



PROJETO DE GRADUAÇÃO

Caracterização Experimental de Molas Pseudoelásticas de Ligas com Memória de Forma

Por,

Wilker Oliveira de Souza

Brasília, 01 dezembro de 2014

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

Caracterização Experimental de Molas Pseudoelásticas de Ligas com Memória de Forma

POR,

Wilker Oliveira de Souza

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção do grau de Engenheiro
Mecânico.

Banca Examinadora

Profa. Aline Souza de Paula, UnB/ ENM (Orientadora)

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM

Prof. Marcus Vinicius Girão de Moraes, UnB/ENM

Brasília, 01 de dezembro de 2014

Dedicatória

*Dedico esse trabalho a todos aqueles
que têm me acompanhado durante essa
jornada acadêmica.*

Wilker Oliveira de Souza

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer à Deus por mais esta conquista e toda a força que Ele me deu ao longo do caminho. Agradeço especialmente pelas pessoas que escolheu para caminharem comigo, me ajudando e orientando em todas as decisões e dificuldades.

Minha família é minha base e com eles tive todo apoio que precisei. Com meu pai aprendi a ter a disciplina necessária para alcançar e realizar meus planos e com minha mãe, a ter paciência para entender que às vezes nossos propósitos não acontecem do jeito que queremos e o importante é ter a sabedoria de identificar nossos erros e consertá-los para dar a volta por cima. Minha irmã, querida Judith, que demonstrava muitas vezes interesse no que eu estava estudando me dava ânimo para continuar e me tornar, na visão dela, um exemplo a ser seguido. Obrigado minha família.

Não poderia deixar de citar os meus amigos e começo pela minha melhor amiga e namorada Luiza Miranda, que é um anjo que Deus colocou em minha vida. Não foram poucas as vezes que dela ouvi críticas construtivas e sobretudo palavras de incentivo e carinho. Obrigada por caminhar comigo e ser exemplo de persistência e fé. Wesley, um amigo que me acompanha desde a escola, Frederico e Luiz Alberto, os conheci ainda moleque quando brincava na rua, Vinícius Arthur e Rafael Bruno.

Na faculdade não foram poucas as matérias e suas dificuldades, entre elas estão PM1 e Fluidos 2. Nelas conheci Rafael Rodrigues e Vinícius Britto que foram realmente escolhidos por Deus para estarem comigo. Galera, tâmo junto e T.A é nosso!

Para a conclusão deste trabalho contei com a ajuda e orientação de pessoas incríveis, como a minha orientadora, Aline Souza de Paula, que sempre foi uma professora muito presente e dedicada, esclarecendo dúvidas e fornecendo todo o apoio acadêmico e financeiro para as pesquisas. Nesse mesmo contexto, ganhei um grande companheiro, Hugo Oliveira. Foi ele quem me ajudou a entender os detalhes sobre SMAs e que quase sempre esteve fazendo ensaios e mais ensaios comigo até chegarmos a esse resultado final, valeu Hugão! Outro amigo que ganhei foi o Vander, me ajudou muito a entender a programação do Matlab e sempre estava disposto a ajudar.

O projeto de graduação foi um trabalho que me ensinou bastante, principalmente, pelo fato de se fazer necessário o conhecimento muitas vezes distante do que eu tinha como foco. Algumas pessoas me ajudaram a adquirir esses conhecimentos, entre elas Daniel Neto, responsável por me auxiliar em toda a parte elétrica, uma área que nunca tive muita afinidade e não conseguiria sem a ajuda dele. Na parte de materiais o Paulo Herrera, ensinando como operar o forno de precisão e auxiliando nos ensaios com a DSC. Obrigado pessoal!

A todos que estiveram comigo quero dizer: **OBRIGADO POR TUDO E CONTEM SEMPRE COMIGO!**

RESUMO

O objetivo deste trabalho consiste na caracterização experimental de molas de ligas com memória de forma (SMA - shape memory alloy). A caracterização é realizada a partir de ensaios denominados quase-estáticos e ensaios dinâmicos. A partir dos testes quase-estáticos, busca-se avaliar o laço de histerese da mola considerando o regime pseudoelástico. A partir dos ensaios dinâmicos, busca-se avaliar o comportamento de um oscilador de 1 grau de liberdade composto por uma mola de SMA excitado harmonicamente para diferentes condições de forçamento. De forma a alcançar os objetivos propostos, este trabalho envolve a construção de um dispositivo para a realização dos testes quase-estáticos e dinâmicos de molas, instrumentação do aparato experimental, realização dos ensaios e análise dos dados.

ABSTRACT

This study aims the experimental characterization of shape memory alloy (SMA) springs. The characterization is carried out by quasi-static and dynamical tests. From quasi-static tests, we seek the evaluation of pseudoelastic SMA springs hysteresis loop. From dynamic tests, we seek the analysis of an SMA oscillator harmonically excited with different forcing conditions. In order to achieve the proposed goals, this work includes the construction of a device to perform quasi-static and dynamic tests in springs, experimental apparatus instrumentation, experimental tests evaluation and data analysis.

Sumário

Agradecimentos	iv
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
1.2. MOTIVAÇÃO	1
1.3. OBJETIVO	2
1.4. METODOLOGIA	2
1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	4
2.1. ASPECTOS GERAIS	4
2.2. APLICAÇÕES DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	6
2.2.1. CONTROLE DE VIBRAÇÕES POR SMA	8
2.3. ASPECTOS CRISTALOGRÁFICOS DAS TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS	11
2.4. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (ONE-WAY)	12
2.5. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (TWO-WAY)	14
2.6. PSEUDOELASTICIDADE	16
3. PROJETO DO APARATO EXPERIMENTAL	18
3.1. MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO APARATO	18
3.2. FABRICAÇÃO DE MOLAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA	19
3.3. PROJETO DA ESTRUTURA PRINCIPAL	22
3.4. INSTRUMENTAÇÃO	25
3.4.1. CÉLULA DE CARGA	25
3.4.2. SENSOR LASER	29
3.5. APARATO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS QUASE-ESTÁTICOS	32
3.6. APARATO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DINÂMICOS	34
4. RESULTADOS	36

4.1.	ENSAIO QUASE-ESTÁTICO	36
4.2.	ENSAIO DINÂMICO	40
5.	CONCLUSÃO	47
5.1.	TRABALHOS FUTUROS.....	48
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49
7.	ANEXOS.....	51
7.1.	Desenho técnico da haste sustentação	51
7.2.	Desenho técnico da base inferior.....	51
7.3.	Desenho técnico da placa de fixação superior.....	51
7.4.	Desenho técnico da base superior	51
7.5.	Desenho técnico da placa de fixação inferior.....	51
7.6.	Desenho técnico da placa de fixação do laser	51
7.7.	Desenho técnico do parafuso.....	51
7.8.	Desenho técnico da massa 1/4.....	51
7.9.	Desenho técnico da massa 2/4.....	51
7.10.	Desenho técnico da massa 3/4.....	51
7.11.	Desenho técnico da massa 4/4.....	51
7.12.	Análise DSC feita no material utilizado na fabricação da mola antes do tratamento térmico	51
7.13.	Análise DSC feita no material utilizado na fabricação da mola após o tratamento térmico	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Relação entre temperaturas e porcentagem de martensita no material (Lagoudas et al, 2008).....	5
Figura 2.2 - Relação entre cargas aplicadas e temperaturas principais (Lagoudas et al, 2008).	5
Figura 2.3 - Dispositivos auto expansivos com memória de forma (Nogueira, 2009).....	6
Figura 2.4 - Arcos ortodônticos fabricados com ligas de SMA (Lagoudas,2008).....	7
Figura 2.5 – Implantação de placas de SMA em turbinas de Boeing (Aguiar, 2011).....	8
Figura 2.6 - Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico (Oliveira, 2014).	8
Figura 2.7 – Amplitudes máximas de resposta de um sistema primário com e sem ADV (Oliveira, 2011).	9
Figura 2.8 - Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por Tiseo et al.(2010).	10
Figura 2.9 - Foto do absorvedor dinâmico de vibrações desenvolvido por Rustighi et al. (2005).	11
Figura 2.10 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas (Lagoudas, 2008).....	12
Figura 2.11 - Efeito memória de forma de acordo com um campo de pressão e temperatura	13
Figura 2.12 – Comportamento de uma liga com memória de forma no gráfico Tensão-Deformação-Temperatura (Lagoudas et al.(2008), Tiseo et al.(2010)).....	13
Figura 2.13 - Treinamento a partir de 50 ciclos térmicos em um fio de Ni-Ti (Lagoudas, 2008).	15
Figura 2.14 - Treinamento a partir de 50 ciclos de deformação em um fio de Ni-Ti. $A_f=65^\circ$ e $T=70$ (Lagoudas, 2008).	15
Figura 2.15 - Pseudoelasticidade de acordo com um campo de temperatura e pressão.....	16
Figura 2.16 – Comportamento pseudoelástico SMAs. (Lagoudas, 2008).....	16
Figura 3.1 - Máquina MTS C45.305. (MTS Criterion®Series 40 Electromechanical Universal Test Systems).	18
Figura 3.2 – Modelo de instrumento utilizado para a fabricação de molas em SMA (Shape Training Tutorial, 2004).	19
Figura 3.3 - Forno Jung, série FO8080.	21
Figura 3.4 - Placa de identificação com as especificações do forno.	21
Figura 3.5 - Mola fabricada com SMA.	21
Figura 3.6 - Estrutura desenvolvida no SolidWorks.	22

Figura 3.7 – Detalhamento da placa superior do aparato.....	23
Figura 3.8 – Detalhamento da parte superior do aparato.....	24
Figura 3.9 - Fixação da mola.....	24
Figura 3.10 - Eixo Aço Cromo KALATEC 08 mm.....	25
Figura 3.11 - Célula de carga SV-50, Alfa Instrumentos.....	26
Figura 3.12 - Diagrama do divisor de tensão.....	27
Figura 3.13 - Calibração da célula de carga.....	28
Figura 3.14 - Sinal da força no tempo com e sem filtro.....	29
Figura 3.15 - Sensor óptico Baumer (OADK 25U7480).....	29
Figura 3.16 - Limites de trabalho do sensor laser (Manual Baumer).....	29
Figura 3.17 - Resolução do sensor laser (Manual Baumer).....	30
Figura 3.18 - Calibração do sensor laser.....	31
Figura 3.19 - Deslocamento no tempo com e sem filtro.....	31
Figura 3.20 - Sistema de vasos comunicantes para o carregamento contínuo da mola.....	32
Figura 3.21 - Registro utilizado no sistema.....	32
Figura 3.22 - Representação feita em SolidWorks para o tampão da mesa.....	33
Figura 3.23 - Haste de carregamento.....	33
Figura 3.24 – Aparato experimental para a realização dos ensaios estáticos.....	34
Figura 3.25 - Estrutura para a realização de ensaios dinâmicos.....	35
Figura 4.1 – Ciclo de carregamento e descarregamento imposto à mola linear.....	36
Figura 4.2 - Deslocamento da mola linear em resposta ao carregamento aplicado.....	36
Figura 4.3 – Comportamento força x deslocamento da mola linear.....	37
Figura 4.4 - Ciclo de carregamento e descarregamento imposto à mola de SMA.....	37
Figura 4.5 - Sinal do deslocamento da mola de SMA como resposta ao forçamento.....	37
Figura 4.6 – Comportamento força-deslocamento da mola de SMA pseudoelástica.....	38
Figura 4.7 – Deslocamento da mola de SMA para 16 ciclos de carregamento e descarregamento.....	39
Figura 4.8 – Comportamento força-deslocamento em 16 ciclos de carregamento realizados na mola pseudoelástica.....	40
Figura 4.9 - Último laço de histerese observado no comportamento da mola pseudoelástica no 16º ciclo de carregamento.....	40
Figura 4.10 – Amplitude máxima de resposta do oscilador aumentando-se a frequência de forçamento.....	41
Figura 4.11 - Força por Deslocamento na frequência de 3 Hz.....	42
Figura 4.12 - Força por Deslocamento na frequência de 4 Hz.....	42
Figura 4.13 - Força por Deslocamento na frequência de 4.3 Hz.....	42
Figura 4.14 - Força por Deslocamento na frequência de 4.5 Hz.....	42

Figura 4.15 - Força por Deslocamento na frequência de 4.9 Hz.....	42
Figura 4.16 - Força por Deslocamento na frequência de 5.6 Hz.....	42
Figura 4.17 - Amplitude máxima de resposta do oscilador diminuindo-se a frequência de forçamento.....	43
Figura 4.18 - Diferença nas amplitudes de resposta do sistema quando aumenta-se e diminui-se a frequência de excitação.	44
Figura 4.19 - Detalhamento dos saltos dinâmicos observados nos ensaios.	44
Figura 4.20 - Força por Deslocamento na frequência de 6 Hz.....	45
Figura 4.21 - Força por Deslocamento na frequência de 5 Hz.....	45
Figura 4.22 - Força por Deslocamento na frequência de 4.8 Hz.....	45
Figura 4.23 - Força por Deslocamento na frequência de 4.4 Hz.....	45
Figura 4.24 - Força por Deslocamento na frequência de 4 Hz.....	45
Figura 4.25 - Força por Deslocamento na frequência de 3 Hz.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Temperaturas de transformação da fase R obtidas em ensaios na DSC (Grassi, 2014).	20
Tabela 3.2 - Temperaturas de transformação de fases no material sem tratamento térmico.	21
Tabela 3.3 - Temperaturas de transformação martensítica no material após o tratamento térmico	22
Tabela 3.4 - Dados para a calibração da célula de carga.....	27
Tabela 3.5 - Dados para a calibração do sensor laser.....	30

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Cada vez mais, em diversas áreas do conhecimento, o uso de técnicas e abordagens tradicionais esbarram em limitações que inviabilizam a sua utilização. Dessa forma, o estudo e desenvolvimento de abordagens inovadoras, como as que utilizam materiais inteligentes, estão se tornando cada vez mais importante

A utilização de materiais inteligentes em equipamentos e estruturas, buscando trabalhar de forma adaptativa de acordo com as diferentes situações, consiste em uma boa solução para contornar as limitações dos dispositivos e estruturas tradicionais. De acordo com Aguiar (2011), os materiais inteligentes são materiais que possuem a capacidade de alterar a sua geometria, ou alguma de suas propriedades físicas (mecânicas, térmicas, elétricas, etc.), em resposta a algum estímulo externo (campo magnético, temperatura, tensão mecânica, campo elétrico, pressão, etc). Os principais materiais inteligentes usados em engenharia são: os piezoelétricos, os magnetostrictivos, os fluidos eletro/magneto-reológicos e as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*).

Entre os materiais inteligentes têm-se as ligas com memória de forma que, de acordo com Da Silva (2003), apresentam dois fenômenos característicos denominados quaseplástico e pseudoelástico. No fenômeno quasiplástico, a liga é capaz de recuperar a geometria original (ou de desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir sua recuperação) por meio da imposição de um campo de temperatura e/ou de tensão, devido às transformações martensíticas induzidas no material. A pseudoelasticidade é caracterizada pela recuperação de deformações resultantes de transformações martensíticas induzidas por tensão. Esse fenômeno é observado nas SMAs submetidas temperaturas acima de A_f , após retirada da carga aplicada. Nesse ciclo de aplicação e retirada de carga, o material apresenta uma grande capacidade de dissipação de energia devido a presença de um laço de histerese.

Devido às suas características peculiares esse material tem despertado um grande interesse de pesquisadores em vários campos de aplicação que vão da área médica à aeroespacial.

1.2. MOTIVAÇÃO

A utilização de materiais inteligentes proporcionou o desenvolvimento de dispositivos adaptativos para a atenuação de vibrações. A utilização de materiais inteligentes em equipamentos e estruturas têm aumentado consideravelmente recentemente. Dentre esses materiais e suas diferentes aplicações, as ligas com memória de forma têm sido utilizadas em absorvedores de vibração devido às suas características especiais associadas à transformação de fase, que pode ser

induzida variando a temperatura e/ou tensão no elemento, de modo a induzir transformações de fase que vão modificar os parâmetros do absorvedor como rigidez e amortecimento (Lagoudas et al. 2008). Dessa forma, é possível mudar a banda de operação do absorvedor adaptativo a partir da variação da temperatura. Poucos trabalhos, no entanto, exploram o regime pseudoelástico das SMAs no funcionamento dos ADVs adaptativos (Oliveira, 2011). A ideia do ADV passivo composto por SMA em regime pseudoelástico é explorar a capacidade dissipativa presente no laço de histerese que ocorre durante o carregamento e o descarregamento da liga. O objetivo é que esse ADV apresente um desempenho superior ao ADV linear clássico, seja por aumentar a banda operacional do absorvedor ou por diminuir os novos picos de ressonância que surgem após o acoplamento do ADV. É importante ressaltar que o comportamento histerético está associado a não-linearidades, inerente às SMAs, que podem acarretar comportamentos complexos do sistema primário. Dessa forma, embora a ideia de ADVs pseudoelásticos seja bastante promissora, estudos ainda são necessários para definir a eficácia desses absorvedores.

1.3. OBJETIVO

Motivado pelo desenvolvimento de ADVs pseudoelásticos, esse projeto tem como objetivo uma caracterização preliminar de molas de SMA, a partir de ensaios definidos como quase-estáticos e ensaios dinâmicos. Futuramente, esses elementos de SMAs irão constituir o ADV.

Para entender o comportamento das SMAs é necessário compreender as características do diagrama $\sigma - \varepsilon$ deste material. De acordo com Oliveira (2011), a não linearidade do $\sigma - \varepsilon$ gera diversos tipos de comportamentos na resposta do sistema, inclusive caóticos e hipercaóticos, que dependem da amplitude e frequência de forçamento. É importante também analisar de que forma o laço de histerese influencia no comportamento dinâmico do sistema no que se refere a absorção de energia e na complexidade de comportamento.

De acordo com as premissas acima, esse trabalho tem como objetivo a caracterização experimental de molas de SMA. A partir de testes quase-estáticos, busca-se avaliar o laço de histerese da mola considerando o regime pseudoelástico. A partir de ensaios dinâmicos, busca-se avaliar o comportamento do ADV isolado. De forma a alcançar os objetivos propostos, este trabalho engloba a construção de um dispositivo para a realização de testes quase-estáticos e dinâmicos de molas, instrumentação do aparato experimental, realização de ensaios experimentais e análise dos dados.

1.4. METODOLOGIA

Primeiramente, apresenta-se a proposta do aparato experimental para realização dos ensaios quase-estáticos e dinâmicos de molas de SMA, incluindo sua instrumentação e configuração.

Em seguida são apresentados os resultados dos ensaios quase-estáticos, com a construção da curva força - deslocamento para uma mola de SMA. Nessa etapa deseja-se realizar um carregamento lento e contínuo sobre a mola, e monitorar a força imposta juntamente com a deformação sofrida pela mola. Esse ensaio é denominado como ensaio quase-estático, embora não apresente um carregamento quase-estático ideal.

Por último são realizados os ensaios dinâmicos, avaliando-se as amplitudes máximas de vibração do oscilador de SMA aumentando-se e diminuindo-se a frequência de forçamento.

1.5. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Além deste capítulo introdutório, outros 4 capítulos compõe o presente trabalho.

O capítulo 2 aborda as ligas com memória de forma. Inicialmente, são apresentados os principais aspectos fenomenológicos do material, quasiplasticidade e pseudoelasticidade, e uma análise da ação das transformações martensíticas no comportamento das SMAs. Ainda nesse capítulo são apresentados exemplos da utilização de ligas com memória de forma.

O capítulo 3 apresenta o projeto do aparato experimental desenvolvido para realização de ensaios quase-estáticos e dinâmicos. Todos os detalhes de sua construção são apresentados, incluindo as ideias utilizadas para diminuir o atrito. Ainda neste capítulo é apresentado o tratamento térmico utilizado na fabricação da mola pseudoelástica.

O capítulo 4 aborda os resultados obtidos a partir dos ensaios quase-estáticos e dinâmicos. Nos ensaios quase estáticos são realizados ciclos de carregamentos contínuos para obtenção do laço de histerese do material. Nos ensaios dinâmicos são observadas as amplitudes máximas de resposta do sistema para diferentes frequências de forçamento.

No último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho e perspectivas de trabalhos futuros.

2. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

2.1. ASPECTOS GERAIS

Os materiais inteligentes são materiais que possuem a capacidade de alterar a sua geometria, ou alguma de suas propriedades físicas (mecânicas, térmicas, elétricas, etc.), como resposta a algum estímulo externo (campo magnético, temperatura, tensão mecânica, campo elétrico, pressão, etc.). Os principais materiais inteligentes usados em engenharia são: os piezoelétricos, os magnetoestrictivos, os fluidos eletro/magneto-reológicos e as ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys – SMAs*) que são o foco deste trabalho.

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy*) são ligas metálicas que possuem a capacidade de retornar à sua forma original quando submetidas a um processo termomecânico. Acima de certas temperaturas, SMAs apresentam o fenômeno conhecido como pseudoelasticidade. Outro fenômeno encontrado nas ligas com memória de forma é a quasiplasticidade, que ocorre abaixo de certas. Fatores que tem feito esses materiais serem alvos de intensas pesquisas no ramo da indústria aeroespacial e no setor médico. (Aguiar, 2011)

As ligas com memória de forma trabalham dentro de uma faixa de temperatura e possuem duas fases distintas, cada uma com uma estrutura cristalina diferente e, portanto, diferentes propriedades. Uma delas é a fase de alta temperatura chamada austenita e a outra é a fase de baixa temperatura chamada martensita. Austenita (geralmente cúbica) tem uma estrutura cristalina diferente da martensita (tetragonal, ortorrômbico ou monoclinico). A transformação de uma estrutura para a outra não ocorre por difusão de átomos, mas sim por distorção da estrutura de corte. Tal transformação é conhecida como transformação martensítica.

De acordo com Lagoudas (2008) e Otuska & Wayman (1998), 4 temperaturas distintas que caracterizam as SMAs na ausência de tensões: M_s , M_f , A_s e A_f . A temperatura A_f corresponde a temperatura acima da qual há somente a presença de austenita estável. A temperatura M_f corresponde a temperatura abaixo da qual há somente a presença de martensita. A temperatura M_s e A_s correspondem às temperaturas em que se iniciam a indução térmica de formação de martensita e austenita, respectivamente.

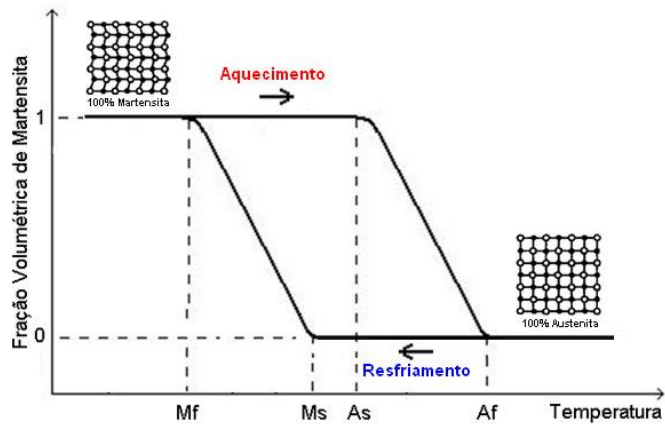


Figura 2.1 - Relação entre temperaturas e porcentagem de martensita no material (Lagoudas et al, 2008).

Quando o material é resfriado de uma temperatura acima de A_f para uma temperatura inferior a M_f , há a formação de uma fase martensítica, esta fase é caracterizada por possuir várias orientações cristalográficas e chamada de martensita “auto acomodada” ou “martensita maclada”.

Como apresentado na Figura 2.2, quando uma barra de SMA é submetida à tensão, ocorre uma reorientação da fase martensítica e somente uma variante cristalográfica se mantém, consequentemente a variante mais favorável ao sentido da tensão, essa é a chamada martensita demaçada. Acima da temperatura A_f só existe austenita no material e essa fase se caracteriza por ter apenas uma direção cristalográfica que vai se formando a partir de A_s .

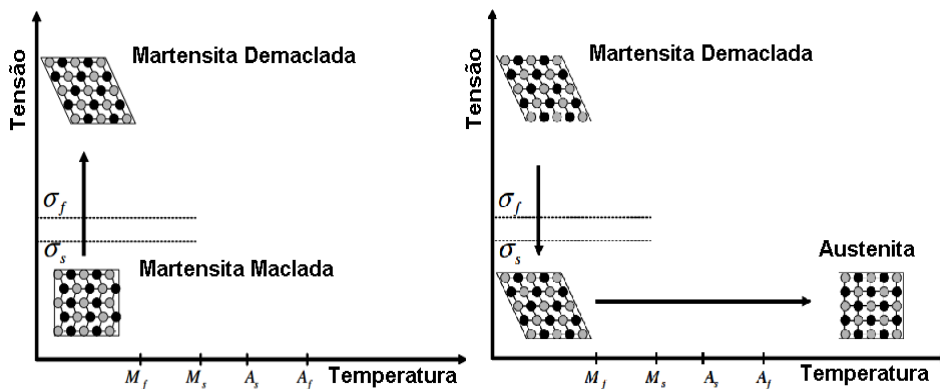


Figura 2.2 - Relação entre cargas aplicadas e temperaturas principais (Lagoudas et al, 2008).

Se a temperatura do material estiver abaixo de M_f , o trabalho estará sendo realizado no regime quasiplástico, onde a liga é capaz de recuperar sua geometria inicial depois de sofrer deformações significativas (Deformação aparentemente plástica) apenas aumentando a temperatura acima de A_f , devido às transformações de fases no material. Se a temperatura do material estiver acima de A_s , estaremos trabalhando no regime pseudoelástico que é caracterizado pela recuperação de

deformações resultantes de transformações de fases induzidas por tensão. As grandes vantagens nos materiais feitos de liga de memória de forma se dão graças a capacidade de dissipação de energia devido a presença do laço de histerese que normalmente está associado as transformações micro estruturais martensíticas do material.

2.2. APLICAÇÕES DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

As propriedades das SMAs estão atraindo grande interesse tecnológico e motivando várias aplicações nos mais diversos campos da ciência e da engenharia. Aeroespacial, biomédica e robótica são algumas das áreas onde as SMAs têm sido utilizadas.

Os chamados dispositivos auto expansivos, Nogueira (2009), também conhecidos como “*stents*” em homenagem ao dentista C. T. Stent, são uma importante aplicação cardiovascular com ligas com memória de forma. Estes dispositivos são utilizados para sustentar o diâmetro interno de vasos tubulares como vasos sanguíneos, esôfago e duto biliar. Neste tipo de aplicação, uma trama cilíndrica com memória de forma, como apresenta a Figura 2.3, é inserida e posicionada por meio de um cateter em um vaso sanguíneo, por exemplo. Inicialmente, esta trama é pré-comprimida e encontra-se em seu estado martensítico. Conforme a trama é aquecida devido à temperatura do corpo, ela tende a recuperar a sua forma original, expandindo-se. Além de procedimentos como o de angioplastia, para evitar o re-entupimento de um vaso, estes dispositivos também podem ser utilizados no tratamento de aneurismas cerebrais, para a sustentação das paredes de um vaso enfraquecido.



Figura 2.3 - Dispositivos auto expansivos com memória de forma (Nogueira, 2009).

As propriedades das SMAs têm sido implementadas com sucesso numa grande variedade de aplicações dentárias. Arcos ortodônticos feitos com ligas NiTi têm sido utilizadas desde a década de 1970 e são mais eficazes do que outros materiais utilizados para este fim. Em um material elástico linear como o aço inoxidável, é necessária uma grande quantidade de força para uma pequena variação, ou seja, O processo resulta em uma grande quantidade de força sobre o dente

para uma pequena movimentação da arcada dentária. A vantagem de arcos pseudoelásticos é que o material tem uma mudança irrelevante sobre tensão e uma força moderada é requerida para movimentar os dentes durante um longo período de tempo, em comparação com aço inoxidável. Além disso, a composição do material e o processamento podem ser concebidos para produzir diferentes níveis de força para diversas situações. A Figura 2.4 é um exemplo de aparelhos ortodônticos fabricados com SMA.



Figura 2.4 - Arcos ortodônticos fabricados com ligas de SMA (Lagoudas,2008).

Segundo Lagoudas (2008) e Aguiar (2011), os níveis de ruído do motor durante a descolagem e a aterrissagem tornaram-se mais regulamentados em todo o mundo. Para reduzir este ruído, alguns designers estão instalando chevrons nos motores para misturar o fluxo dos gases de escape do motor e reduzir o ruído. As vigas de SMA dobram as divisas durante os vôos de baixa altitude ou de baixa velocidade, aumentando assim a mistura e reduzindo o ruído. Durante vôos com grande altitude ou alta velocidade, estes componentes de SMA são resfriados, causando a transformação da austenita em martensita maclada, endireitando assim os chevrons e aumentando o desempenho do motor. O atual projeto Boeing para estas vigas de geometria variável pode ser visto na Figura 2.5.

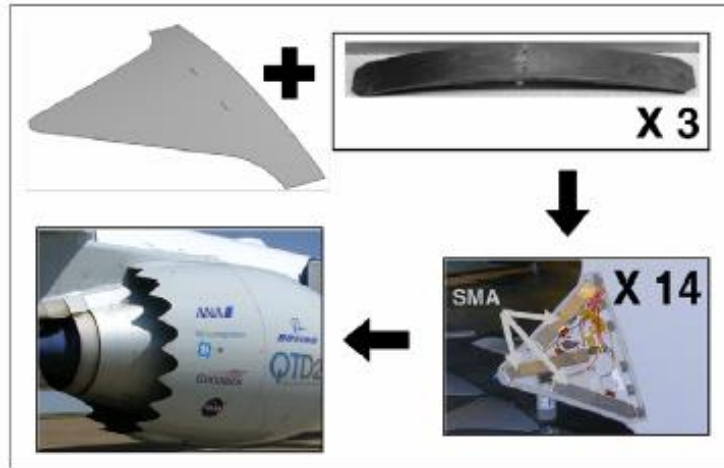


Figura 2.5 – Implantação de placas de SMA em turbinas de Boeing (Aguiar, 2011).

2.2.1. CONTROLE DE VIBRAÇÕES POR SMA

Um problema importante presente em sistemas mecânicos sujeitos a excitação externa é a ocorrência de vibrações. Sua presença, muitas vezes indesejada, pode comprometer o rendimento do sistema e em casos mais graves ocasionar a falha de componentes, assim como falhas por fratura devido à fadiga ou por escoamento. Esse problema é ainda mais crítico próximo à ressonância, frequência onde o sistema alcança as maiores amplitudes de oscilação. Para proporcionar condições de operação adequadas para os equipamentos e/ou conforto aos usuários, muitas vezes torna-se necessária a utilização de dispositivos para atenuar ou controlar as vibrações indesejáveis.

Uma alternativa para mitigar as vibrações indesejadas é a utilização de absorvedores dinâmicos de vibração (ADV). Esse dispositivo de controle de vibrações passivo clássico, possui parâmetros concentrados de massa, rigidez e possivelmente amortecimento, como apresenta a Figura 2.6.

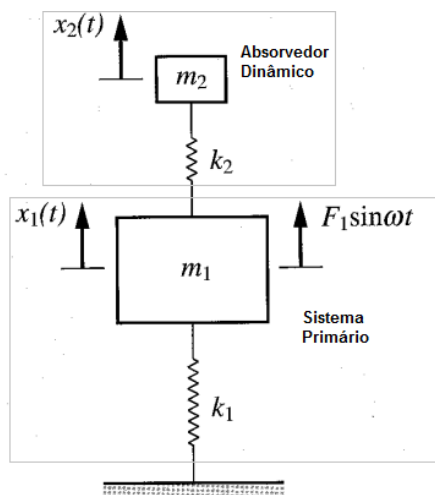


Figura 2.6 - Sistema de um grau de liberdade com adição de absorvedor dinâmico (Oliveira, 2014).

O princípio básico do funcionamento do ADV se baseia na escolha de uma frequência natural do absorvedor de modo que a amplitude de vibração da resposta do sistema primário seja atenuada para uma determinada frequência de excitação harmônica.

Uma vez conectado a um determinado sistema excitado por uma força harmônica externa, chamado sistema primário, o ADV é capaz de absorver a energia de vibração no ponto de conexão e promover uma redução dos níveis de vibração do sistema primário. Essa absorção acontece por meio de uma redistribuição da energia de vibração no sistema em que certo grau de liberdade tem suas oscilações reduzidas (sistema primário) e outro (absorvedor), aumentadas (Oliveira, 2014). Apesar de funcionar muito bem na sua frequência de trabalho, a faixa de atuação do ADV é muito pequena. Saindo dessa banda, surgem novas frequências de ressonância que devem ser evitadas.

Na Figura 2.7, a linha em vermelho apresenta as amplitudes máximas de resposta de um sistema primário sem ADV sendo excitado harmonicamente. A partir da resposta, nota-se que na frequência de excitação normalizada igual 1 ocorre a ressonância, onde um pico é observado, relacionado a uma amplificação máxima da resposta do sistema. A linha em preto apresenta as amplitudes máximas de resposta desse mesmo sistema primário quando o ADV é acoplado. Nesse caso, nota-se que na frequência onde o sistema primário sozinho apresentava ressonância, o valor de sua amplitude de resposta é nula. Essa frequência consiste na frequência de projeto do ADV. A região da figura destacada em cinza corresponde à banda operacional do ADV, onde as amplitudes de resposta do sistema primário com ADV são menores quando comparadas ao mesmo sistema sem ADV. Ao sair da banda operacional, no entanto, dois novos picos de ressonância surgem, devendo ser evitados. Dessa forma, a utilização de ADVs é indicada para situações onde a frequência de excitação é bem conhecida e não varia muito.

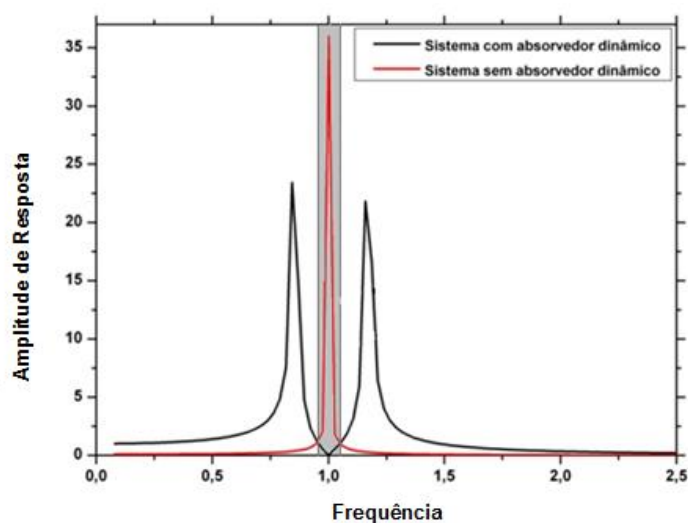


Figura 2.7 – Amplitudes máximas de resposta de um sistema primário com e sem ADV (Oliveira, 2011).

Para contornar essa limitação da estreita banda de operação dos ADVs, Rustighi et al.(2005) e Tiseo et al. (2010), dentre outros autores, apresentam dispositivos adaptativos utilizando fios de SMA .

Tiseo et al.(2010) analisam um modelo bem simples de um ADVA (Absorvedor Dinâmico de Vibrações Adaptativo) usando fio de SMA tracionado, fixado nas extremidades em estrutura cilíndrica e com uma massa concentrada no seu centro (Figura 2.8). A sintonização do absorvedor é obtida pelo aquecimento do fio por uma corrente elétrica. Para se verificar a sua funcionalidade em estruturas aeronáuticas, este absorvedor foi fixado em uma chapa de alumínio aeronáutico e também em uma chapa de fibra de vidro. As chapas foram excitadas por um *shaker* e em ambos os casos ocorreu redução significativa dos níveis de vibração, indicando a potencialidade do uso destes absorvedores.

Por meio dessa técnica, a frequência natural do absorvedor dinâmico pode ser alterada em uma larga faixa de frequências para que a frequência de excitação alvo seja alcançada. Tiseo et al (2010) reforça que os absorvedores dinâmicos tradicionais possuem uma limitação em suas aplicações por causa da sua pequena faixa de atuação considerando-se a variação da frequência de excitação.

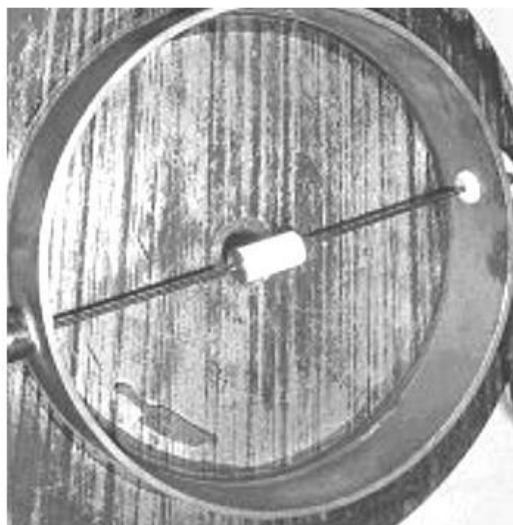


Figura 2.8 - Absorvedor dinâmico adaptativo proposto por Tiseo et al.(2010).

Rustighi et al.(2005) apresentam um modelo matemático e um aparato experimental de um absorvedor dinâmico de vibrações com a utilização de SMA. O aparato experimental desenvolvido é constituído por duas vigas em balanço feitas com dois fios de 2 mm de diâmetro de SMA (Figura 2.9). A parte central da viga é colocada sobre um *shaker*. A mudança do módulo de elasticidade da liga, produzida por alterações na sua temperatura, é usada para variar a faixa de sintonização do dispositivo. A temperatura nos fios de SMA é controlada através do valor da corrente elétrica aplicada nos fios de SMA.



Figura 2.9 - Absorvedor dinâmico de vibrações desenvolvido por Rustighi et al. (2005).

Neste trabalho, no entanto, a motivação do uso de SMAs em absorvedores de vibrações se deve a alta capacidade de amortecimento dessas ligas em regime pseudoelástico, que está relacionada ao seu comportamento histerético associado às transformações de fase que o material sofre. Logo, diferente dos trabalhos citados relacionados à utilização de SMAs em absorvedores, deseja-se desenvolver um absorvedor de vibrações passivo.

2.3. ASPECTOS CRISTALOGRÁFICOS DAS TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS

De acordo com a cristalografia das ligas com memória de forma, as transformações martensíticas são não-difusivas e ocorrem por causa da distorção por cisalhamento da estrutura cristalina (movimento dos átomos de suas posições originais). Essas transformações possuem características bem definidas que as distinguem de outras transformações. Em um único cristal (um único grão de material poli cristalino), as distorções cisalhantes ocorrem em um plano específico denominado *habit plane* ou *invariant plane*, o qual forma uma interface entre as fases martensíticas e austeníticas (Lagoudas ,2008). Durante as transformações, esse plano não rotaciona nem se deforma, por isso é também conhecido como *lattice invariant plane*. Por meio da Figura 2.10, pode-se ver esquematicamente o *habit plane* entre a fase martensítica maclada e a austenítica.

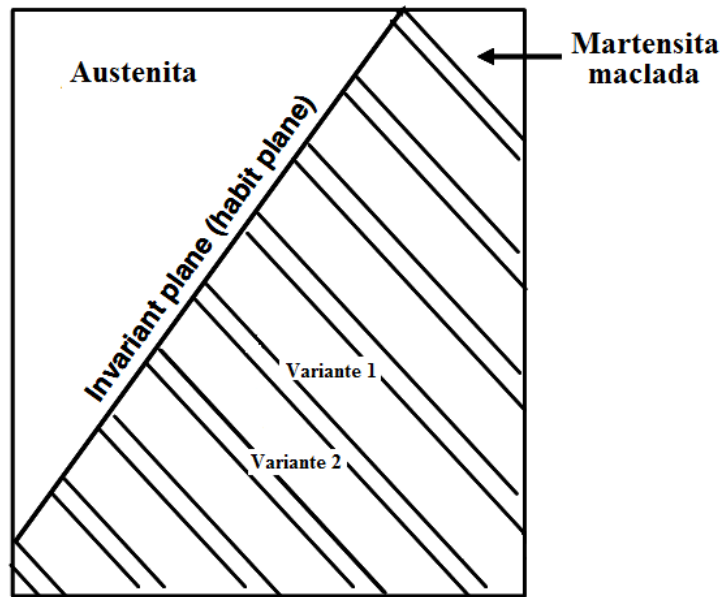


Figura 2.10 – Representação esquemática da interface entre as fases austeníticas e martensíticas (Lagoudas, 2008).

A transformação de austenita para martensita pode ocorrer no habit plane por dois diferentes mecanismos. O primeiro é por meio de escorregamento (átomos movendo por um ou mais espaços atômicos) e o segundo é por maclagem (átomos movendo por uma fração de um espaço atômico). Ambos os mecanismos podem auxiliar na formação da martensita com pouca ou nenhuma mudança volumétrica no material. A deformação observada por esses movimentos cooperativos de átomos é referida como uma deformação invariante da estrutura cristalina.

2.4. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (ONE-WAY)

Quatro temperaturas distintas caracterizam as *SMA*s na ausência de tensões: M_s , M_f , A_s e A_f . A temperatura A_f corresponde a temperatura acima da qual há somente a presença de austenita estável. A temperatura M_f corresponde a temperatura abaixo da qual há somente a presença de martensita. A temperatura M_s e A_s correspondem às temperaturas em que se iniciam a indução térmica de formação de martensita e austenita, respectivamente. A Figura 2.11 demonstra o efeito memória de forma presente em *SMA*s.

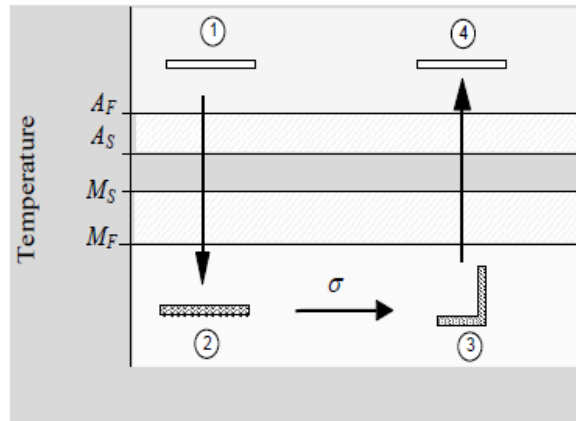


Figura 2.11 - Efeito memória de forma de acordo com um campo de pressão e temperatura.

Uma liga de SMA exibe o efeito de memória de forma quando é deformada na fase martensítica, temperatura abaixo de M_f (estágio 2-3, Figura 2.11). Posteriormente, quando é aquecida a uma temperatura superior a A_f , a liga recupera a sua forma original (estágio 3-4, Figura 2.11) como descrito por Lagoudas (2008). O comportamento do efeito memória de forma pode ser melhor compreendido analisando um carregamento termomecânico em um espaço tridimensional com tensão, deformação e temperatura, apresentado na Figura 2.12, que representa dados experimentais para uma liga de NiTi testada sob carregamento uniaxial. σ é a tensão uniaxial no material devido a uma carga aplicada. ϵ , a deformação, correspondente à mudança no comprimento da amostra ao longo da direção da carga aplicada, normalizada pelo comprimento original.

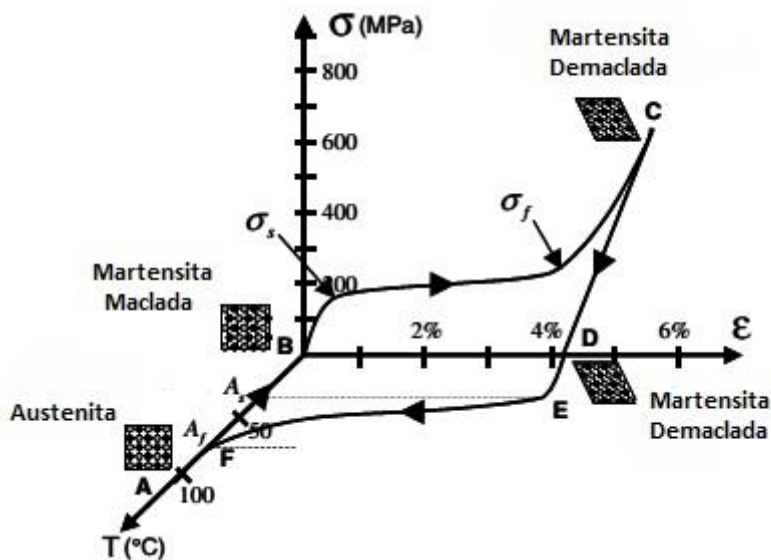


Figura 2.12 – Comportamento de uma liga com memória de forma no gráfico Tensão-Deformação-Temperatura (Lagoudas et al. (2008); Tiseo et al. (2010)).

A partir do ponto A, o resfriamento da austenita para temperaturas abaixo de A_s resulta na formação de grãos de martensita, como representa o ponto B. Quando os grãos de martensita são submetidos a uma tensão aplicada que excede o nível de tensão inicial (σ_s), o processo de orientação das variantes é iniciado, o que resulta no crescimento de determinadas variantes martensíticas orientadas favoravelmente a tensão e que crescem à custa de outras variantes menos favoráveis a tensão aplicada. O nível de tensão para a reorientação das variantes é bem menor do que o limite de elasticidade plástica permanente da martensita. O processo é concluído com um nível de tensão (σ_f) que é caracterizado pelo pico do diagrama tensão-Deformação, ponto C. O material é então descarregado do ponto C para o ponto D, no entanto, a fase de martensita demaçada é mantida. Quando o material é aquecido na ausência de tensão, a transformação inversa acontece quando a temperatura atinge o ponto E e é concluída na temperatura A_f , ponto F, acima do qual existe apenas a fase austenítica. Na falta de deformação plástica permanente gerada durante o carregamento, a forma original da liga de SMA é recuperada, como está representado pelo ponto A e fechando o ciclo.

2.5. EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (TWO-WAY)

Algumas ligas com memória de forma podem apresentar alterações repetitivas na forma sem necessariamente uma carga mecânica está sendo aplicada, mas somente uma variação da temperatura. Esse comportamento é chamado efeito memória de forma *two-way*. Diferentemente da memória de forma *one-way*, existem duas configurações associadas às duas fases presentes no material. Existe uma determinada forma relativa à fase austenítica em uma temperatura acima de A_f e outra forma relativa à fase martensítica abaixo de M_f . Esse efeito pode ser observado em ligas de SMA que foram submetidas a repetidos e específicos ciclos, denominados treinamento.

Lagoudas et al. (2008) explica que o treinamento ocorre por meio de um grande número de ciclos e induz transformações na microestrutura que causam mudanças macroscópicas no comportamento do material. Os ciclos são repetidos até que a resposta histerética do material seja estabilizada e a curva inelástica permaneça constante.

O material é submetido a um ciclo termomecânico com um carregamento constante aplicado ao material. Como exemplo as figuras abaixo, apresentam um fio de Ni-Ti exposto a aplicação de um ciclo térmico a uma tensão constante e percebe-se como a deformação se estabiliza com a repetição de vários ciclos (Figura 2.13). A Figura 2.14 apresenta a estabilização da curva histerética mas com uma variação do carregamento mecânico a uma temperatura constante desta vez.

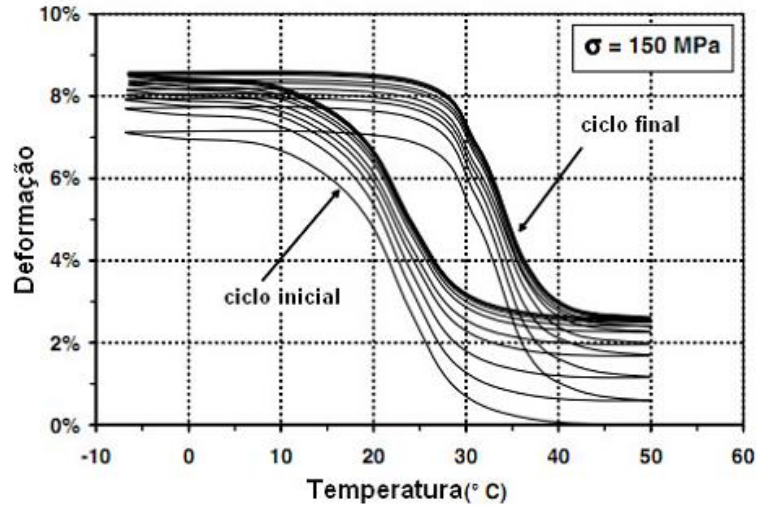


Figura 2.13 - Treinamento a partir de 50 ciclos térmicos em um fio de Ni-Ti (Lagoudas, 2008).

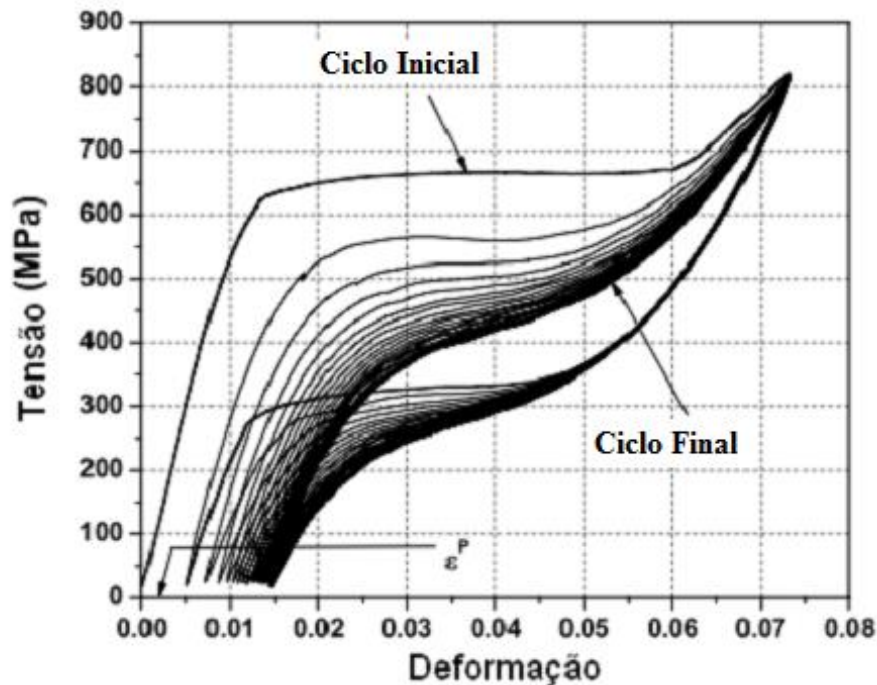


Figura 2.14 - Treinamento a partir de 50 ciclos de deformação em um fio de Ni-Ti. $A_f=65^\circ$ e $T=70$ (Lagoudas, 2008).

A memória de forma é resultante de defeitos permanentes introduzidos durante o treinamento. Eles criam tensões residuais internas e dessa forma facilitam a formação de variantes martensíticas preferenciais quando o material é resfriado na ausência de carregamentos externos. Se as tensões residuais internas forem modificadas por qualquer razão, seja altas temperaturas ou altas tensões externas, a memória de forma do material é perturbada (Lagoudas, 2008).

2.6. PSEUDOELASTICIDADE

Para Tiseo et al.(2010), o comportamento pseudoelástico em ligas com memória de forma está associado com a transformação martensítica induzida por tensão. A característica marcante desse comportamento é a recuperação da geometria inicial após um carregamento mecânico em temperaturas superiores a A_f como apresenta a Figura 2.15. O caminho pseudoelástico se inicia em uma temperatura suficientemente alta em que exista austenita estável, em seguida, ocorre à aplicação de um carregamento mecânico fazendo com que a estrutura passe a ser martensita demaçada, e finalmente retorna para a fase austenítica quando ocorre o descarregamento mecânico. Para ilustrar o comportamento pseudoelástico em maiores detalhes, vamos considerar o caminho apresentado na Figura 2.16, que se inicia com a ausência de carregamento e a uma temperatura acima de A_f .

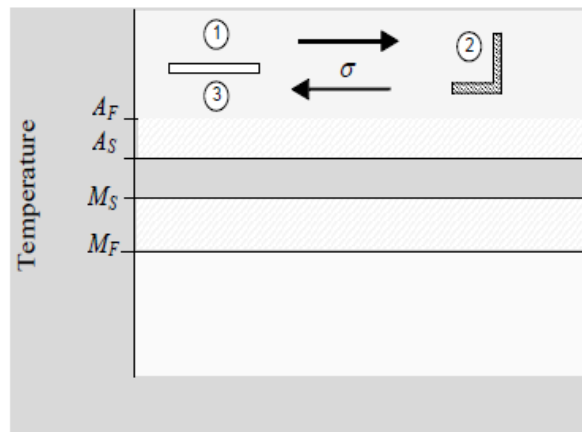


Figura 2.15 - Pseudoelasticidade de acordo com um campo de temperatura e pressão.

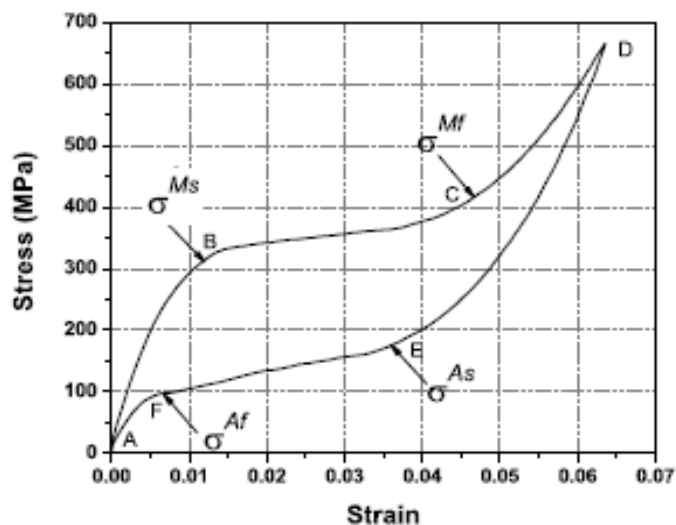


Figura 2.16 – Comportamento pseudoelástico SMAs. (Lagoudas, 2008).

Quando uma carga mecânica é aplicada, a austenita presente no início do ensaio sofre uma deformação elástica (ponto B). Em um nível de carga específico, o caminho de carga intercepta a superfície para o início da transformação martensítica no diagrama de fase. Este fato marca o nível de tensão para o início da transformação da austenita em martensita (σ^{Ms}). O ensaio continua até que o nível de tensão (σ^{Mf}) e indica o fim da transformação (ponto C). Note que a transformação induzida pela tensão é acompanhada pela geração de grandes deformações elásticas. $\sigma = 150\text{Mpa}$

O término da transformação martensítica é indicado por uma distinta mudança na inclinação da curva $\sigma - \varepsilon$, que está associada com o início do regime elástico martensítico. Esta área na curva apresenta um valor diferente para o módulo de elasticidade do material. Conforme é apresentado na figura acima, uma eventual aplicação de carga nesse regime não leva a mais nenhuma transformação de fase no material.

Quando a tensão vai diminuindo gradativamente, por meio do descarregamento mecânico, em certo momento esse caminho encontra a superfície para o início transformação da martensita em austenita novamente (σ^{As}). O fim de transformação é indicado pelo ponto de que a curva $\sigma - \varepsilon$ reencontra a região elástica da austenita (ponto F). O material é então totalmente de descarregado e o ciclo é finalizado.

Esse ciclo completo de transformação resulta em uma histerese, que é uma dissipação de energia, representada pela área entre os pontos A, B, C e D. As tensões mínimas para transformação de fase e as características da curva de histerese no diagrama $\sigma - \varepsilon$ variam muito em decorrência do tipo de ligas usadas e das condições de ensaio (Lagoudas ,2008).

3. PROJETO DO APARATO EXPERIMENTAL

3.1. MOTIVAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO DO APARATO

Uma grande variedade de máquinas destinadas a ensaios de tração e compressão estão disponíveis comercialmente, conforme a MTS C45.305, mostrada na Figura 3.1. Esse tipo de equipamento é largamente utilizado para caracterização de diversos tipos de material e ensaios realizados nelas são suficientes para caracterização de molas de SMA. A maioria dessas máquinas (incluindo as disponíveis para testes no departamento de engenharia mecânica da UnB) possui um curso de trabalho que varia entre 100 e 160 milímetros, o que consiste em um curso pequeno se comparado com o necessário para a caracterização das molas de SMAs a serem analisadas nesse projeto. Além disso, vale mencionar que o custo de uma máquina desse tipo é bastante elevado.



Figura 3.1 - Máquina MTS C45.305. (MTS Criterion®Series 40 Electromechanical Universal Test Systems).

Dentro do exposto, torna-se interessante o projeto e construção de um aparato experimental para realizar ensaios de tração em molas helicoidais, denominados nesse trabalho com testes quase-estáticos, para se obter o diagrama $\sigma - \epsilon$ e caracterizar as molas de SMA. Parte desse aparato será também utilizado para realizar ensaios dinâmicos com as mesmas molas.

3.2. FABRICAÇÃO DE MOLAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

O uso de mola helicoidal é apropriado quando se deseja grandes deslocamentos, em detrimento da realização de um grande trabalho mecânico. Isto ocorre porque nas molas a natureza do campo de tensão experimentado é predominantemente cisalhante, o que permite atingir deformações axiais bem maiores quando comparado a fios e barras, onde a tensão é normal e a resistência do material é maior. Pelas características presentes em molas helicoidais, considera-se que essa geometria é apropriada para a análise de ADV de SMA, tendo sido escolhida neste trabalho.

Para a fabricação das molas utilizou-se fios de SMA pseudoelásticos com 2 mm de diâmetro com uma composição formada por 50% de Ni e 50% de Ti. Para dar forma de mola ao fio utiliza-se um fuso como apresentado na Figura 3.2. Esse fuso com o fio de SMA é, então, levado ao forno para realização do tratamento térmico que fornecerá o treinamento de forma.



Figura 3.2 – Modelo de instrumento utilizado para a fabricação de molas em SMA (Shape Training Tutorial, 2004).

Grassi (2014) realiza um estudo sobre o efeito de tratamentos térmicos com temperaturas na faixa de 500°C a 600°C em mini molas de ligas com memória de forma NiTi. No trabalho citado, os tratamentos térmicos consistem em manter a amostra em uma determinada temperatura por um tempo estabelecido, seguido de um resfriamento à temperatura ambiente. Para diferentes temperaturas e tempos de tratamento térmico são obtidas as temperaturas de transformação de fase (M_s , M_f , A_s , A_f), assim como a influência da variação desses parâmetros na formação da fase-R.

A fase-R em ligas com memória de forma de NiTi é bastante evidente principalmente após tratamentos térmicos ou termomecânicos (Lagoudas, 2008; Otsuka e Wayman, 1998). À medida que a liga com memória de forma NiTi é tratada termicamente em temperaturas mais elevadas, as temperaturas M_s e M_f tendem a aumentar e R_s e R_f (temperaturas de início e de fim da transformação da fase R no resfriamento, respectivamente) tendem a diminuir, fazendo os picos de transformação martensítica e da transformação intermediária da fase-R

se sobrepossem, causando uma transformação direta da austenita para a martensita (Grassi, 2014).

A Tabela 3.1 mostra as temperaturas de transformação de fase (R_s e R_f para transformação direta; A_s' e A_f' para a transformação reversa) em função da temperatura de recozimento.

Tabela 3.1 - Temperaturas de transformação da fase R obtidas em ensaios na DSC (Grassi, 2014).

Temperatura de Transformação de fase (°C)				
Temperatura de Recozimento	R_s	R_f	A_s'	A_f'
Como Recebida	9	-8,7	0,5	14,1
200°C	12,5	-4,7	1,9	18,2
300°C	9,6	-6,2	1,7	16,1
400°C	35,6	0,4	8,6	42,1
500°C	25,6	18,3	23,1	28,5

Todas as temperaturas aumentaram com o recozimento a 400°C, o que é um provável efeito da formação de precipitados ricos em Ni, retirando este elemento da fase de equilíbrio NiTi e fazendo assim as temperaturas de transformação aumentarem. No tratamento a 500°C observa-se um comportamento das temperaturas de transformação que indica que a fase R começa a desaparecer: as temperaturas R_s e A_f' tendem a diminuir e as temperaturas A_s' e R_f tendem a aumentar, estreitando o pico de transformação da fase R. Este comportamento é acompanhado da diminuição da entalpia de transformação, devido à menor área interna aos picos de transformação e da histerese térmica (Grassi, 2014).

A partir dos resultados, sugere-se realizar um tratamento térmico aquecendo o material até a temperatura de 500° C e mantê-lo por 20 minutos. Para encerrar o tratamento é feita uma têmpera em água à temperatura ambiente pois, como o diâmetro do fio utilizado é consideravelmente maior que o das mini molas consideradas por Grassi (2004), a velocidade de resfriamento seria muito baixa se mola fosse resfriada apenas no ar à temperatura ambiente.

Para a realização do tratamento térmico citado acima foi utilizado um forno elétrico (Jung, FO8080) capaz de alcançar uma temperatura de até 1200°C, suas características estão apresentadas na Figura 3.3 e na Figura 3.4.



Figura 3.3 - Forno Jung, série FO8080.

 <p>Fornos Jung Ltda Rua Bahia, 3465 - Salto 89031-002 - Blumenau - SC Fone. +55 47 3327 0000 www.jung.com.br jung@jung.com.br</p>	NUMERO	8080
	ANO	2014
	MODELO	LF09612
	C	1200
	kW	16
	VOLTS	220
	AMPERES	43
	FASES	3
	kg	320

Figura 3.4 - Placa de identificação com as especificações do forno.

A mola obtida após o tratamento térmico citado é mostrada na Figura 3.6.

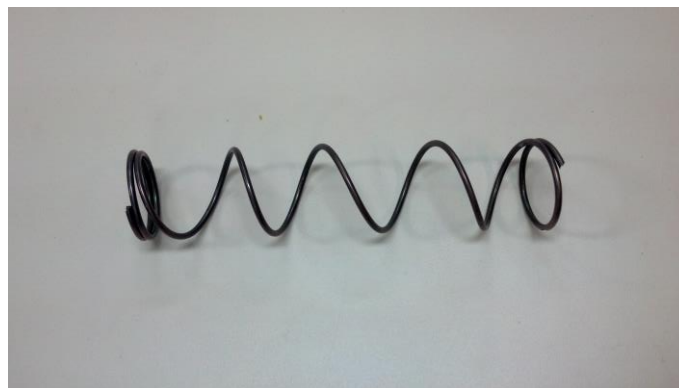


Figura 3.5 - Mola fabricada com SMA.

Uma análise DSC feita no material utilizado na fabricação das molas antes do tratamento térmico apresentou as temperaturas características expostas na Tabela 3.2. No ANEXO 7.12 são apresentadas as demais informações obtidas através do gráfico gerado durante o experimento.

Tabela 3.2 - Temperaturas de transformação de fases no material sem tratamento térmico.

Temperaturas de Transformação Martensítica [°C]			
A _s	A _f	M _s	M _f
-5,83	16,51	14,44	-8,41

A mesma análise DSC foi realizada para o material após o tratamento térmico conforme mostrado no gráfico do Anexo 7.13. Neste caso, diferente do material antes do tratamento térmico, percebe-se que o material não contém uma fase intermediária. As temperaturas de transformação de fases são apresentadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 - Temperaturas de transformação martensítica no material após o tratamento térmico

Temperaturas de Transformação Martensítica [°C]					
A_s	A_f	R_s	R_f	M_s	M_f
8,72	19,91	6,01	-3,15	-30,19	-53,56

De acordo com os resultados, as temperaturas de formação da fase austenítica aumentaram seus valores após o tratamento térmico, tendo sua completa formação na temperatura de 19,91°C. Essa temperatura de A_f não é ideal pois está muito próxima da temperatura ambiente, na qual são realizada os ensaios, o mais conveniente seria ter temperaturas menores que 15°C. A partir dos resultados, percebe-se que houve a formação de uma fase intermediária no material e as temperaturas de formação da fase martensítica diminuíram consideravelmente. Mesmo com o resultado do tratamento térmico não sendo ideal, devido ao surgimento da fase intermediária e à temperatura A_f , o objetivo foi alcançado, pois uma mola pseudoelástica foi fabricada permitindo ensaios que possibilitem sua caracterização.

3.3. PROJETO DA ESTRUTURA PRINCIPAL

Inicialmente desenvolveu-se o projeto de um dispositivo para caracterizar o comportamento mecânico de molas helicoidais de SMA. Esse dispositivo, projetado no SolidWorks, é composto por uma estrutura rígida como apresenta a Figura 3.6. Cabe mencionar que essa estrutura será utilizada tanto para a realização dos ensaios quase-estáticos como dos ensaios dinâmicos. Em cada um desses casos, a estrutura projetada será utilizada no aparato experimental correspondente.

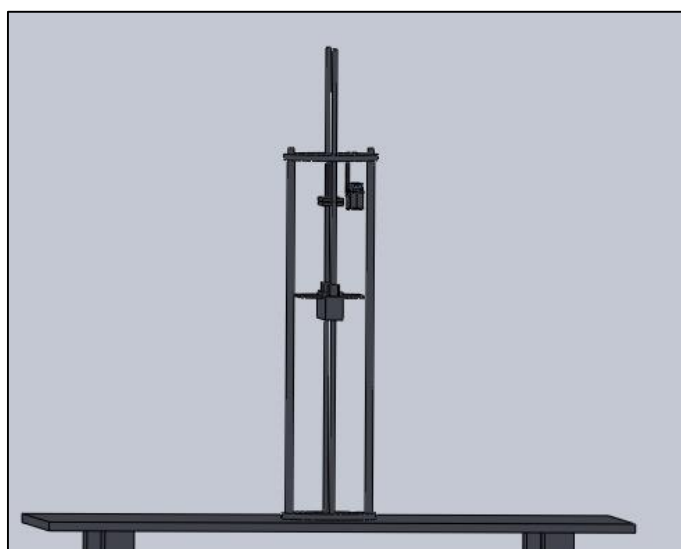


Figura 3.6 - Estrutura desenvolvida no SolidWorks.

A estrutura, apresentada na Figura 3.6, possui placas fixas nas extremidades inferior e superior, mostradas em detalhe na Figura 3.7, que são conectadas entre si por hastes. A mola a ser testada é fixada na extremidade superior, onde não há deslocamento, e uma massa móvel, que pode ser vista no meio da Figura 3.7. Para garantir um movimento apenas vertical da massa e, conseqüentemente, da mola, dois eixos passam pela massa, como pode ser visto na Figura 3.8. Além disso, na parte superior, mostrada em detalhes na Figura 3.8, estão previstos os lugares para a fixação dos sensores necessários.

Entre a mola e a parte superior fixa é instalada uma célula de carga, enquanto a parte inferior é presa diretamente à massa central. Essa massa tem a função de ser a parte móvel do sistema. No caso dos testes quase-estáticos, o carregamento será realizado através dessa massa, no caso dos testes dinâmicos a massa corresponde ao elemento inercial do oscilador com 1 grau de liberdade.

Um ponto importante em relação à massa central são suas dimensões. Deseja-se a menor massa possível para nesta peça. A parte central apresenta uma concentração de massa maior pois é necessário um comprimento mínimo para o posicionamento dos rolamentos lineares de esfera. Esses rolamentos, que correm sobre os eixos de movimentação, têm como objetivo diminuir o atrito. Sobre a superfície da massa deve ainda incidir o laser do sensor ótico para medição da distensão da mola. Devido ao posicionamento do laser foi necessário prolongar a superfície da massa até as hastes de sustentação, como apresentado na Figura 3.8, no entanto, uma espessura menor que a da parte central foi considerada.

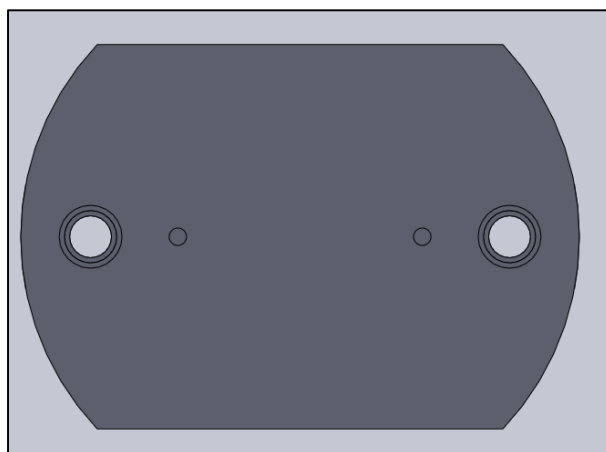


Figura 3.7 – Detalhamento da placa superior do aparato.

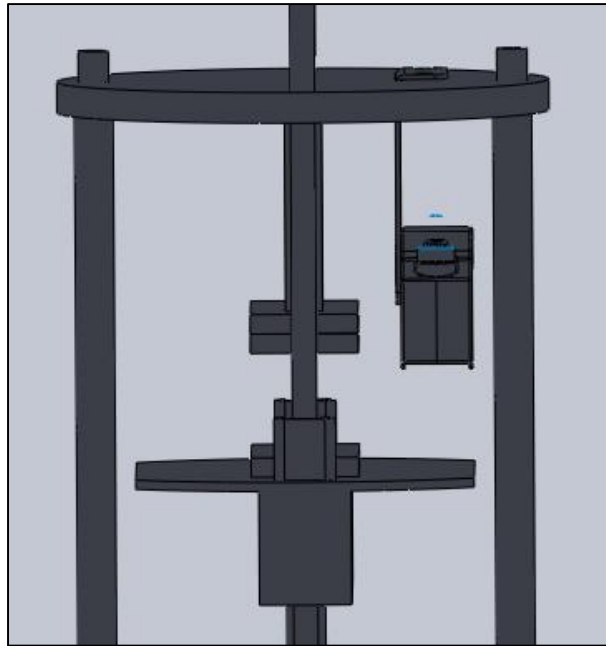


Figura 3.8 – Detalhamento da parte superior do aparato.

A mola é fixada por pressão de duas placas de metal em sua extremidade superior, posicionando a primeira espira entre as duas placas. Na sua parte inferior, a última espira é posicionada entre uma placa de metal e a massa central. A Figura 3.9 mostra detalhes desta fixação. Feito isso, a mola está pronta para um ensaio, seja ele quase-estático ou dinâmico.



Figura 3.9 - Fixação da mola.

Os eixos de movimentação utilizados na construção do dispositivo (Eixo Aço Cromo KALATEC 08 mm) são tratados com uma tempera por indução fazendo com que seu acabamento superficial seja ideal para as condições do projeto, fornecendo um baixo atrito para os rolamentos (Figura 3.10).



Figura 3.10 - Eixo Aço Cromo KALATEC 08 mm.

Os elementos foram projetados levando em conta que a estrutura será montada e desmontada várias vezes durante a pesquisa. Por isso, prezando por mobilidade e alinhamento do projeto, tanto os eixos de movimentação quanto os eixos de sustentação são rosqueados na base inferior do dispositivo e em sua parte superior foi utilizado porcas para dar aperto.

Toda a estrutura desenvolvida, com exceção dos eixos de movimentação que foram comprados, é feita em alumínio para que fique o mais leve possível e não exija demasiada potência do *shaker* nos ensaios dinâmicos.

3.4. INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1. CÉLULA DE CARGA

Uma célula de carga (Alfa SV-50 com capacidade de 490 N) é fixada na extremidade superior da estrutura, para medir o carregamento imposto à mola durante os ensaios. Esse modelo é fabricado em alumínio anodizado e é muito utilizado em conversão de balanças mecânicas. Na Figura 3.11 é apresentada a célula de carga utilizada no projeto.



Figura 3.11 - Célula de carga SV-50, Alfa Instrumentos

A célula de carga deve ser alimentada com uma tensão máxima de 15V (VCC ou VCA). O sensor possui sensibilidade de 2mV/V, o que significa dizer que para cada 1V de entrada a célula de carga produzirá 2mV de saída. Como no experimento a célula de carga é alimentada por fonte de corrente contínua de 9V, a tensão de saída em seu carregamento máximo possível, 50 Kg, será de 18 mV.

Como o experimento não tem uma blindagem adequada e tendo em vista a placa de aquisição utilizada juntamente com um módulo de aquisição, Ni cDAQ-9178 e Ni 9201 respectivamente, trabalharem com um sinal menor que 1V não é muito adequado pois existem muito ruídos que podem comprometer significativamente os dados obtidos. Desta forma, foi utilizado um amplificador para multiplicar o sinal de saída da célula de carga por mil (1000x). Com isso, o sinal de saída quando o equipamento for solicitado com a carga máxima será 18V.

A placa de aquisição utilizada tem uma faixa de trabalho de -10 V a 10 V, o que implica em uma restrição de projeto pois a célula de carga poderia enviar um sinal maior que esse limite de tensão. Por isso, foi utilizado juntamente com o amplificador um divisor de tensão, a partir da utilização de capacitores instalados em paralelo.

O circuito elétrico puramente resistivo com divisor de tensão é formado por dois resistores em série, R1 e R2, como mostrado na Figura 3.12:

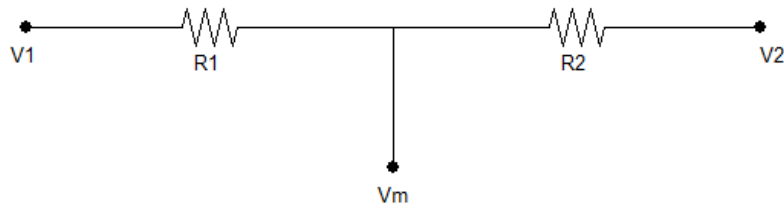


Figura 3.12 - Diagrama do divisor de tensão.

A tensão real é a diferença entre V_1 e V_2 , denominado V_{Real} . A tensão obtida pelo divisor de tensão é a diferença entre V_2 e V_m , denominada V_{medido} . A tensão medida pelo divisor de tensão se relaciona com a tensão real da seguinte forma:

$$V_{medido} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{Real} = \frac{1}{f_m} V_{Real} \quad (1)$$

onde $f_m = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$.

Como no circuito são utilizados dois resistores iguais, apenas 50% do sinal de saída da célula de carga (V_{Real}) é enviado para a placa de aquisição (V_{medido}). Dessa forma garantimos que o sinal de saída será no máximo 9 V quando célula de carga for carregada com 50 Kg.

Nesse ponto, são realizados ensaios para a calibração do sensor. O procedimento é realizado a partir da utilização de massas padronizadas no carregamento da célula de carga. Para cada massa adicionada obteve-se um valor de tensão de saída, como apresento na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Dados para a calibração da célula de carga.

Tensão (V)	Massa (g)
0,043	142
0,165	864
0,201	1036
0,286	1554
0,301	1638
0,313	1722
0,333	1928
0,416	2338
0,476	2750
0,547	3160
0,603	3572
0,935	5626
1,245	7680
1,615	9734
1,945	11788

Com os valores obtidos de massa e tensão foi realizada uma regressão linear para encontrar os coeficientes do ajuste de uma reta, apresentada na Eq. (2), que representa o comportamento da célula de carga, como apresenta a Figura 3.13.

$$y(x) = 0.0001636x + 0.02895. \quad (2)$$

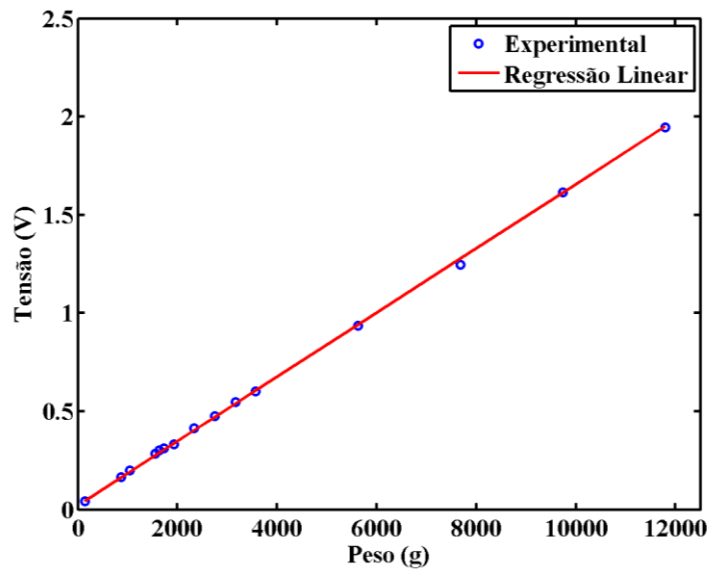


Figura 3.13 - Calibração da célula de carga.

Tendo em vista um nível de ruído considerável verificado na aquisição dos dados, optou-se pela utilização do filtro de Butterworth de segunda ordem, implementado através de biblioteca do Matlab. A Figura 3.14 apresenta o sinal obtido pela placa de aquisição, em azul, e o sinal após a utilização do filtro, em vermelho, mostrando um bom desempenho do mesmo.

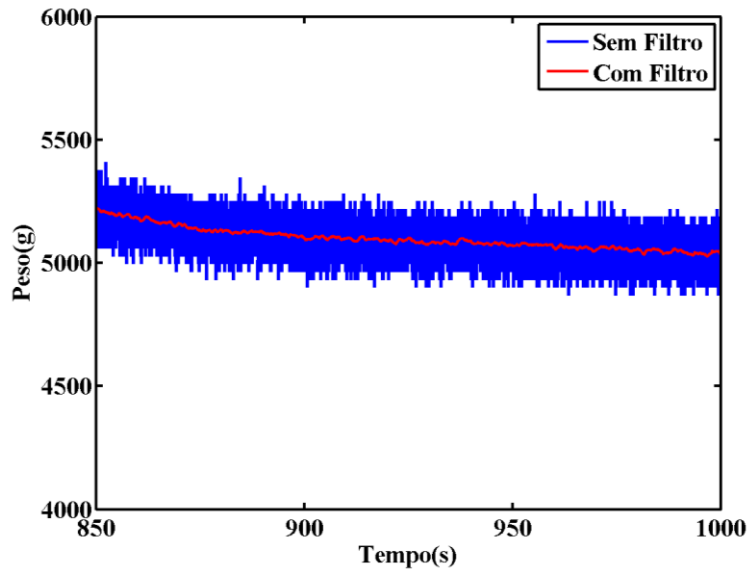


Figura 3.14 - Sinal da força no tempo com e sem filtro.

3.4.2. SENSOR LASER

O sensor óptico utilizado para mensurar a distensão da mola durante os ensaios é o modelo OADK 25U7480 da empresa Baumer, apresentado na Figura 3.15, que possui uma faixa de leitura de 100 a 1000 mm como apresentado na Figura 3.16.



Figura 3.15 - Sensor óptico Baumer (OADK 25U7480).

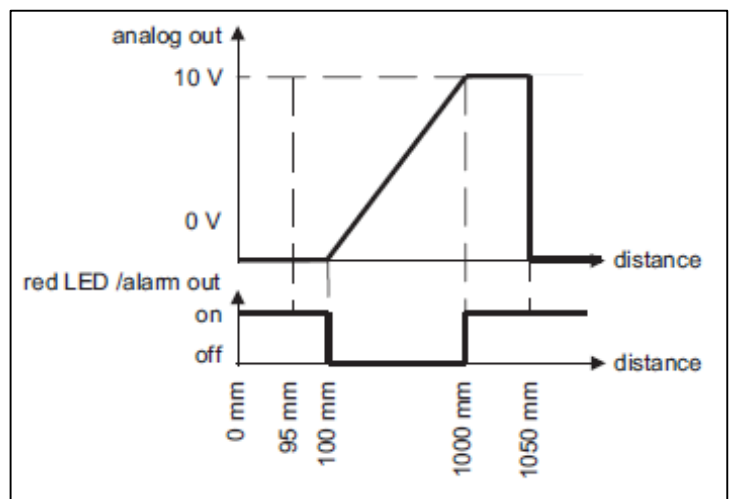


Figura 3.16 - Limites de trabalho do sensor laser (Manual Baumer).

De acordo com o fabricante, a cada 100 mm avançados ocorrerá uma variação de 1 V, e por consequência, a cada 4 mm avançado ocorrerá variações nos valores após a virgula, como demonstra a Figura 3.17.

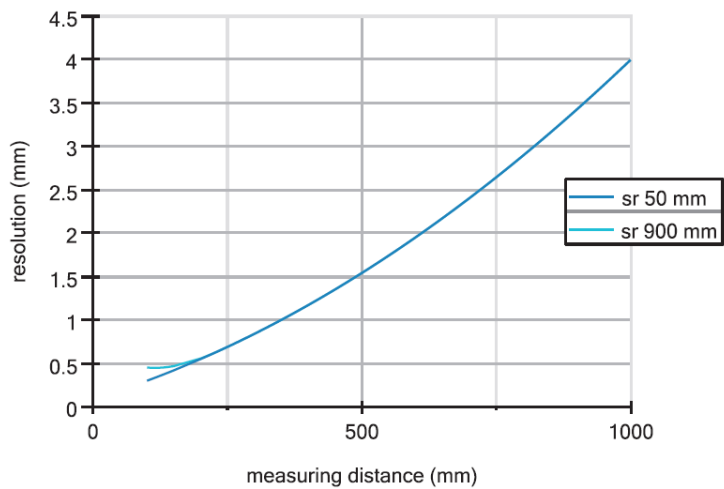


Figura 3.17 - Resolução do sensor laser (Manual Baumer).

O fabricante deixa claro que isso é apenas uma generalização dos modelos e que o ideal seria realizar uma calibração mais detalhada. Para realizar esse processo foi utilizado o mesmo princípio de calibração da célula de carga. Nesse caso, o laser foi posicionado em diferentes distâncias de uma base observando a variação nos valores de tensão obtidos pela placa de aquisição, os valores observados encontram-se na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Dados para a calibração do sensor laser.

Distância (mm)	Tensão (V)	Distância (mm)	Tensão (V)
104	0,029	254	1,679
114	0,130	264	1,793
124	0,250	274	1,901
134	0,363	284	2,012
144	0,478	294	2,125
154	0,590	304	2,232
164	0,701	314	2,342
174	0,814	324	2,454
184	0,927	334	2,564
194	1,019	344	2,674
204	1,132	354	2,784
214	1,241	364	2,894
224	1,349	374	3,008
234	1,461	384	3,114
244	1,571	394	3,224

Com os valores obtidos de distância e tensão foi realizada uma regressão linear para encontrar os coeficientes da reta, apresentados na Eq. (3), que representa o comportamento do sensor laser, como apresentado na Figura 3.18.

$$y(x) = 0.011x - 1.112. \quad (3)$$

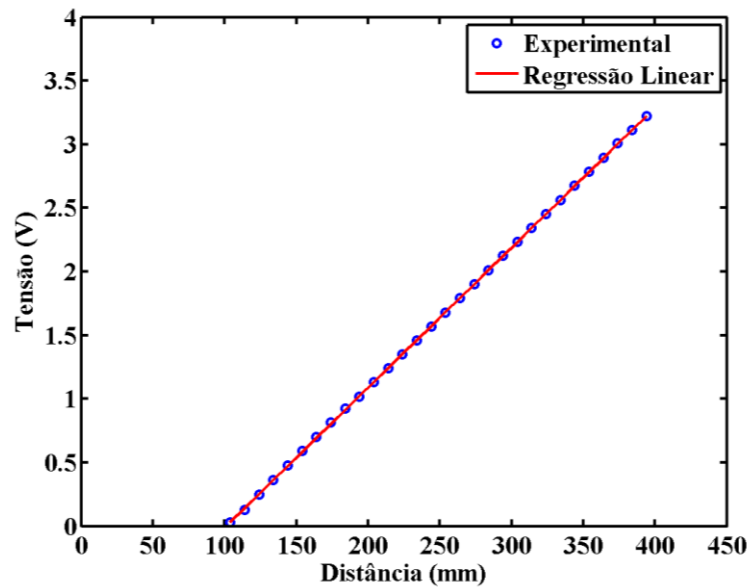


Figura 3.18 - Calibração do sensor laser.

Novamente, o filtro de Butterworth é utilizado para o sinal obtido pelo sensor laser. A Figura 3.19 apresenta o sinal coletado experimentalmente, em azul, e o sinal tratado com o filtro, em vermelho.

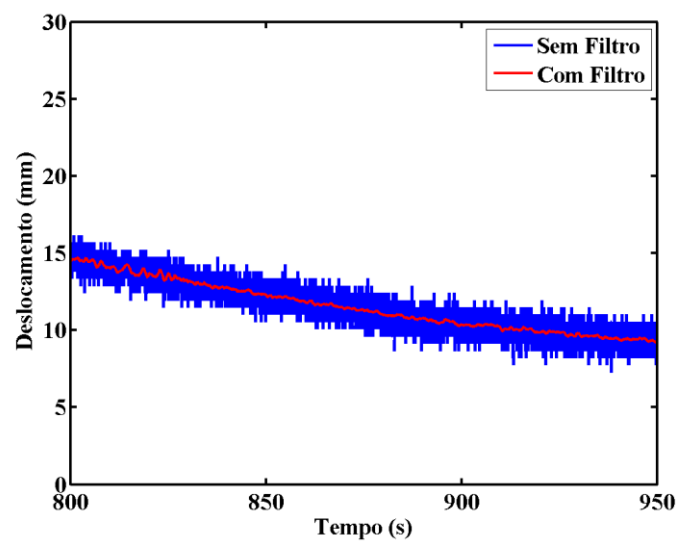


Figura 3.19 - Deslocamento no tempo com e sem filtro.

3.5. APARATO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS QUASE-ESTÁTICOS

Os ensaios quase-estáticos devem acontecer de forma lenta e contínua para que o laço de histerese seja analisado. Para isso, foi utilizada uma mesa para garantir uma estabilidade do dispositivo e um sistema de vasos comunicantes para que o carregamento e descarregamento da mola aconteça de forma lenta.

O sistema de vasos comunicantes foi projetado da seguinte maneira, um reservatório de fluido é acoplado à massa à qual é fixada a mola e uma força prescrita é aplicada por meio do controle do volume de fluido presente no reservatório. Para que este carregamento aconteça de forma suave e constante, um segundo reservatório é conectado ao primeiro por meio de um tubo e, por diferença de nível entre eles, é possível carregar e descarregar a mola com praticamente a mesma velocidade. Pela diferença de nível e pelo controle da perda de carga localizada (restrições no tubo) pode-se controlar a velocidade do carregamento e do descarregamento aplicado à mola. Para se ter um maior controle e praticidade durante os experimentos foi acoplado um registro entre os reservatórios, garantindo que o início do carregamento inicie apenas quando a posição do reservatório estiver definida e não quando houver qualquer diferença de nível.



Figura 3.20 - Sistema de vasos comunicantes para o carregamento contínuo da mola.



Figura 3.21 - Registro utilizado no sistema.

Fabricou-se uma mesa estável para posicionar o aparato experimental durante os testes. Sua parte superior foi feita em madeira com um furo central e 4 furos o cercando como apresentado na Figura 3.22.

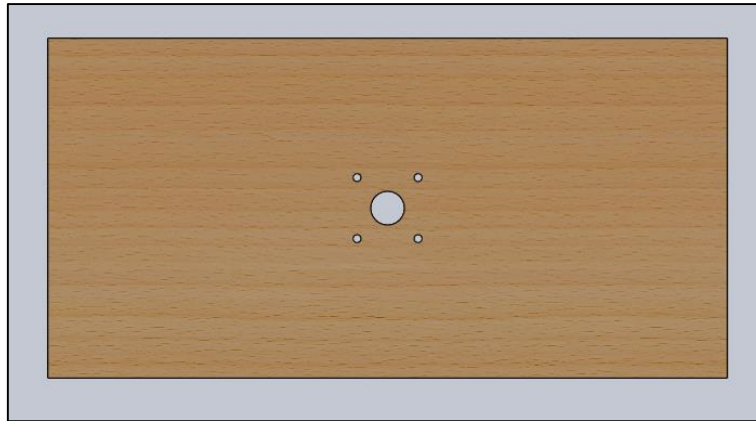


Figura 3.22 - Representação feita em SolidWorks para o tampão da mesa.

O furo central possibilita a passagem de uma haste rosqueada à massa central que é responsável por transferir o carregamento do reservatório à mola. Esta haste suporta o peso do reservatório a partir de um gancho soldado em sua extremidade inferior, como apresenta a Figura 3.23.



Figura 3.23 - Haste de carregamento

Os quatro furos ao redor são para colocar parafusos que atravessam a base inferior do aparato experimental e a madeira para serem presos com porcas e manter o aparato estável durante os ensaios. A Figura 3.24 apresenta a bancada experimental (aparato projetado, mesa e sistemas de vasos comunicantes) para a realização dos ensaios quase-estáticos.



Figura 3.24 – Aparato experimental para a realização dos ensaios estáticos.

3.6. APARATO EXPERIMENTAL PARA ENSAIOS DINÂMICOS

Os ensaios dinâmicos são realizados para análise do comportamento dinâmico de um oscilador de 1 grau de liberdade que possui como elemento de rigidez uma mola de SMA. Neste contexto, tem-se interesse em realizar ensaios com diferentes amplitudes e frequências de forçamento. Neste trabalho, no entanto, realizaram-se apenas ensaios com amplitude de excitação constante e variação na frequência de forçamento.

Para a realização dos ensaios dinâmicos, fixa-se o aparato experimental projetado em um *shaker*, conforme apresentado na Figura 3.25, que é controlado por uma central de controle (*Signal Star Vector*) utilizando acelerômetro. Para obter as informações de excitação do *shaker* (*Model ET-127*) é utilizado um acelerômetro (*PCB PIEZOTRONICS, MODEL-352C34*), e para as informações de deslocamento da massa e força a qual a mola está submetida são utilizados o sensor laser e a célula de carga, respectivamente, conforme já descrito no texto. .



Figura 3.25 - Estrutura para a realização de ensaios dinâmicos.

4. RESULTADOS

4.1. ENSAIO QUASE-ESTÁTICO

Terminado o desenvolvimento e construção da estrutura e sua instrumentação, iniciam-se os ensaios denominados quase-estáticos. Nesta etapa são realizados ensaios com uma mola linear e com a mola de SMA fabricada.

Primeiramente, realiza-se o ensaio com uma mola linear realizando um ciclo de carregamento e descarregamento lento conforme mostrado na Figura 4.1. A Figura 4.2 apresenta o sinal de deslocamento obtido em resposta ao carregamento aplicado. Nos dois resultados, o sinal em azul consistem no sinal original coletado pela placa de aquisição, enquanto o sinal em vermelho representa o sinal após a utilização do filtro de Butterworth.

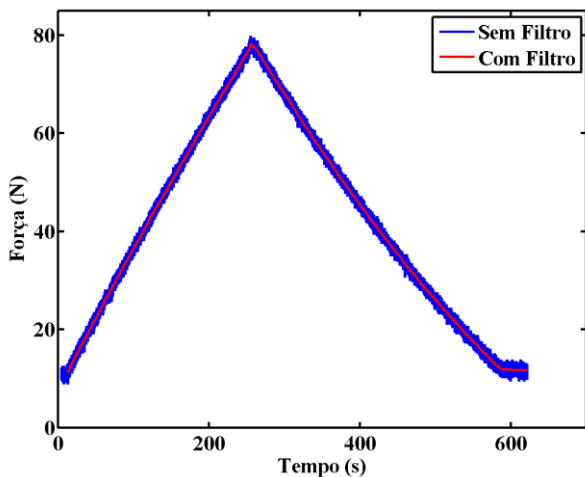


Figura 4.1 – Ciclo de carregamento e descarregamento imposto à mola linear.

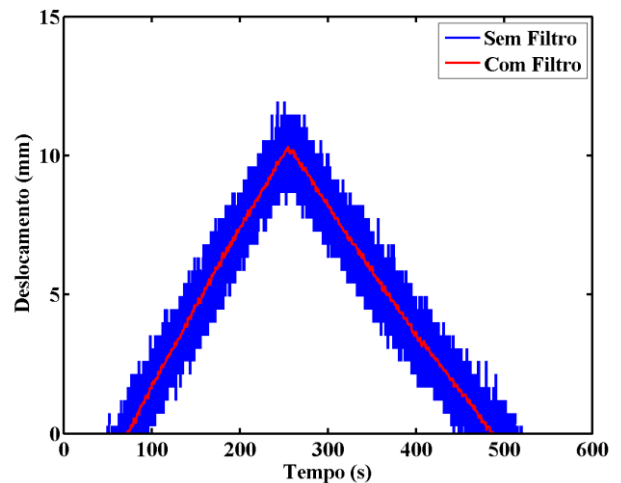


Figura 4.2 - Deslocamento da mola linear em resposta ao carregamento aplicado.

A Figura 4.3 apresenta o comportamento força-deslocamento obtido para a mola linear. Como esperado para um elemento de rigidez linear na fase elástica, o caminho percorrido no carregamento é a mesmo que no descarregamento. Dessa forma, pode-se concluir que o aparato está funcionando corretamente.

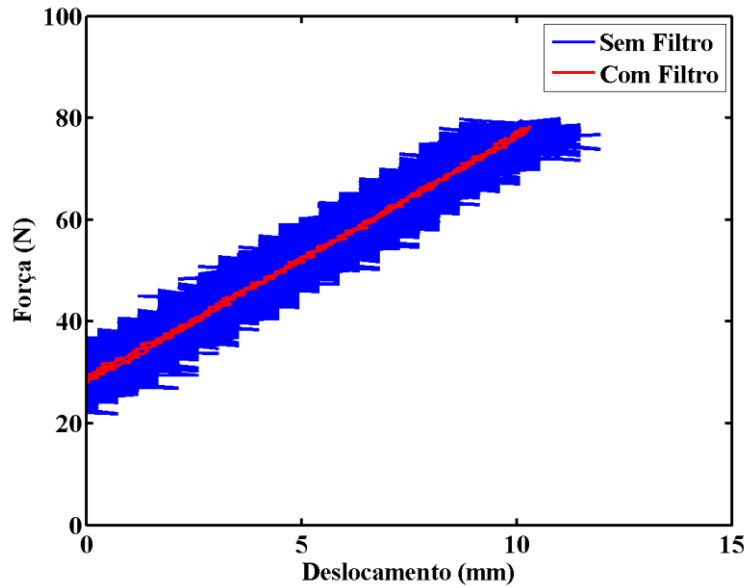


Figura 4.3 – Comportamento força x deslocamento da mola linear.

Após os ensaios com a mola linear, iniciam-se os testes com a mola de SMA pseudoelástica. A Figura 4.4 apresenta o ciclo de carregamento aplicado ao material, enquanto a Figura 4.5 apresenta o deslocamento sofrido pela mola durante o ciclo de carregamento.

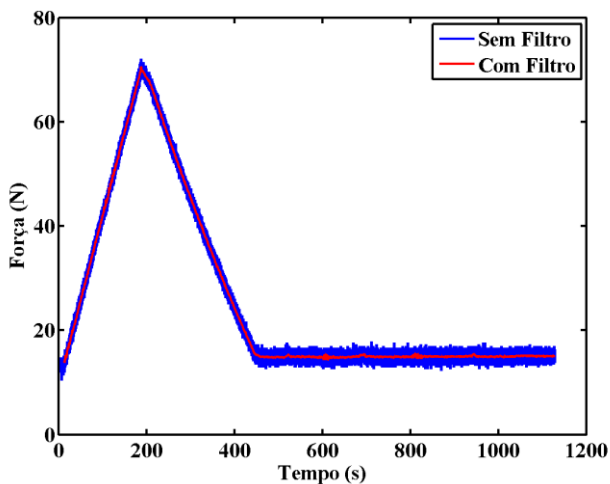


Figura 4.4 - Ciclo de carregamento e descarregamento imposto à mola de SMA.

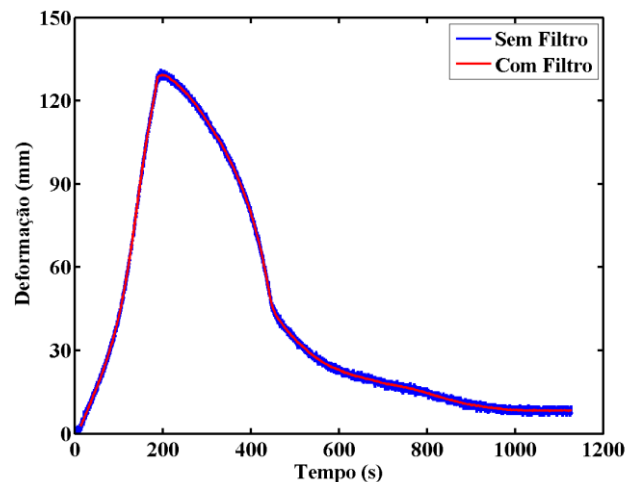


Figura 4.5 - Sinal do deslocamento da mola de SMA como resposta ao carregamento.

O sinal da força no tempo para a mola pseudoelástica é similar ao sinal obtido no ensaio com a mola linear, mostrado na Figura 4.1, com a diferença do tempo de duração total do ensaio, que foi maior no caso da mola de SMA. Nesse caso, após cessar o descarregamento, continuou-se a aquisição de dados até que a mola de SMA recuperasse totalmente a deformação sofrida. No caso do ensaio com a mola linear, o deslocamento estabilizou assim que o descarregamento foi encerrado.

O sinal do deslocamento da mola de SMA fabricada, Figura 4.5, é muito diferente quando comparada ao sinal da mola linear, apresentado na Figura 4.2. As não linearidades das ligas com memória de forma interferem na forma como o deslocamento do material se desenvolve. O motivo do ensaio com a mola de SMA ter sido mais longo se dá pelo fato de que logo após o descarregamento encerrado, o material ainda não havia estabilizado seu comportamento. Ou seja, o material necessitou de mais tempo voltar à sua forma original, tornando o ensaio mais longo.

A Figura 4.6 apresenta o comportamento força-deslocamento obtido para a mola de SMA fabricada, onde o laço histerese, característico do comportamento pseudoelástico, pode ser verificado. Esse resultado é compatível com laços obtidos experimentalmente na literatura para elementos de rigidez de SMA pseudoelásticos.

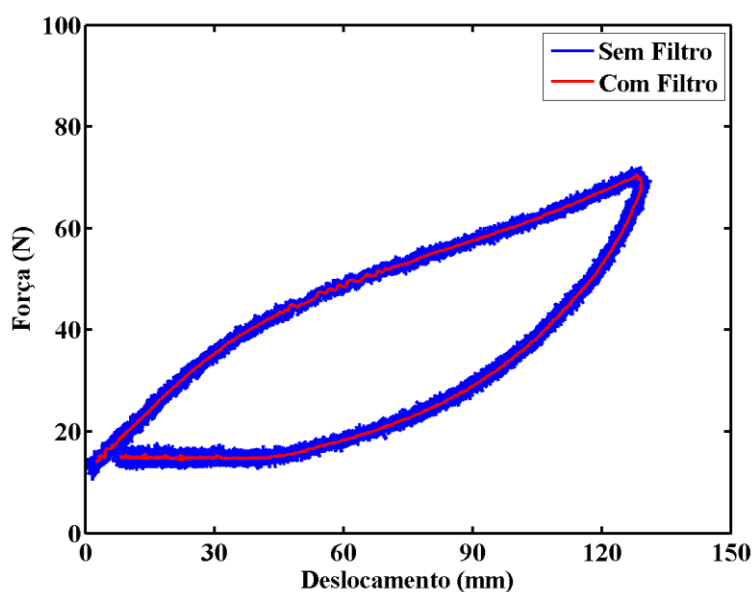


Figura 4.6 – Comportamento força-deslocamento da mola de SMA pseudoelástica.

Após a realização do ensaio com apenas um ciclo de carregamento, percebe-se que o laço de histerese não está completamente fechado, o que pode ser explicado pela mola ter sido recém-fabricada e não ter passado ainda por ciclos repetidos de carregamento. Desta forma, em seguida foi realizado um ensaio com dezesseis ciclos contínuos de carregamento e descarregamento semelhantes ao apresentado na Figura 4.4. A Figura 4.7 apresenta o deslocamento da mola obtido. Este ensaio foi feito com a máxima padronização possível, levando em consideração o nível de fluido que carrega a mola, assim como o seu completo descarregamento.

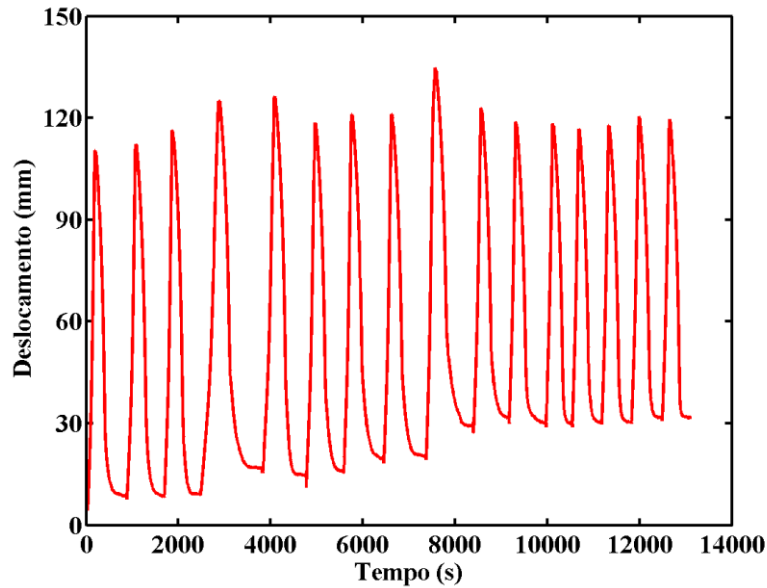


Figura 4.7 – Deslocamento da mola de SMA para 16 ciclos de carregamento e descarregamento.

A partir do resultado obtido, percebe-se que a mola apresenta uma variação em seu deslocamento durante os diferentes ciclos de carregamento, no entanto, os últimos 5 indicam uma estabilização de comportamento. Lagoudas (2008) aborda esse fenômeno dizendo que apenas depois de um número de ciclos de trabalho do material que seu laço de histerese é estabilizado. Na Figura 4.8 é apresentado o comportamento da mola através do comportamento força-deslocamento. Nos laços iniciais, mais próximos ao eixo designado à força, percebe-se que eles não chegam a fechar, mostrando que o material ainda está em processo de estabilização. No entanto, os cinco últimos ciclos indicam uma proximidade da estabilização, onde os laços próximos estão sobrepostos e dão origem a uma linha mais grossa. A Figura 4.9 apresenta o último laço de histerese observado no material.

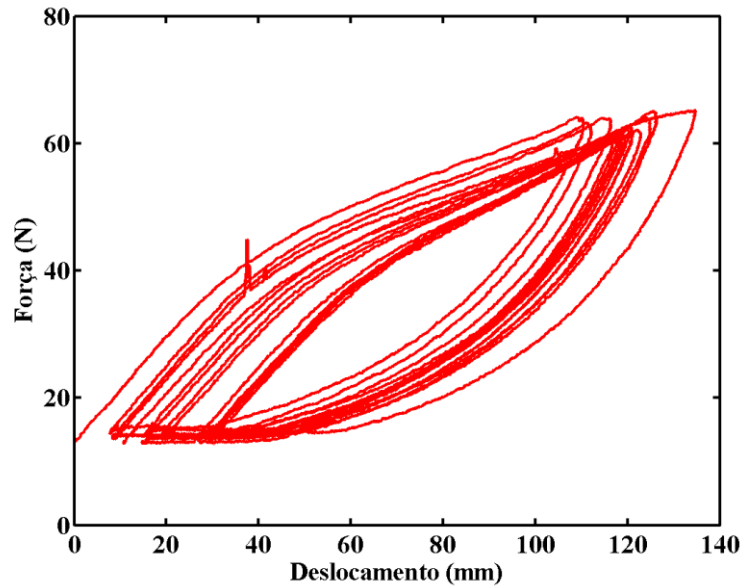


Figura 4.8 – Comportamento força-deslocamento em 16 ciclos de carregamento realizados na mola pseudoelástica.

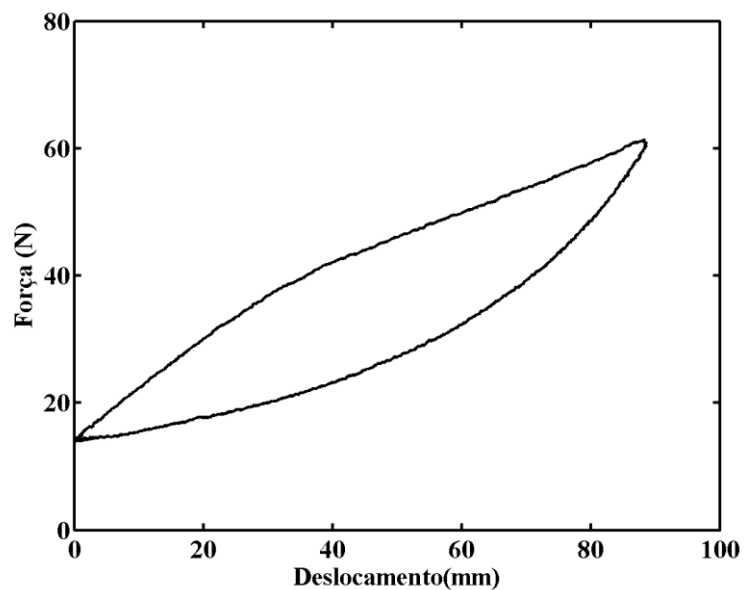


Figura 4.9 - Último laço de histerese observado no comportamento da mola pseudoelástica no 16º ciclo de carregamento.

4.2. ENSAIO DINÂMICO

Os ensaios dinâmicos são realizados com o propósito de observar e compreender o comportamento da mola pseudoelástica sob diferentes condições de forçamento.

Inicialmente, a estrutura principal foi posicionada no *shaker* e imposta a um forçamento com aumento contínuo da frequência (*sweep*) de 1 a 10 Hz para analisar qual frequência de ressonância

do oscilador de SMA. Nesse primeiro teste foi observado que a ressonância ocorre entre 4.3 e 4.6 Hz. A partir dessa constatação, definiu-se a faixa de frequência na qual o sistema seria excitado.

Após identificada a faixa de frequência de análise, considera-se um novo teste dinâmico com aumento da frequência de excitação e amplitude constante de 0.4 polegadas de pico a pico. Nesse ensaio, o *shaker* é programado para impor um forçamento ao sistema de 3 a 6 Hz variando a frequência de 0.1 em 0.1 Hz. Em cada frequência o oscilador permanece vibrando por 30 segundos para o sistema alcançar o regime permanente, sendo adquiridos os sinais de força e deslocamento. Com isso, observa-se a amplitude máxima de resposta do sistema para cada frequência assim como o comportamento força-deslocamento, conforme apresentado na Figura 4.10.

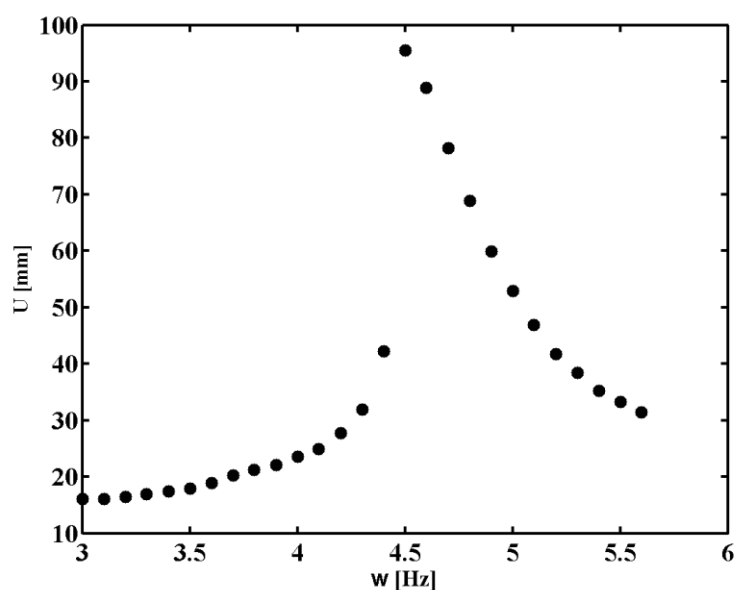


Figura 4.10 – Amplitude máxima de resposta do oscilador aumentando-se a frequência de forçamento.

Note que na região da ressonância a amplitude começa a aumentar assim como em um sistema linear, no entanto, quando a frequência aumenta de 4.4 para 4.5 Hz o sistema apresenta um salto em sua amplitude máxima de resposta, passando de 45mm para quase 100mm quando varia-se apenas 0.1Hz. Este efeito é conhecido como salto dinâmico e acontece principalmente devido a transformação da fase austenítica em fase martensítica induzida por tensão. Após a região de ressonância, a estrutura volta a apresentar um comportamento linear, onde a amplitude vai diminuindo de acordo com o distanciamento da região de ressonância

A Figura 4.11 e a Figura 4.16 apresentam o comportamento força-deslocamento para algumas frequências de forçamento.

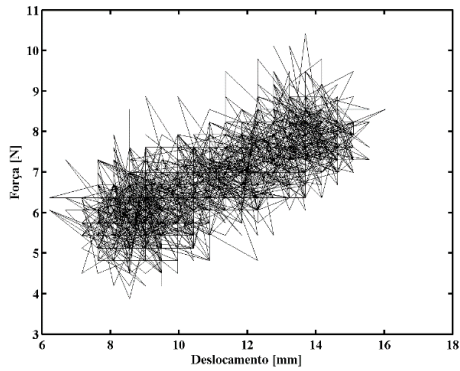


Figura 4.11 - Força por Deslocamento na frequência de 3 Hz.

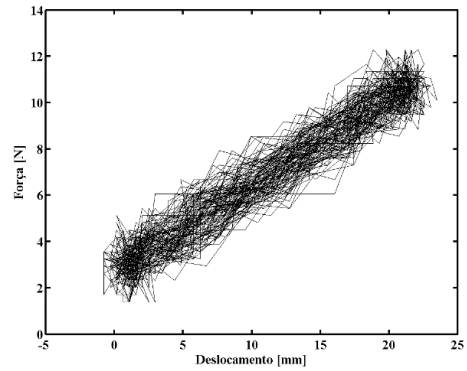


Figura 4.12 - Força por Deslocamento na frequência de 4 Hz.

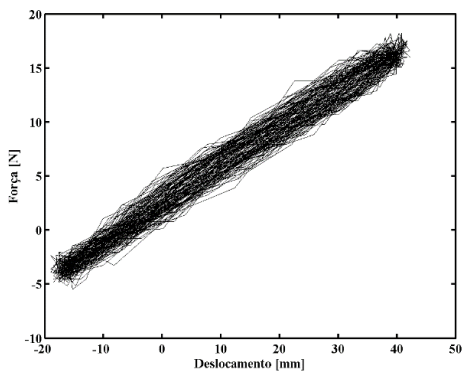


Figura 4.13 - Força por Deslocamento na frequência de 4.3 Hz.

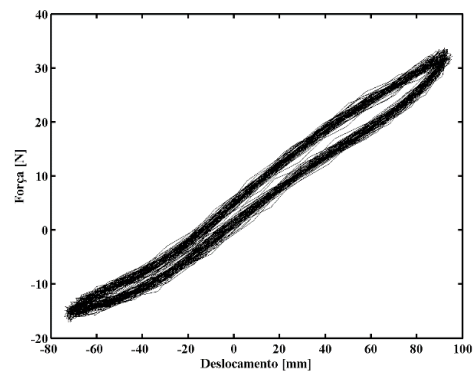


Figura 4.14 - Força por Deslocamento na frequência de 4.5 Hz.

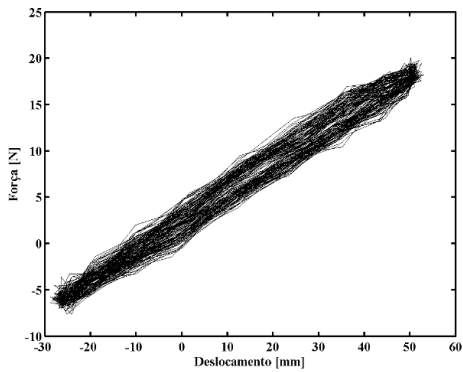


Figura 4.15 - Força por Deslocamento na frequência de 4.9 Hz.

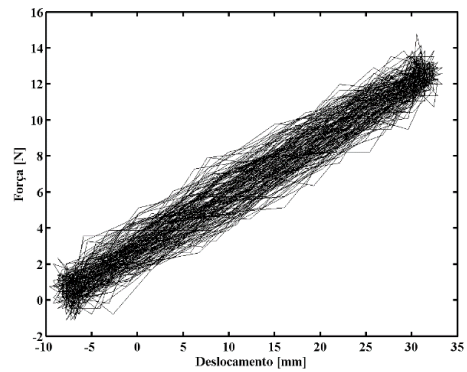


Figura 4.16 - Força por Deslocamento na frequência de 5.6 Hz.

Como salientado nos testes estáticos, a presença do ruído coletado pela célula de carga interfere na análise dos resultados, no entanto, naquele caso foi utilizado o filtro de Butterworth. Para os ensaios dinâmicos não se pode utilizar a mesma ferramenta, pois o filtro trabalha com um princípio de média no sinal, o que acarretaria gráficos com resultados incorretos.

Quando a amplitude de resposta do sistema e a força são pequenas a interferência do ruído é muito grande (Figura 4.11), impossibilitando qualquer análise sobre comportamento do sistema.

A partir da Figura 4.12 e da Figura 4.13, percebe-se que com a aproximação da frequência da região de ressonância, e aumento dos sinais de força e deslocamento, o ruído passa a ser menor que no caso da Figura 4.11 e percebe-se um comportamento aparentemente linear. Logo após o salto, na frequência de 4.5 Hz (Figura 4.14), nota-se a presença de um laço de histerese. Após passar pela ressonância o sistema vai reduzindo a amplitude máxima e o sistema volta a ter um comportamento linear.

Continuando a análise dinâmica, um ensaio semelhante é realizado, no entanto, diminuindo-se a frequência de forçamento. As amplitudes máximas obtidas em regime permanente são apresentadas na Figura 4.17.

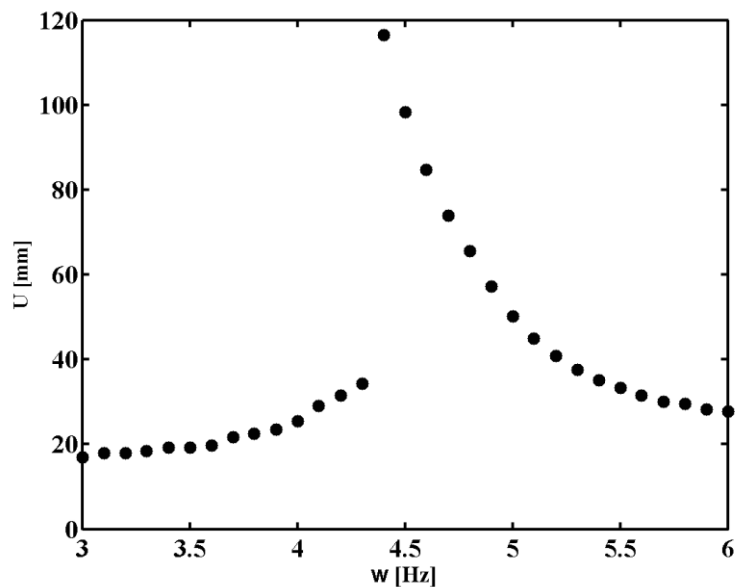


Figura 4.17 - Amplitude máxima de resposta do oscilador diminuindo-se a frequência de forçamento.

No ensaio executado com a frequência decrescendo, partindo de 6 para 3 Hz, percebe-se um comportamento diferente em relação ao ensaio anterior, aumentando-se a frequência, conforme evidenciado na Figura 4.18. Percebe-se uma diferença entre as amplitudes máximas de resposta alcançadas, chegando a cerca de 20mm de diferença nos dois casos, com a amplitude maior para o caso de diminuição da frequência. Outra diferença importante é a ocorrência dos saltos dinâmicos em frequências diferentes, como pode ser observado na Figura 4.19.

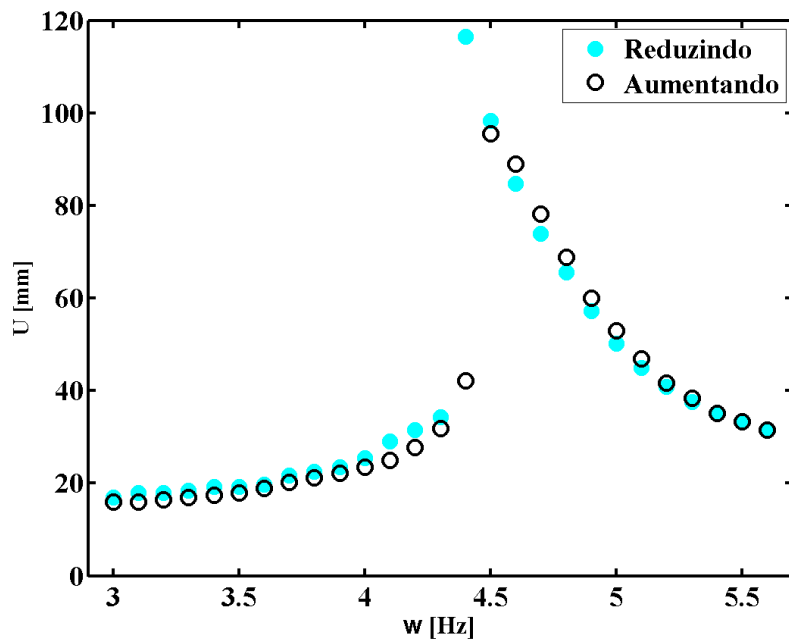


Figura 4.18 - Diferença nas amplitudes de resposta do sistema quando aumenta-se e diminui-se a frequência de excitação.

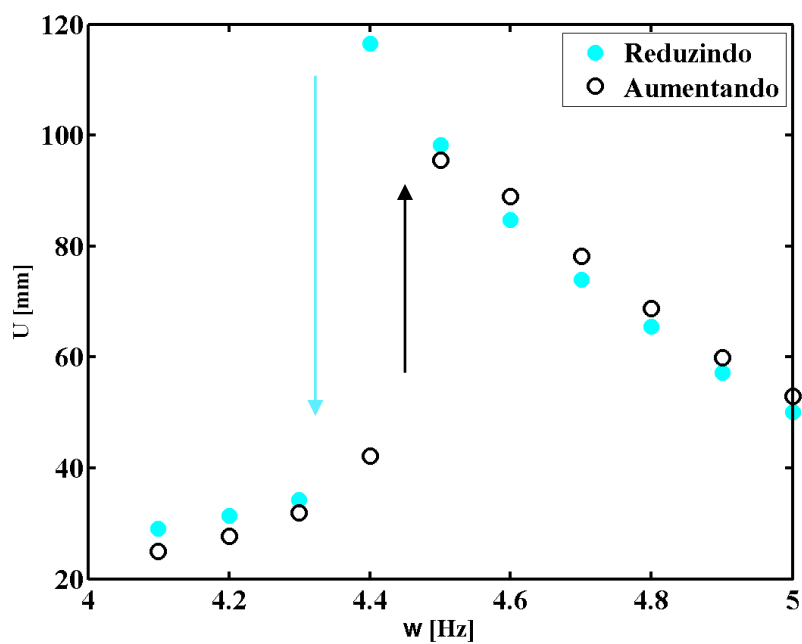


Figura 4.19 - Detalhamento dos saltos dinâmicos observados nos ensaios.

A seguir são apresentados alguns comportamentos do sistema a partir do gráfico de força por deslocamento em algumas frequências, Figura 4.20 a Figura 4.25.

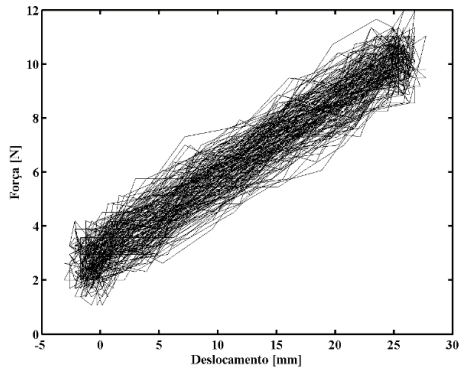


Figura 4.20 - Força por Deslocamento na frequência de 6 Hz.

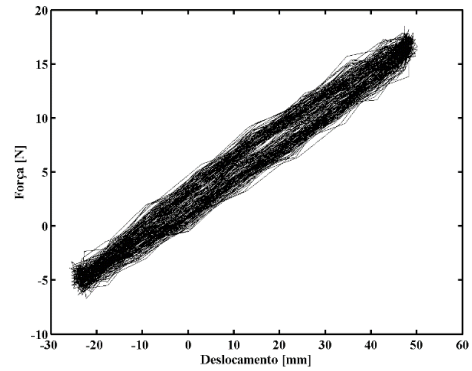


Figura 4.21 - Força por Deslocamento na frequência de 5 Hz.

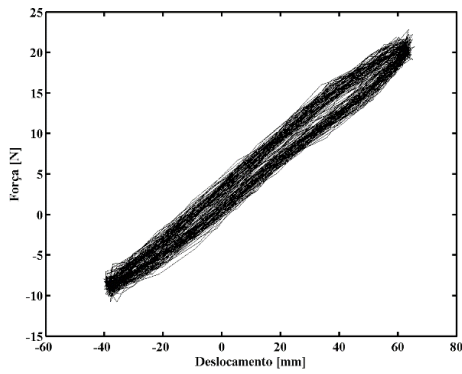


Figura 4.22 - Força por Deslocamento na frequência de 4.8 Hz.

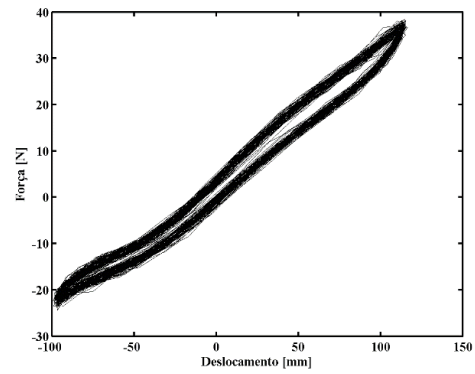


Figura 4.23 - Força por Deslocamento na frequência de 4.4 Hz.

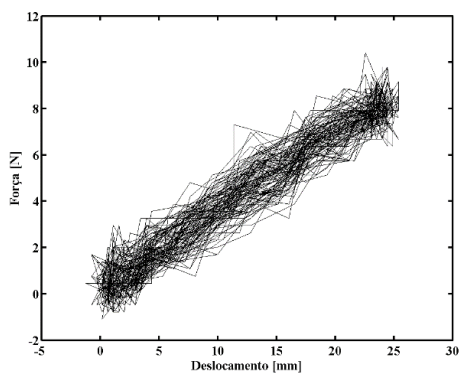


Figura 4.24 - Força por Deslocamento na frequência de 4 Hz.

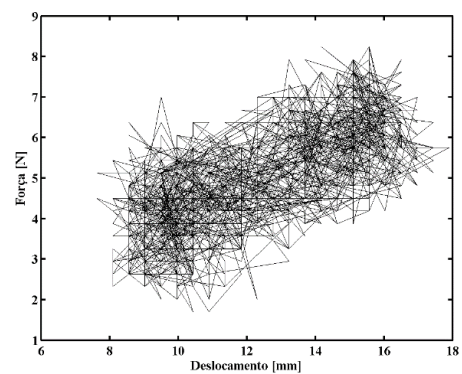


Figura 4.25 - Força por Deslocamento na frequência de 3 Hz.

Os problemas relacionados ao ruído ainda persistem, ou seja, enquanto a amplitude de resposta do sistema ainda não é alta o suficiente, a análise dos resultados se torna ineficaz como

apresenta a Figura 4.25. Assim como no ensaio realizado com o aumento da frequência, percebe-se a criação de um laço de histerese com a aproximação da região de ressonância, como podemos observar na sequência da Figura 4.20 a Figura 4.23.

O comportamento relacionado a frequência de 4.4 Hz, Figura 4.23, apresenta um laço mais evidente decorrente da maior amplitude de resposta do sistema.

Note que no caso da diminuição da frequência de forçamento o laço vai se formando gradativamente e o salto ocorre na transição do comportamento não-linear (com presença do laço de histerese) para o comportamento linear. Já no caso com aumento da frequência, o salto ocorre na transição do comportamento linear para o não-linear e depois o laço vai sumindo gradativamente. Esses resultados são compatíveis com o que é verificado na literatura.

Depois de todos os ensaios realizados e resultado obtidos é possível afirmar que o aparato experimental está funcionando e gerando resultados condizentes.

5. CONCLUSÃO

Uma estrutura para ser utilizada em ensaios para caracterizar o comportamento mecânico de molas helicoidais de SMA foi projetada, fabricada e instrumentada. A estrutura está pronta e pode ser montada em dois aparatos experimentais, um para a realização de ensaios denominados quase-estáticos e outro para realização de ensaios dinâmicos. A análise quase-estática possibilita um estudo sobre a capacidade dissipativa de molas de SMA em regime pseudoelástico por meio da análise do laço de histerese. A partir da análise dinâmica, é possível avaliar o comportamento de um oscilador composto por uma mola de SMA, identificando a presença de saltos dinâmicos e a complexidade de resposta apresentada.

Na análise quase-estática foram realizados ensaios para obter a curva força-deslocamento por meio de um carregamento lento e contínuo aplicado à mola. A partir dos resultados observou-se a presença de um laço de histerese característico do comportamento pseudoelástico. Para estabilização do laço foi necessário impor diversos ciclos de carregamento à mola de SMA. Além disso, acredita-se que o fato de a temperatura da mola durante o ensaio estar próxima à A_f , fez com que o tempo de recuperação de sua forma, após terminado o carregamento, fosse muito longo.

Nos ensaios dinâmicos o oscilador foi excitado em uma faixa de frequência de forçamento compreendendo a ressonância, onde foi observada a ocorrência de saltos dinâmicos. Além disso, comportamentos diferentes foram verificados aumentando-se e diminuindo-se a frequência, com valores diferentes de amplitudes máximas e ocorrência dos saltos dinâmicos em frequências diferentes.

Com os dados obtidos durante os ensaios, percebe-se que o aparato experimental está gerando resultados condizentes com a literatura sobre o assunto. O aparato pode ser utilizado tanto para investigação do oscilador de SMA, que ainda deve ser melhor investigado, como para analisar um ADV de SMA. Desta forma, considera-se que o aparato desenvolvido consiste em uma boa contribuição para o Laboratório de Vibrações.

A seguir, as etapas propostas para continuidade deste trabalho são apresentadas.

5.1. TRABALHOS FUTUROS

Compreender o comportamento dinâmico das ligas com memória de forma é muito importante para a aplicação deste material em ADVs assim como em outras aplicações. Neste contexto, algumas propostas para dar prosseguimento ao trabalho são listadas a seguir:

- Realização dos testes quase-estáticos e dinâmicos acompanhados por uma câmera termográfica de forma a analisar como a temperatura da mola está variando durante os ensaios, e verificar se este fator está influenciando as transformações de fase do material e o comportamento do sistema.

- Realização de testes dinâmicos com diferentes amplitudes de forçamento. Os resultados apresentados neste trabalho são condizentes com a literatura, no entanto, diversos outros comportamentos relacionados com a ocorrência de saltos dinâmicos são observados em ensaios dinâmicos, como verificado a partir de análise numérica apresentada por Oliveira et al. (2014).

- Realização de testes quase-estáticos e dinâmicos com molas pseudoelásticas obtidas a partir de diferentes tratamentos térmicos de forma a avaliar como eles influenciam o laço de histerese e o comportamento dinâmico do oscilador.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguiar, R. A. A., 2011. Análise da Redução de Vibrações em Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas com Memória de Forma. Tese Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro.

C. F. Beards BSc, 1995. *Vibration Analysis with Application to Control Systems*. Great Britain, Headline PLC.

Da Silva, E.P., 2003. Aplicação de Ligas com Memória de Forma em Estruturas adaptativas. *Anais do DINCON 2003 Série Arquimedes*, [2 Congresso Temático de Aplicações de Dinâmica e Controle da Sociedade Brasileira de Matemática Aplicada e Computacional] pp.v. 2, 2358-2387.

Grassi, D.N.E, 2014. Comportamento Termomecânico de Minimolas Superelásticas. NiTi: Influeência de Tratamentos Térmicos. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Lagoudas, D., 2008. *Shape Memory Alloy*. Texas: Springer.

Machado, L. G. and Lagoudas, D.C., *Thermomechanical Constitutive Modeling of SMAs: Modeling and Engineering Applications of Shape Memory Alloys*. Springer, New York, 2008.

Meirovitch, L., 2001. *Fundamentals Of Vibrations*. USA: Mc Graw Hill.

Miyazaki, S., Fu, Y.Q., Wei, M.H., 2009. *Thin film shape memory alloys*. Cambridge University Press.

Nogueira J. B., 2009. Dinâmica Não-Linear e Caos em uma Treliza Pseudoelástica.

Oliveira, H. S., 2011. Projeto de Graduação, Análise Dinâmica de um *stockbridge* pseudoelástico.

Oliveira H. S., 2014. Análise de um Absorvedor Dinâmico Pseudoelástico. Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas.

Oiveira, H.S., de Paula, A. S., Savi, M. A., 2014. *Dynamical Jumps in a Shape Memory Alloy Oscillator, Shock and Vibration, Volume 2014, Article ID 656212*.

Otsuka, K. & Wayman, C.M., 1998. *Shape Memory Alloy*. Cambridge University Press.

Rao, S. (2008). *Vibrações Mecânicas*. São Paulo: Prentice Hall.

Rustighi, E., Brennan, M. J., Mace, B.R., 2005, “*Real-Time Control of a Shape Memory Alloy Adaptive Tuned Vibration Absorber*”, *Smart Materials and Structures*, v. 14, pp. 1184-1195.

Silva, C.A., 2000. *Vibration: Fundamentals and Practice*. Vancouver, Canada: CRC Press. Vancouver, Canada: CRC Press.

Tiseo, B., Concilio, A., Ameduri, S. & Gianvito, A., 2010. *A shape memory alloys based tunable dynamic vibration absorber for vibration tonal control*. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, pp.48,1,135-153.

Van Humbeeck, J., 2003. *Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory alloys*. *J Alloys Compd*, pp.355-58-64.

7. ANEXOS

- 7.1. Desenho técnico da haste sustentação
- 7.2. Desenho técnico da base inferior
- 7.3. Desenho técnico da placa de fixação superior
- 7.4. Desenho técnico da base superior
- 7.5. Desenho técnico da placa de fixação inferior
- 7.6. Desenho técnico da placa de fixação do laser
- 7.7. Desenho técnico do parafuso
- 7.8. Desenho técnico da massa 1/4
- 7.9. Desenho técnico da massa 2/4
- 7.10. Desenho técnico da massa 3/4
- 7.11. Desenho técnico da massa 4/4
- 7.12. Análise DSC feita no material utilizado na fabricação da mola antes do tratamento térmico
- 7.13. Análise DSC feita no material utilizado na fabricação da mola após o tratamento térmico