando o valor de frequência natural para um valor acima do valor sem a mola. Em consequência ao aumento da rigidez, a amplitude de deslocamento da extremidade livre da viga também diminui ocasionando em termos absolutos, menos energia gerada. Entretanto, a mudança de frequência natural pode levar o sistema a, comparativamente, gerar mais energia se submetido a uma determinada frequência de oscilação diferente da ótima para a configuração anterior. Quanto maior a rigidez da mola de aço adicionada, maior a mudança da frequência de ressonância e da faixa de operação do sistema.

A adição de uma mola de SMA que apresente o efeito pseudoelástico para as condições apresentadas, não se mostrou muito eficiente, visto que a mudança de temperatura quando nela imprimida, não causou maiores mudanças da frequência natural e ainda diminuiu a amplitude de energia gerada. Já a mola com efeito de memória de forma obteve melhor desempenho fazendo o valor da frequência variar para valores maiores que o da mola a temperatura ambiente e em alguns casos levemente para um valor menor. Esta mudança da frequência natural ainda promoveu um aumento da amplitude de tensão elétrica. Os resultados experimentais aqui apresentados corroboram qualitativamente com resultados numéricos publicados por outros autores.

Como os efeitos de pseudoelásidade e de memória de forma estão associados a um carregamento mecânico e consequentemente a uma amplitude de deslocamento da qual a mola está submetida, constatou-se que para as molas utilizadas, os deslocamentos aferidos poderiam ser aumentados. Contudo, caso fosse implementado um sistema de controle ativo de temperatura através do reconhecimento dos padrões de forçamento, seria possível promover um aumento da energia total gerada. Uma comparação de um sistema linear (Viga Piezo) e um sistema não linear (Viga Piezo Molas Efeito Memória de forma) foi feita mostrando que há também um aumento na largura de banda do sistema.

Os resultados experimentais indicam que a utilização de materiais inteligentes para geração de energia elétrica é vasto e ainda há muito o que se desenvolver. Uma maior compreensão sobre os fenômenos não lineares dos materiais pode levar a construção de experimentos capazes de gerar mais energia e mudar sua faixa de operação dinamicamente.

VI.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, alguns temas podem ser explorados e desenvolvidos para aprofundamento deste projeto:

- Aprimorar o aparato experimental, promovendo maiores deformações nas molas de SMA acarretando maior destaque nos efeitos não lineares dos dispositivos piezelétricos para geração de energia acoplados a elementos com memória de forma.

- Utilização de um transdutor de força dinâmica na extremidade da mola para obtenção das curvas *força x deslocamento* do elemento de SMA. Ou um experimento que caracterize as molas dinamicamente poderia contribuir para um maior entendimento do estado da mola nessas condições de força e temperatura.

- Explorar diferentes processos de fabricação de molas de SMA para maior controle das propriedades termomecânicas.

- Desenvolvimento de um modelo numérico baseado em elementos finitos para explorar a influência de diferentes parâmetros na dinâmica do sistema.

- Desenvolvimento de um modelo para controle ativo automático de aquecimento dos componentes de SMA em função do reconhecimento da frequência de vibração do ambiente.

VII - Referências Bibliográficas

AGUIAR, R. A. A. DE, SAVI, M. A. e PACHECO, P. M. C. L. 2012. Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems.* 2012.

Aguiar, Ricardo Alexandre Amar de. 2011. *Análise da redução de vibrações em sistemas mecânicos utilizando ligas com memória de forma.* Tese de Doutorado, Rio de Janeiro : COPPE UFRJ, 2011.

AJITSARIA, J., et al. 2006. Modeling and analysis of a bimorph piezoelectric cantilever beam for voltage generation. 2006.

ANTON, STEVEN R e SODANO, HENRY A. 2007. A review of power harvesting using piezoelectric materials (2003–2006). *Smart Materials and Structures.* Maio de 2007, pp. 16 (2007) R1–R21.

APC International Ltd. 2011. *Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications.* s.l. : APC International Ltd, 2011.

BAI, YANG, MEGGS, CARL e BUTTON, TIM W. 2014. Investigation of Using Free-Standing Thick-Film Piezoelectric Energy Harvesters to Develop Wideband Devices. *International Journal of Structural Stability and Dynamics.* 14, 2014, Vol. 1440016.

Beeby, S.P., Tudor, M.J. e White, N.M. 2006. Energy Harvesting Vibration Sources for Microsystems Applications. *Measurement Science and Technology.* 2006, pp. 17, pp. R175-R195.

Brinson, L. C. 1993. One-Dimensional Constitutive Behavior of Shape Memory Alloys: Thermomechanical Derivation with Non-Constant Material Functions and Redefined Martensite Internal Variable. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures .* 1993.

COOK-CHENNAULT, K A, THAMBI, N. e SASTRY, A.M. 2008. Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems. *Smart Material and Structure.* 2008, p. 17 (2008) 043001 (33pp).

CRAWLEY, EDUWARD F. e ANDERSON, ERIC H. 1990. Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams. *Journal of Intelligent Material System and Structures.* 1990.

DA HORA, R.B., et al. 2013. Modeling pseudoelastic vibration attenuators elements using the finit element method. *International Congress of Mechanical Engineering (COBEM).* 2013.

da Hora, Rodolpho Barbosa, et al. 2014. ANALYSIS OF THE PSEUDOELASTIC BEHAVIOR OF HELICAL SPRING ATTENUATORS USING THE FINITE ELEMENT METHOD. *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica.* 2014.

DAGDEVIREN, CANAN, et al. 2014. Conformal piezoelectric energy harvesting and storage from motions of the heart, lung, and diaphragm. *PNAS.* 2014.

de PAULA, ALINE S., INMAN, D. J. e SAVI, M. A. 2015. Energy harvesting in a nonlinear piezomagnetoelastic beam subjected to random excitation. *Mechanical Systems and Signal Processing.* 54, 2015, Vol. 405.

DYNALLOY. 2015. Dynalloy, Inc. [Online] Dynalloy, 2015. [Citado em: 6 de Outubro de 2015.] http://www.dynalloy.com/.

ERTRUK, ALPER e INAMN, D. J. 2011. *Piezoelectric Energy Harvesting.* 2011.

ERTRUK, ALPER. 2009. *Electromechanical Modeling of Piezoelectric Energy Harvesters.* Blacksburg : s.n., 2009.

ERTURK, A. e INMAN, D. J. 2009. An experimentally validated bimorph cantilever model for piezoelectric energy harvesting from base excitations. 2009.

FERNANDES, FRANCISCO MANUEL BRAZ. 2006. *LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.* Lisboa : s.n., 2006.

GRANSTORM, JONATHAN, et al. 2007. Energy harvesting from a backpack instrumented with piezoelectric shoulder straps. *Smart Materials and Structures.* 2007.

2014. http://www.mide.com/. *Midé Engineering Solutions.* [Online] Midé Technology Corporation, 2014.

http://www.sandinox.com.br/. 2016. Sandinox Biomateriais. *Sandinox.* [Online] Sandinox Biomateriais, 2016. http://www.sandinox.com.br/.

HU, YUANTAI, et al. 2006. Nonlinear Behavior of a Piezoelectric Power Harvester near Resonance. *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control.* 2006, pp. vol. 53, no. 7.

ILYAS, MOHAMMAD ADNAN e SWINGLER, JONATHAN. 2015. Piezoelectric energy harvesting from raindrop impacts. *Energy.* 2015.

INMAN, D.J., SODANO, H. A. 2005. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. 2005.

KIM, G. W. 2014. PIEZOELECTRIC ENERGY HARVESTING FROM TORSIONAL VIBRATION IN INTERNAL COMBUSTION ENGINES. *International Journal of Automotive Technology.* 2014.

KIM, MISO, et al. 2010. Modeling and experimental verification of proof mass effects on vibration energy harvester performance. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES.* 16 de March de 2010.

LA CAVA, CARLOS AMÉRICO PANISSET LANHA, EDUARDO PRIETO SSILVA, LUCIANO GUIMARÃES MACHADO. 1999. *MODELAGEM DE DISPOSITIVOS MECÂNICOS FABRICADOS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.* Trabalho de conclusão de curso, Rio de Janeiro : CEFET - Maracanã, 1999.

LAGOUDAS, DIMITRIS C. 2008. *Shape Memory Alloys Modeling and Engineering Applications.* Nova Iorque : Springer Science, 2008.

LEO, DONALD J. 2007. *ENGINEERING ANALYSIS OF SMART MATERIALS SYSTEMS.* Virgínia : John Wiley & Sons, Inc., 2007.

LESTER, BRIAN T. , THEOCHARIS BAXEVANIS, YVES, CHEMISKY, DIMITRIS C. LAGOUDAS. 2015. Review and Perspectives: Shape Memory Alloy Composite Systems. 2015.

LESTER, BRIAN T., et al. 2015. Review and Perspectives: Shape Memory Alloy Composite Systems. *Acta Mechanica.* 12, 2015, Vol. 226.

MANN, B. P. e SIMS, N. D. 2009. Energy harvesting from the nonlinear oscillations of magnetic levitation. *Journal of Sound and Vibration.* 319, 2009, Vol. 515.

MINETO, ANDREZA TANGERINO. 2013. *GERAÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DA VIBRAÇÃO ESTRUTURAL DE DISPOSITIVOS PIEZELÉTRICOS NÃO LINEARES.* São Carlos, SP : s.n., 2013.

MITCHESON, P.D., et al. 2004. MEMS electrostatic micropower generator. *Sensors and Actuators.* 115, 2004, Vols. 523–529.

NABAWY, MOSTAFA R. A. e CROWTHER, WILLIAM J. . 2016. Dynamic Electromechanical Coupling of Piezoelectric Bending Actuators. *Micromachines.* 7(1), 2016, Vol. 12.

NGUYEN, SON D., HALVORSEN, EINAR e PAPROTNY, IGOR. 2013. Bistable springs for wideband microelectromechanical energy harvesters. *Applied Physics Letters.* 102, 2013, Vol. 023904.

PAIVA, ALBERTO e SAVI, MARCELO AMORIM. 2006. An overview of constitutive models for shape memory alloys. *Mathematical Problems in Engineering.* 1, 2006.

PAIVA, ALBERTO. 2004. *Modelagem do comportamento termomecânico das ligas com memória de forma.* Tese de Doutorado, Rio de Janeiro : PUC/RIO, 2004.

PEREIRA, JULIANA. 2009. *Um estudo termomecânico em atuadores com ligas com memória de forma.* Rio de Janeiro : CEFET - Maracanã, 2009.

PiezoSystems. 2016. Vibration Energy Harvesting With Piezoelectrics. *http://www.piezo.com/.* [Online] Piezo Systems, INC., 2016. http://www.piezo.com.

Riagusoff, Ivan Ivanovitsch Thesi. 2012. *ESTUDO DE DISPOSITIVOS PSEUDOELÁSTICOS PARA A APLICAÇÃO EM ATENUADORES DE VIBRAÇÃO.* Dissertação de Mestrado, Rio de Janeiro : CEFET - Maracanã, 2012.

ROCHA, J. G., et al. 2010. Energy Harvesting From Piezoelectric Materials Fully Integrated in Footwear. *IEEE.* 2010.

ROUNDY, S. e WRIGTH, P. K. 2004. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. *Smart Materials and Structures.* 5, 2004, Vol. 13.

SHIGLEY, JOSEPH E., MISCHKE, C. R. e BUDYNAS, R. G. 7º Ed.. *Elementos de Máquinas de Shigley.* s.l. : Bookman, 7º Ed.

Silva, H. R., et al. 2007. Wireless Hydrotherapy Smart-Suit Network for Posture. *Proc IEEE. International Symposium on Industrial.* 2007.

SILVA, L.L., et al. 2015. SYNERGISTIC USE OF SMART MATERIALS FOR VIBRATION-BASED ENERGY HARVESTING. *THE EUROPEAN PHYSICAL JOURNAL SPECIAL TOPICS.* 2015.

SILVA, LUCIANA L., et al. 2015. On the Nonlinear Behavior of the Piezoelectric Coupling on Vibration-Based Energy Harvesters. *Shock and Vibrations.* 2015, Vol. 2015.

SODANO, H. A., INMAN, D.J. 2007. A Review of Power Harvesting from Vibration using Piezoelectric Materials (2003 - 2006). *Smart Materials and Structures.* 2007, Vol. v.36(3), p.197-205.

SODANO, H. A., PARK, G. e INMAN, D. J. 2004. Estimation of Electric Charge Output for Piezoelectric Energy Harvesting. 2004.

SODANO, HENRY A., INMAN, DANIEL J. e PARK, GYUHAE. 2005. Comparison of Piezoelectric Energy Harvesting Devices for Recharging Batteries. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2005.

SODANO, HENRY A., LIOYD, JUSTIN e INMAN, DANIEL J. 2006. An experimental comparison between several active composite actuators for power generation. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES.* 2006.

STANTON, SAMUEL C., et al. 2010. Nonlinear piezoelectricity in electroelastic energy harvesters: Modeling and experimental identification. *Journal of Applied Physics.* 108, 2010, Vol. 074903.

STANTON, SAMUEL C., MCGEHEE, C. C. e MANN, B. P. 2009. Reversible hysteresis for broadband magnetopiezoelastic energy harvesting. *Applied Physics Letters.* 95, 2009, Vol. 174103.

TANG, LIHUA, YANG, YAOWEN e SOH, CHEE K. 2010. Toward Broadband Vibration-based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2010.

TOIT, NOEL E. du e WARDLE, BRIAN L. . 2006. Performance of Microfabricated Piezoelectric Vibration Energy Harvesters. 2006.

TOIT, NOEL EDUARD du. 2005. *Modeling and Design of a MEMS Piezoelectric.* MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECHNOLOGY : s.n., 2005.

TRIPLETT, A. e QUINN, D.D. 2009. The effect of Non-linear Piezoelectric Coupling on Vibration-based Energy Harvesting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures.* 2009.

TRIPLETT, ANGELA LYNN. 2008. VIBRATION-BASED ENERGY HARVESTING. Akron, Ohio, United States of America : s.n., December de 2008.

Vieira, W. G. R., Junior, C. M. e Tristão, S.F. 2010. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL INVESTIGATION OF A PIEZO-AERO-ELASTIC WING. *CONEM.* 2010.

WANG, LEI e YUAN , F. G. 2008. Vibration energy harvesting by magnetostrictive material. *Smart Materials and Structures.* 17, 2008, Vol. 045009, 14pp.

Williams, C.B. e Yates, R.B. . 1996. Analysis of a micro-electric generator for microsystems. *Sensorsand Actuators A.* 1996.

XIE, LONGHAN e CAI, MINGJIING. 2014. Increased piezoelectric energy harvesting from human footstep motion by using an amplification mechanism. *APPLIED PHYSICS LETTERS.* 2014.

ZAKHAROV, DMITRY, et al. 2012. THERMAL ENERGY CONVERSION BY COUPLED SHAPE MEMORY AND PIEZOELECTRIC EFFECTS. *Journal of Micromechanics and Microengineering.* 2012.