

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DA RIGIDEZ COMPLEXA DE UM SISTEMA VIBRATÓRIO
INCORPORANDO ATUADOR COM MEMÓRIA DE FORMA**

Samuell Aquino Holanda

Campina Grande

2013

Estudo da Rigidez Complexa de Um Sistema Vibratório
Incorporando Atuador com Memória de Forma

Por

Samuell Aquino Holanda

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
do Centro de Ciências e Tecnologia da
Universidade Federal de Campina Grande
em exigência à obtenção do título de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Antonio Almeida Silva, Dr. – UFCG/CCT/UAEM

Campina Grande

2013



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

H722e Holanda, Samuell Aquino.
Estudo da rigidez complexa de um sistema vibratório incorporando atuador com memória de forma / Samuell Aquino Holanda. - 2013.
105 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Almeida Silva.
Referências.

1. Rigidez Complexa. 2. Atuador com Memória de Forma. 3. Isolamento de Vibração. I. Silva, Antonio Almeida. II. Título.

CDU 620.1(043)

ESTUDO DA RIGIDEZ COMPLEXA DE UM SISTEMA VIBRATÓRIO
INCORPORANDO ATUADOR COM MEMÓRIA DE FORMA.

SAMUELL AQUINO HOLANDA

Dissertação Aprovada em 15/02/2013 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



Dr. Antonio Almeida Silva

Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Carlos José de Araújo

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Alberdan Santiago de Aquino

Examinador Externo - IFPB



Dr. Roberto Leal Pimentel

Examinador Externo - UFPB

DEDICATÓRIA

À Lucia Heleide e Jesualdo, Bruno, Luiz, Samara e Valdeci.

AGRADECIMENTOS

Todos aqueles que decidem realizar uma pesquisa, em qualquer nível, sabem que não a fazem sozinhos. Por mais solitário que o caminho possa parecer, só conseguimos chegar até o final graças aos estudos de outros pesquisadores, às conversas com os colegas de Universidade, à ajuda e o cuidado de cada pessoa com nosso trabalho e com nossas ideias. Ideias essas, que por vezes me peguei pensando onde terminavam as minhas e onde começavam as do colega.

Enfim... Gostaria de agradecer aos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica que fizeram com que me sentisse bem-vindo, lá em setembro de 2010, quando cheguei a Campina Grande com essa vontade inédita de cursar o mestrado. Ao Professor Yoge, pela primeira conversa que tivemos, ainda no processo de seleção. Ao Professor Carlos pelos puxões de orelha que me dava indiretamente e por ter me apresentado aos materiais avançados, um caso clássico de amor à primeira vista. Agradecimento especial ao meu orientador, Professor Antonio Almeida, que assinou a minha primeira solicitação de matrícula, quando ainda não era meu orientador e que hoje concluiu essa etapa junto comigo. Quero agradecer pela paciência, ensinamentos e horas gastas lendo meus textos e principalmente corrigindo. Se todo aluno pegasse um texto corrigido pelo senhor o trabalho de escrever seria muito mais fácil para todos.

Muito obrigado, Professor Alberdan! Pelos finais de semana trancados no laboratório tentando fazer com que essa pesquisa caminhasse e mais rápido. Além disso, muito do que foi escrito veio da sua Tese e foi uma honra estudar algo que você propôs nas suas considerações.

Aos alunos da Universidade que de alguma maneira eu cruzei o caminho e cheguei atrapalhando. Rodrigo, Diego, Vanderson, Iusley, Henrique, Estephannie, Ângelo, Daniela e George, muito obrigado por dedicarem um pouco do precioso tempo de vocês a conversas, orientações e ensaios que pareciam não ter fim.

Às funcionárias do Bloco BR. Lidiane, Jaqueline, Marli e Érika vocês fizeram a experiência de ficar subindo e descendo aquelas escadas um dos momentos mais divertidos desse mestrado. Obrigado pelas conversas, risos, lanches, laranjas e carinho.

Impossível esquecer os colegas de mestrado com os quais dividi as mais diversas sensações: medo, frustração, alegrias e vitórias. Allysson, Daniel, João Paulo, Veronica, Socorro, Rômulo foi bom passar por tudo isso tendo vocês ao meu lado seja na sala de aula, no laboratório, na cadeira do ônibus ou no shopping.

Minha família é algo tão superior, algo de extremo valor que corro o risco de pecar pelo excesso na busca de simplificar toda a minha gratidão. Mas vou correr esse risco. Família, obrigado por TUDO. Principalmente quando me apoiaram na decisão de largar o emprego pra fazer o mestrado, sem o suporte de vocês, meus pais, eu não estaria aqui hoje. Bruno e Samara vão desculpando a raiva que vocês me fizeram. Tia Valda, a senhora foi uma santa guerreira durante todo esse tempo dedicando sua vida para não nos deixar faltar o café de todas as manhãs e o conforto que só a ombro de um familiar pode trazer.

E os meus Amigos? Junto com o crescimento profissional, eu cresci como pessoa e pude me conhecer melhor com a ajuda de vocês. Nessa cidade conquistei a amizade de pessoas que hoje me são essenciais. Adi, Eline, George, Ítalo, Rafael, Robson, Tarsis, Valdeiza e Wanessa, com vocês vivi momentos inesquecíveis. Sorte minha que esses dois anos foram apenas o começo. Bibihoney, não esqueci você! Você merece umas linhas exclusivas, pois além da amizade você foi o suporte especializado para assuntos de qualidade de imagem. Você me é muito caro, Wiarley.

Luiz, esses dois anos de cursos coincidem com o tempo que a gente se conhece. Logo, não existe outra pessoa que tenha absorvido parte dessa experiência de maneira tão forte quanto você. Você sempre me incentivou, me ouviu, me ajudou e sempre me cobrou para que eu continuasse e amadurecesse em todos os sentidos. Essa vitória também é sua.

RESUMO

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloys - SMA*) são materiais capazes de retornarem a sua forma geométrica inicial após uma deformação seguida de aquecimento. Além disso, esses materiais apresentam variações com a temperatura em propriedades mecânicas importantes como rigidez e amortecimento. Neste contexto as Ligas com Memória de Forma (LMF) podem ser utilizadas no desenvolvimento de absorvedores de vibrações capazes de atuar nas estruturas em que estão instalados proporcionando a sintonização adequada entre a frequência de excitação e a frequência natural do sistema. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo analisar o comportamento dos parâmetros de rigidez e amortecimento numa mola helicoidal com memória de forma, acoplada a um sistema mecânico de um grau de liberdade sujeito a uma força desbalanceada de excitação e a um sistema de controle de temperatura. Analisando o efeito desses parâmetros na resposta estrutural, acoplado ao conceito de rigidez complexa, é possível prever o comportamento do sistema dentro de determinadas faixas aceitáveis de vibrações já na fase projeto. Os resultados teóricos e experimentais mostram a influência da temperatura e da frequência de excitação no comportamento do módulo elástico, da rigidez e do amortecimento dessas LMF, como também mostra que a aplicação de atuadores com memória de forma num sistema estrutural pode reduzir as amplitudes de vibração de forma bastante significativa.

Palavras-chave: Rigidez Complexa; Atuador com Memória de Forma; Isolamento de Vibração.

ABSTRACT

The shape memory alloys (Shape Memory Alloys - SMA) are materials able to return to their original geometric shape after deformation by heat. Beyond that these alloys exhibit significant variations in mechanical properties such as stiffness and damping. In this context, the shape memory alloys (SMA) can be used to develop vibration absorbers able to act on structures in which they are installed, providing proper tuning between the excitation frequency and the natural frequency of the system. This study aims to analyze the behavior of the stiffness and damping parameters of a helical spring with shape memory, attached to a mechanical system of one degree of freedom subjected to an unbalanced force by harmonic excitation and to a temperature control system. Analyzing the effect of these parameters on the structural response, bounded to the concept of complex stiffness, it is possible to predict the system's behavior within certain acceptable ranges of vibrations frequency already in the design phase. The theoretical and experimental results show the influence of the temperature and excitation frequency on the behavior of the elastic modulus, the stiffness and damping of these alloys, and also demonstrate that the application of shape memory actuators in a structural system can reduce the vibration amplitudes significantly.

Keywords: Complex Stiffness, SMA actuator, Vibration Isolation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Modelo físico de um sistema rotativo desbalanceado..... | 24 |
| Figura 2 - Resposta em frequência típica para um sistema sujeito a desbalanceamento rotativo..... | 26 |
| Figura 3 - Sistema mola-amortecedor viscoso..... | 28 |
| Figura 4 - Sistema mola-amortecedor histerético..... | 29 |
| Figura 5 - Módulo elástico (linha cheia) e fator de perda (linha pontilhada) em função da frequência para uma resina Thiokol RD em algumas temperaturas pré-definidas..... | 32 |
| Figura 6 - Absorvedor passivo sintonizado instalado em pontos específicos de uma ponte..... | 33 |
| Figura 7 - Modelo de um sistema de 1 GDL equipado com AMS..... | 34 |
| Figura 8 - Série de carregamentos em um amortecedor histerético..... | 35 |
| Figura 9 - Esquema de um sistema de controle ativo..... | 36 |
| Figura 10 - Controle de vibração passivo..... | 37 |
| Figura 11 - Controle ativo de vibração com atuados semiativo..... | 38 |
| Figura 12 - Alternância de fases das LMF..... | 40 |
| Figura 13 - Evolução da fração martensítica em função da temperatura..... | 41 |
| Figura 14 - Curva Tensão-Deformação ideal para uma LMF acima de A_f (superelasticidade)..... | 42 |
| Figura 15 - Comportamento Tensão-Deformação-Temperatura típico de uma LMF..... | 43 |
| Figura 16 - Comportamento do módulo de elasticidade em função da temperatura..... | 44 |
| Figura 17 - Comportamento do atrito interno e do amortecimento durante as transformações martensíticas..... | 45 |
| Figura 18 - Comportamento da capacidade de amortecimento com a variação da frequência de excitação..... | 46 |
| Figura 19 - Fator de amortecimento em função da temperatura para uma liga $Ni_{49,8}Ti_{50,2}$ | 46 |
| Figura 20 - Fator de amortecimento em função da temperatura para uma liga $Ni_{49}Ti_{51}$ | 47 |

| | |
|--|----|
| Figura 21 -Modelo teórico de uma viga compósita com LMF..... | 48 |
| Figura 22 -FRF para ADV adaptativo ótimo..... | 50 |
| Figura 23 -Modelo numérico de uma luva compósita com fitas SMA (a) totalmente e (b) parcialmente preenchida..... | 51 |
| Figura 24 -Respostas experimentais: Esquerda, sem amortecimento. Direita, com amortecimento..... | 52 |
| Figura 25 -Primeira frequência natural em função da temperatura para diferentes espessuras da placa..... | 52 |
| Figura 26 -Resposta no tempo das primeiras frequências naturais para diferentes matrizes de rigidez..... | 51 |
| Figura 27 -Esquema de um sistema de isolamento com LMF para prédios..... | 54 |
| Figura 28 -Esquema do corpo de prova com fios de LMF..... | 55 |
| Figura 29 -Fissura no corpo de prova durante o carregamento..... | 55 |
| Figura 30 -Corpo de prova após o descarregamento e aquecimento dos fios..... | 55 |
| Figura 31 -Dispositivo LMF de controle dos efeitos sísmicos..... | 56 |
| Figura 32 -Etapas metodológicas..... | 57 |
| Figura 33 -Mola de LMF NiTi..... | 59 |
| Figura 34 -Dispositivo para ciclagem térmica de molas de LMF..... | 60 |
| Figura 35 -Montagem da mola de LMF para ensaio..... | 62 |
| Figura 36 -Resposta ao impulso para um sistema de um GDL em vibração livre.... | 64 |
| Figura 37 -Esquema da bancada experimental..... | 65 |
| Figura 38 -Relação entre tensão e frequência de excitação do motor..... | 67 |
| Figura 39 -Temperaturas de transformação obtidas por DSC..... | 69 |
| Figura 40 -Módulo de elasticidade em função da frequência para 30°C, 50°C e 70°C..... | 70 |
| Figura 41 -Fator de Perda em função da frequência para 30°C, 50°C e 70°C..... | 71 |
| Figura 42 -Comportamento do módulo elástico com a modificação da frequência de excitação na amostra 2..... | 72 |
| Figura 43 -Comportamento do fator de perda com a modificação da frequência de excitação na amostra 2..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 44 -Rigidez teórica e Rigidez experimental..... | 75 |
| Figura 45 -Bancada experimental montada e martelo de impacto..... | 76 |
| Figura 46 -Resposta ao impulso a 25°C..... | 77 |
| Figura 47 -Resposta ao impulso a 70°C..... | 77 |
| Figura 48 -Atuação do sistema de controle de temperatura..... | 78 |
| Figura 49 -Variação do fator de amortecimento em função da temperatura..... | 80 |
| Figura 50 -Simulação computacional da Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema..... | 83 |
| Figura 51 -Curvas experimentais da resposta em frequência do sistema..... | 84 |
| Figura 52 -Resposta do sistema a uma excitação na ressonância com variação de temperatura e a mola inicialmente na fase martensítica..... | 85 |
| Figura 53 -Resposta do sistema a uma excitação na ressonância com variação de temperatura e a mola inicialmente na fase austenítica..... | 86 |
| Figura 54 -Resposta no tempo do sistema em ressonância em três temperaturas..... | 87 |
| Figura 55 -Relação entre o Fator de Amortecimento e o Fator de Perda..... | 89 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------|--|----|
| Tabela 1 - | Dimensões das amostras do fio selecionado..... | 58 |
| Tabela 2 - | Dados da mola de LMF confeccionada..... | 60 |
| Tabela 3 - | Componentes do dispositivo experimental..... | 66 |
| Tabela 4 - | Rigidez experimental da mola..... | 74 |
| Tabela 5 - | Amortecimento do sistema em função da temperatura..... | 79 |
| Tabela 6 - | Constante de amortecimento viscoso..... | 81 |
| Tabela 7 - | Dados utilizados na simulação..... | 82 |
| Tabela 8 - | Relação entre o Fator de Amortecimento e o Fator de Perda na ressonância..... | 88 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|---------------|--|
| ω | Frequência de excitação |
| ω_n | Frequência natural |
| m | Massa do sistema |
| \ddot{x} | Aceleração do sistema |
| \dot{x} | Velocidade do sistema |
| x | Deslocamento do sistema |
| c | Constante de amortecimento viscoso |
| k | Rigidez da mola |
| m_d | Massa desbalanceada |
| e | Excentricidade |
| t | Tempo |
| $x(t)$ | Resposta do sistema no tempo |
| $x_h(t)$ | Solução homogênea |
| $x_p(t)$ | Solução particular |
| X | Amplitude de vibração |
| ϕ | Ângulo de fase |
| F_0 | Força de excitação |
| F_0/k | Deflexão estática |
| h | Constante de amortecimento histerético |
| k^* | Rigidez Complexa |
| η | Fator de Perda |
| δ | Decremento Logarítmico |
| ζ | Fator de amortecimento viscoso |
| ζ_{eq} | Fator de amortecimento viscoso equivalente |
| c_{eq} | Constante de amortecimento viscoso equivalente |
| $\tan \delta$ | Tan delta |
| ξ | Fração volumétrica de martensita |
| A | Identificação da fase austenítica |

| | |
|-------------|---|
| A_S | Temperatura inicial da fase austenítica |
| A_F | Temperatura final da fase austenítica |
| M | Identificação da fase martensítica |
| M_S | Temperatura inicial da fase martensítica |
| M_f | Temperatura final da fase martensítica |
| k_{max} | Rigidez máxima da mola LMF |
| k_{min} | Rigidez mínima da mola LMF |
| k_{LMF-A} | Rigidez da mola durante a fase de aquecimento |
| k_{LMF-R} | Rigidez da mola durante a fase de resfriamento |
| i | Indicador de número complexo |
| n | Número de períodos |
| A_1 | Amplitude do primeiro pico |
| A_n | Amplitude do pico do período n |
| T | Temperatura da mola |
| r | Razão de frequências |
| N | Número de espiras |
| M_p | Temperatura do pico da transformação martensítica |
| A_p | Temperatura do pico da transformação austenítica |
| H | Histerese em temperatura |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 Contextualização do Trabalho..... | 16 |
| 1.2 Justificativa..... | 18 |
| 1.3 Objetivos | 20 |
| 1.4 Delimitação do Tema | 21 |
| 1.5 Organização da Dissertação | 21 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 23 |
| 2.1 Conceitos de Vibrações Mecânicas..... | 23 |
| 2.1.1 Modelo de Desbalanceamento Rotativo | 23 |
| 2.1.2 Conceitos de Amortecimento Histerético e Rigidez Complexa..... | 26 |
| 2.2 Controle de Vibração..... | 32 |
| 2.3 Ligas com Memória de Forma (LMF)..... | 38 |
| 2.4 Controle de Vibração Utilizando Ligas com Memória de Forma | 48 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 57 |
| 3.1 Seleção e Caracterização do Fio de LMF | 58 |
| 3.2 Fabricação e Caracterização da Mola de LMF..... | 59 |
| 3.3 Instrumentação e Montagem Experimental..... | 65 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 69 |
| 4.1 Caracterização Termomecânica do Fio de LMF | 69 |
| 4.2 Caracterização Termomecânica da Mola de LMF | 73 |
| 4.3 Respostas de Vibração Livre do Sistema com Mola de LMF | 76 |
| 4.4 Respostas do Sistema sob Excitação Harmônica | 81 |
| 4.5 Respostas do Sistema com Controle de Temperatura na Condição de Ressonância | 85 |
| 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 90 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 93 |
| APÊNDICE A – Dados do Ensaio de DMA (Fio de Liga NiTi) Módulo Elástico e Fator de Perda em Função da Frequência (T=30°C, 50°C e 70°C)..... | 98 |
| APÊNDICE B – Dados do Ensaio de DMA (Fio de Liga NiTi) Módulo Elástico e Fator de Perda em Função da Temperatura (1, 5, 10 e 12 Hz) | 99 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização do Trabalho

A contínua necessidade de redução de custos e o atual estágio do desenvolvimento científico e tecnológico tornam os projetos de estruturas cada vez mais completos e abrangentes visando atender as mais diversas exigências de desempenho. Dentre elas destaca-se a necessidade de estruturas cada vez mais leves e resistentes; comportamento dinâmico ótimo que assegure estabilidade e precisão; atenuação das vibrações que garantam a integridade estrutural e propiciem melhores condições de conforto (WANG *et al.*, 1999; YAN; YAM, 2002; GIURGIUTIU, 2000).

Sistemas estruturais estão constantemente susceptíveis a excitações externas e internas que resultam em vibrações mecânicas. Essas vibrações são, na maioria das vezes, indesejadas, pois colocam em risco a própria integridade estrutural do sistema e, em alguns casos, a segurança dos usuários.

A transmissão de vibração acontece devido a tensões e/ou choques nos componentes de máquinas, equipamentos e estruturas durante sua operação. Esta vibração acontece em maior ou menor grau, dependendo do tipo de estrutura.

Em estruturas aeroespaciais algumas vibrações têm origem nas fontes acústicas e podem provocar rompimentos na fuselagem e ruído. Nos meios de transportes mais convencionais a resposta às excitações também causam danos estruturais e precisam ser atenuadas. Nos automóveis, a suspensão tem como objetivo isolar respostas às irregularidades da pista, além de melhorar a estabilidade e o controle do veículo. Em helicópteros, a redução nos níveis de vibração prolonga a vida útil do rotor e reduz a fadiga na fuselagem (YAGIZ; SAKMAN, 2006).

A construção civil também encontra no controle de vibrações uma variável desafiadora. Com a tendência de prédios cada vez mais altos e flexíveis, o efeito dos ventos fortes e tremores de terra precisam ser considerados. Outras estruturas como pontes e viadutos também são passíveis de instabilidade, por isso já são alvos de estudos que envolvem o uso de ligas com memória de forma (LMF) como dissipadores passivos de energia aproveitando o ciclo histerético característico dessas ligas, ao

contrário das ligas comuns que são projetadas para operar em regime elástico. Ainda na área de construção de novas edificações, as LMF são utilizadas para fabricação de atuadores utilizados em sistema ativos de controle de vibrações instalados principalmente em grandes prédios, como Amortecedores de Massa Ativos (Active Mass Damper - AMD), e na construção de pontes, como os Sistemas de Cabos Ativos (Active Tendons System - ATS) (HASHIM *et al.*, 2011; DOLCE; CARDONE; MARNETTO, 2000).

As vibrações também podem comprometer a saúde humana. Quando o corpo é exposto por muito tempo a níveis consideráveis de vibração, além de desconforto, podem aparecer dores nas costas, lesões degenerativas na espinha lombar, lesão visual, dentre outros males. Vale salientar, que esses são os sintomas possíveis e levam em consideração o período de exposição e a intensidade da força. Esses efeitos já são contemplados pela ergonomia.

Por tudo o que já foi exposto faz-se necessário controlar os níveis de vibração estrutural no intuito de reduzir os danos provenientes de oscilações elevadas. Atualmente, existem várias estratégias para atenuar vibrações em sistemas mecânicos, desde a utilização de técnicas simples baseadas na introdução de materiais amortecedores, como também a modificação e melhorias do projeto estrutural, até o uso de avançados sistemas de controle. Basicamente os sistemas de controle de vibração podem ser divididos em controle ativo e controle passivo.

O controle passivo de vibração depende diretamente das propriedades físicas da máquina, como rigidez, massa e amortecimento. Ele depende de uma alteração estrutural básica, relacionada à natureza do material utilizado, ou a associação de um elemento passivo, que não possua qualquer dependência externa para funcionamento. Entretanto, o método passivo de controle tem parâmetros de projeto fixos, o que acaba restringindo sua aplicação a uma condição de operação específica (OGATA, 2011).

O controle ativo é caracterizado pelo controle do movimento da estrutura por meio da ação de um sistema composto por um conjunto de controladores, sensores e atuadores. Eles operam simultaneamente com a excitação alterando o comportamento do movimento para níveis aceitáveis de operação (YUVARAJA; KUMAR, 2012).

Atualmente, o desenvolvimento científico na área de controle de vibrações exige a aplicação de atuadores e sensores tecnologicamente superiores aos convencionais. Esses atuadores e sensores avançados estão relacionados ao uso de materiais ditos “inteligentes” que sofrem alterações nas suas propriedades quando submetidos a certos estímulos externos. Como exemplo de materiais inteligentes têm-se as ligas com memória de forma que alteram suas propriedades mecânicas com a temperatura.

Nesse contexto, as ligas com memória de forma se destacam como materiais potencialmente viáveis para o controle de vibrações. O efeito memória de forma, a pseudoelasticidade e a variação de propriedades mecânicas com a temperatura são particularidades desafiadoras que permitem a aplicação desses materiais nas mais diversas áreas do conhecimento. Porém, o comportamento dessas ligas não é linear, o que torna a sua modelagem mais complexa, visto que as mudanças de parâmetros como a temperatura e frequência de excitação devem ser consideradas, o que exige um estudo mais aprofundado para a determinação de características intrínsecas como a rigidez complexa, que leva em conta a dissipação de energia por ciclo e a dependência da frequência que resulta em variações do amortecimento estrutural (INMAN, 2000).

1.2 Justificativa

As estruturas dinâmicas expostas a excitações externas apresentam níveis de vibrações que precisam ser conhecidos e controlados para manter o bom funcionamento e favorecer a vida útil das mesmas. Porém, dependendo da natureza da excitação e das componentes de frequência, as amplitudes de vibrações podem alcançar patamares elevados que prejudicam a integridade física do sistema. Esse fenômeno é conhecido como ressonância, quando a frequência de operação (ω) se iguala a frequência natural do sistema (ω_n).

Uma nova classe de materiais funcionais vem se destacando no desenvolvimento de novas estratégias de atenuação de vibração, principalmente na região de ressonância. Dentre os novos materiais funcionais, as ligas com memória de forma possuem a capacidade de reagir a estímulos externos como tensão e temperatura e podem ser integrados satisfatoriamente a elementos estruturais com a função de

melhorar ou controlar parâmetros, como o módulo de elasticidade e a frequência natural.

Como a frequência natural depende da massa e da rigidez do sistema e uma vez que as LMF possuem a capacidade de alterar o módulo de elasticidade a partir de determinados estímulos, é possível alterar os padrões de rigidez do sistema e consecutivamente alterar a sua região de ressonância. Estudos nesse sentido indicam que é possível atenuar as amplitudes de vibrações numa faixa de frequências críticas tornando a passagem pela ressonância menos danosa, como também permite alterar os modos de vibrar da estrutura (YUVARAJA; KUMAR, 2012; AQUINO, 2011; BARZEGARI *et al.*, 2012).

O controle de força de atuadores de LMF pode ser obtido através da recuperação de forma e o controle vibracional pode ser melhorado em decorrência da variação da rigidez em função da temperatura, ou então, apresentar uma grande diminuição da vibração em função da alta capacidade dessas ligas em absorver energia no regime pseudoelástico. Além disso, as propriedades das LMF podem ser exploradas no controle ativo ou na manipulação de parâmetros estáticos e dinâmicos de elementos estruturais, tais como, frequências naturais, modos de vibrar e amplitudes de vibração (ZAK *et al.*, 2003).

Dessa forma, faz-se necessário explorar as potencialidades das LMF no desenvolvimento de sistemas de controle de vibração mais eficientes do que as soluções convencionais, por meio de alterações na frequência natural da estrutura e consequente redução nas amplitudes de vibração.

Paralelo à variação da rigidez, o amortecimento do sistema também é passível de sofrer alterações com a variação de tensões ou de temperaturas. Certas composições de LMF são classificadas como materiais metálicos com alta capacidade de amortecimento, consequência de seu comportamento histerético relacionado com as transformações de fase sofridas pelo material. A influência do amortecimento nos níveis de vibração e a resposta do sistema a sua variação precisa ser investigada e compreendida mais profundamente (ZUO *et al.*, 2006).

Nesse sentido, além da análise do comportamento da rigidez e do amortecimento e da sua influência na resposta estrutural, torna-se relevante estudar a abrangência do conceito de rigidez complexa para as LMF. A rigidez complexa se apresenta como o

efeito combinado de rigidez e amortecimento estrutural ou histerético e pode ter sua equivalência nos parâmetros de rigidez e fator de perda material.

A escassez de estudos na literatura científica que tratam sobre a rigidez complexa em LMF pode ser explicado por esse conceito ser próprio de materiais viscoelásticos. Entretanto, um dos objetivos desta pesquisa será viabilizar um estudo da rigidez complexa em LMF, já que essas ligas são metais que, por vezes, se comportam como um material viscoelástico.

1.3 Objetivos

Este estudo tem como objetivo geral analisar o comportamento dos parâmetros de rigidez e amortecimento em uma mola helicoidal com memória de forma, acoplada a um sistema mecânico de um grau de liberdade sujeito a uma força desbalanceada de excitação e a um sistema de controle de temperatura. Para isso, serão considerados os conceitos de rigidez complexa e de amortecimento estrutural.

Para atingir o objetivo geral será necessário cumprir metas particulares, desenvolvendo os seguintes objetivos específicos:

- Projetar e fabricar molas helicoidais com memória de forma, tendo como matéria-prima fios de Níquel-Titânio (NiTi);
- Caracterizar termomecanicamente a mola, determinando as temperaturas de transformação de fase e a variação de rigidez e amortecimento em função da temperatura;
- Montar um sistema mecânico de um grau de liberdade acoplado com uma mola LMF auto-excitado por uma força desbalanceada e simular sua resposta estrutural;
- Aplicar um sistema de controle de temperatura que permita alterar a rigidez e amortecimento da mola mediante a variação de temperatura, permitindo o controle dos níveis de vibração;
- Descrever o comportamento do amortecimento estrutural e da rigidez da mola em função da variação da temperatura e da frequência de excitação.

- Estudar os parâmetros da rigidez complexa (rigidez e fator de perda) da mola com memória de forma a partir das respostas obtidas experimentalmente;

1.4 Delimitação do Tema

Neste trabalho busca-se investigar o comportamento da Rigidez Complexa em ligas com memória de forma, a partir de um dispositivo mecânico de um grau de liberdade, composto por um sistema massa-mola excitado por uma força desbalanceada, cujo elemento de controle é constituído por uma mola helicoidal feita com um fio de liga com memória de forma.

Dessa forma, os parâmetros de rigidez e de amortecimento estrutural do elemento de mola com LMF serão investigados visando uma análise do seu comportamento a partir da variação de temperatura e da frequência de excitação.

O sistema de controle de temperatura desenvolvido para esse estudo tem a finalidade de proporcionar um melhor domínio sobre a temperatura do atuador durante os testes de caracterização da rigidez e amortecimento. Esse estudo não contempla a elaboração de uma estratégia de controle de vibração para o sistema mecânico em análise. Em contrapartida, as respostas no tempo e em frequência da estrutura em função da variação dos parâmetros de rigidez e amortecimento serão investigadas, para melhor explicar o comportamento do atuador de LMF e servir de subsídio em aplicações que contemplam atenuação de vibrações.

1.5 Organização da Dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos, assim distribuídos:

Neste Capítulo 1 é feita a introdução ao trabalho, procurando dar uma visão geral do estudo: apresentando e justificando o tema da dissertação, bem como as hipóteses, delimitações e os objetivos desta investigação.

O Capítulo 2 pretende enquadrar o tema de forma mais aprofundada abordando alguns conceitos de vibrações mecânicas e as principais equações que descrevem o problema, além de discutir as técnicas existentes de atenuação de vibração; a teoria

por trás do comportamento das ligas com memória de forma e suas potencialidades em aplicações de controle de vibrações.

O Capítulo 3 descreve a metodologia seguida na pesquisa, e apresenta os materiais, técnicas e procedimentos de caracterização, equipamentos e programas computacionais utilizados no desenvolvimento do estudo.

O Capítulo 4 apresenta os resultados da pesquisa tais como: caracterizações termomecânicas realizadas no fio e na mola e as análises dos ensaios experimentais considerando o sistema mecânico em vibração livre e excitado harmonicamente. É também, onde se discute o comportamento da rigidez e amortecimento e como a variação desses parâmetros afeta a resposta dinâmica do sistema.

Por fim, no Capítulo 5 apresentam-se as conclusões e sugestões para futuros trabalhos julgadas como importantes, baseando-se nos resultados obtidos a partir dos testes experimentais realizados ao longo deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Conceitos de Vibrações Mecânicas

Desde os primeiros estudos baseados nas artes e sons musicais, as vibrações mecânicas são alvos de investigações nos mais diversos campos de atuação: análise vibro-acústica, análise modal experimental e estrutural, manutenção preditiva, integridade estrutural, dentre outras. Sempre no intuito de resolver problemas envolvendo vibração, seja para atenuá-la ou aproveitá-la (RAO, 2008).

A vibração pode ser definida como o movimento periódico, ou seja, uma oscilação, de um sistema de partículas ou de um corpo rígido em torno da posição de equilíbrio. Os sistemas mecânicos sempre estão sujeitos a vibrações que, dependendo de vários parâmetros, podem ser prejudiciais ou não.

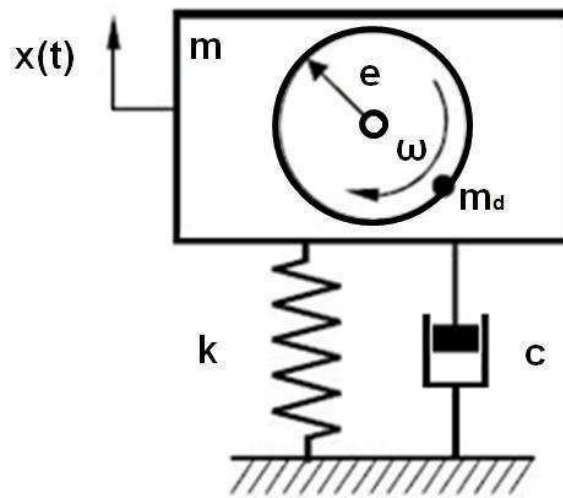
Observam-se duas classes de vibrações, que são denominadas de vibrações livres e vibrações forçadas. A primeira ocorre quando o sistema oscila em função das condições iniciais impostas ao mesmo, sem a ação contínua de forças externas. Neste caso, a frequência natural é função apenas da massa e da rigidez do sistema. Na vibração forçada, têm-se uma imposição de forças externas sobre o sistema que pode provocar uma excitação com frequência próxima ou igual à frequência natural, ocasionando um estado de ressonância.

Um sistema mecânico contém componentes de inércia, de rigidez e de amortecimento. Os componentes de inércia têm energia cinética quando o corpo está em movimento; os componentes de rigidez possuem uma relação entre força e deslocamento característica e os componentes de amortecimento são responsáveis pela dissipação de energia do sistema.

2.1.1 Modelo de Desbalanceamento Rotativo

O sistema mecânico em estudo será excitado harmonicamente através de um motor com desbalanceamento rotativo. Esta condição pode ser simplificada e melhor compreendida a partir do modelo de desbalanceamento de máquinas rotativas, ilustrado na Fig. 1.

Figura 1 – Modelo físico de um sistema rotativo desbalanceado.



Fonte: (AQUINO, 2011, adaptado).

A equação que governa o sistema acima é dada por:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_d e \omega^2 \sin \omega t \quad (1)$$

O sistema, com massa total m , é excitado por uma força harmônica gerada pelo desbalanceamento de uma massa (m_d) que possui velocidade angular (ω) e uma excentricidade (e).

A solução da Eq. (1) é dada pela soma da solução homogênea $x_h(t)$ e da solução particular $x_p(t)$ do sistema, conforme definido na Eq. (2).

$$x(t) = x_h(t) + x_p(t) \quad (2)$$

A solução homogênea $x_h(t)$ representa uma parcela transitória provocada pela resposta livre. Enquanto que a solução particular $x_p(t)$ corresponde à resposta em regime permanente. A solução $x_p(t)$ depende da frequência de excitação ω e acompanha a força $f(t)$ com uma amplitude X e fase ϕ , dessa forma a solução do termo permanente pode ser escrita da seguinte maneira:

$$x_p(t) = X \sin(\omega t - \phi) \quad (3)$$

Pode-se encontrar a amplitude de resposta do sistema derivando a Eq. (3) e substituindo na Eq. (1):

$$X = \frac{F_0}{\sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2}} \quad (4)$$

Ou ainda:

$$X = \frac{F_0/k}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (5)$$

Onde r é a razão entre a frequência de excitação ω e a frequência natural ω_n do sistema. O fator de amortecimento ζ é a razão entre a constante de amortecimento viscoso c e o amortecimento crítico do sistema c_c e F_0/k é a deflexão estática.

Neste caso, a amplitude de vibrações em regime permanente de um sistema sobre desbalanceamento rotativo pode ser obtido a partir da Eq. (5). Considerando que a amplitude da força de desbalanceamento é $F_0 = m_d e \omega^2$, é possível reescrevê-la da seguinte maneira:

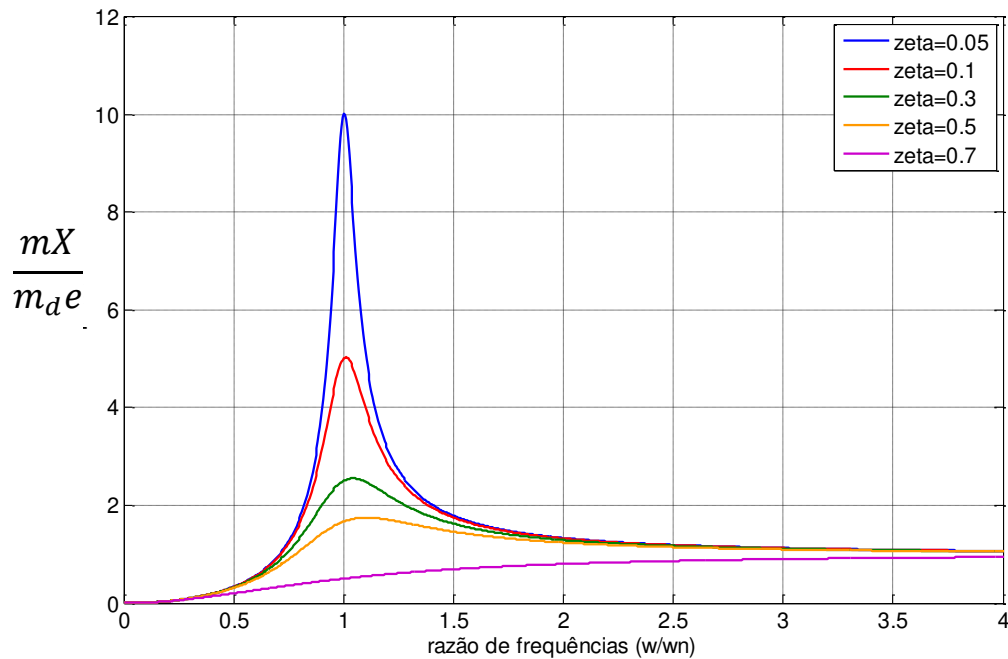
$$\frac{X}{k} = \frac{m_d e \omega^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (6)$$

Dividindo a Eq. (6) por $m_d e$ e reorganizando alguns termos tem-se a expressão final:

$$\frac{mX}{m_d e} = \frac{r^2}{\sqrt{(1 - r^2)^2 + (2\zeta r)^2}} \quad (7)$$

A Fig. 2 ilustra a função $mX/m_d e$ para vários valores de r e ζ :

Figura 2 – Resposta em frequência típica para um sistema sujeito a desbalanceamento rotativo.



Fonte: Autoria própria.

Em $r = 1$, quando a frequência de excitação ω é igual à frequência natural ω_n o sistema encontra-se na região de ressonância e apresenta os maiores valores de amplitude. Ocasionalmente, o fenômeno de ressonância pode ser danoso. Dependendo do valor do fator de amortecimento do sistema e das estratégias de controle de vibração adotadas a passagem por essa faixa de frequência pode ser amenizada. O fenômeno de ressonância normalmente deve ser evitado no projeto de estruturas e máquinas, uma vez que grandes amplitudes de vibração podem acelerar o processo de falha por fadiga, causar desconforto, gerar ruído excessivo, dentre outros problemas.

2.1.2 Conceitos de Amortecimento Histerético e Rigidez Complexa

O atrito interno entre os planos que escorregam ou deslizam à medida que o material se deforma, o que acontece quando há vibração, é responsável por parte da dissipação da energia vibratória e, conseqüentemente, diminuição da amplitude da

vibração livre. Esse tipo de amortecimento é conhecido como amortecimento por histerese, ou amortecimento estrutural (RAO, 2008).

O amortecimento histerético presente em sistemas com vibração livre é resultante do atrito no arranjo molecular de um corpo. Considerando um sistema de um grau de liberdade (Fig. 3a), a força $F(t)$ necessária para causar um deslocamento $x(t)$ é dada por:

$$F(t) = kx + c\dot{x} \quad (8)$$

Em um movimento harmônico de frequência ω e amplitude X , é possível escrever os deslocamentos como uma função do tipo:

$$x(t) = X \sin \omega t \quad (9)$$

Substituindo a Eq. (9) e sua respectiva derivada em relação ao tempo na Eq. (8), tem-se:

$$F(t) = kX \sin \omega t + cX\omega \cos \omega t \quad (10)$$

Da trigonometria utiliza-se o seguinte artifício:

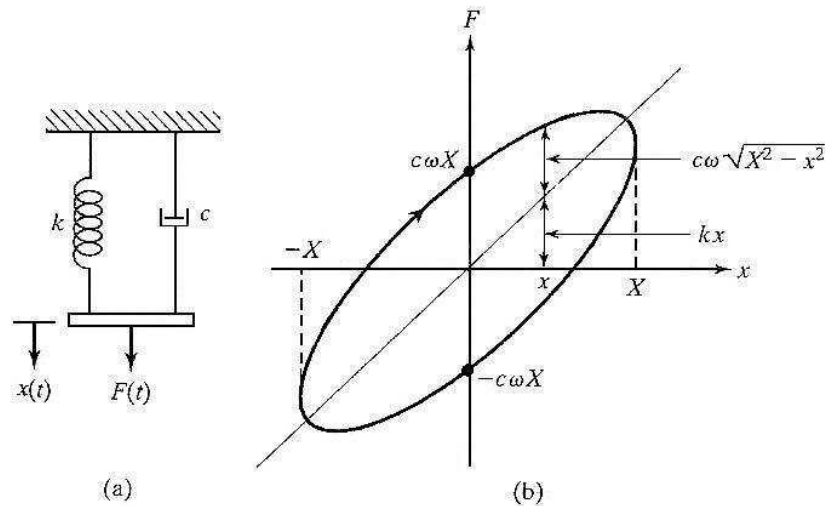
$$\begin{aligned} X^2 &= (X \sin \omega t)^2 + (X \cos \omega t)^2 \\ X \cos \omega t &= \pm \sqrt{X^2 - (X \sin \omega t)^2} \\ X \cos \omega t &= \pm \sqrt{X^2 - x^2} \end{aligned} \quad (11)$$

Considerando as Eqs. (9) e (11), na resposta da Eq. (10), tem-se:

$$F(t) = kx + c\omega \sqrt{X^2 - x^2} \quad (12)$$

A Fig. 3 mostra a energia dissipada pelo amortecimento em um ciclo de movimento. A quantidade desta energia dissipada corresponde à área da elipse representada pela Eq. (12).

Figura 3 – Sistema mola-amortecedor viscoso.



Fonte: (RAO, 2008).

A área do laço representa a energia dissipada pelo amortecedor em um ciclo de movimento e é dada por:

$$\Delta W = \oint F dx$$

$$\Delta W = \int_0^{2\pi/\omega} (kX \sin(\omega t) + cX\omega \cos(\omega t)) (X\omega \cos(\omega t)) dt \quad (13)$$

Após algumas deduções matemáticas, a Eq. (13) pode ser simplificada e assumir a seguinte forma:

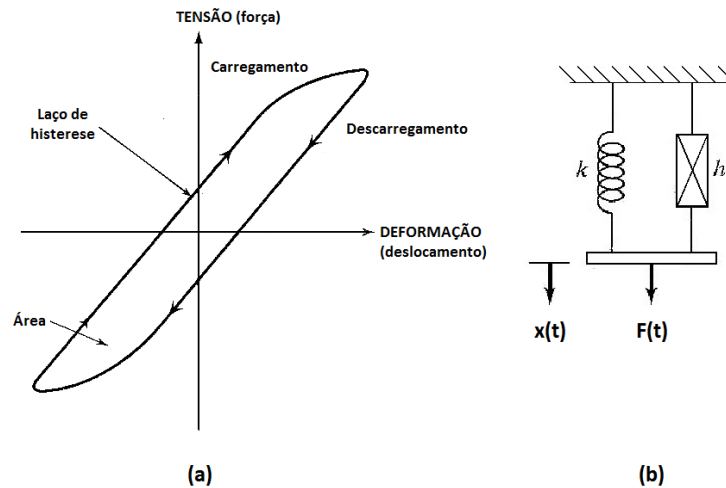
$$\Delta W = \pi\omega cX^2 \quad (14)$$

O amortecimento estrutural gera um laço de histerese que aparece na curva tensão-deformação, como pode ser visualizado na Fig. 4. A energia dissipada entre um carregamento e descarregamento pode ser aproximada pela área envolvida pelo laço

de histerese. A partir daí, pode-se definir uma constante de amortecimento por histerese, que corresponde à constante de amortecimento viscoso multiplicado pela frequência.

$$h = c\omega \quad (15)$$

Figura 4 – Sistema mola-amortecedor histerético.



Fonte: (RAO, 2008)

Considerando um movimento harmônico do tipo $x = Xe^{i\omega t}$ para a Eq. (8), tem-se que a força será dada por:

$$\begin{aligned} F &= kXe^{i\omega t} + ic\omega Xe^{i\omega t} \\ F &= (k + i\omega c)x \end{aligned} \quad (16)$$

Considerando que o amortecimento em questão é do tipo por histerese, como mostrado na Fig. 4, a relação força-deslocamento pode ser expressa como:

$$F = (k + ih)x \quad (17)$$

De onde se chega ao conceito de rigidez complexa:

$$k(1 + i \frac{c\omega}{k})$$

$$k^* = k(1 + i\eta) \quad (18)$$

Aqui η é chamado de fator de perda e k^* é definido como a rigidez complexa. Essa formulação considera o amortecimento do sistema a partir de uma componente de rigidez complexa que acopla o termo de amortecimento.

A parte imaginária da rigidez complexa, $i\eta$, corresponde à energia dissipada no sistema, uma vez que o fator de perda pode ser escrito da seguinte forma:

$$\eta = \frac{c\omega}{k} \quad (19)$$

Uma forma de determinar o fator de perda material é adotar o fator de amortecimento viscoso equivalente ζ_{eq} , que pode ser obtido igualando-o à relação para o decremento logarítmico:

$$\delta \cong 2\pi\zeta_{eq} \cong \pi\eta = \frac{\pi h}{k} \quad (20)$$

$$\zeta_{eq} \cong \frac{\eta}{2} = \frac{h}{2k} \quad (21)$$

Da Eq. (21) é possível retirar a relação entre o fator de amortecimento equivalente ζ_{eq} e o fator de perda η :

$$\eta \cong 2\zeta_{eq} \quad (22)$$

Assim, por exemplo, para um sistema vibratório subamortecido sujeito a um impacto ou deslocamento inicial e em vibração livre, é possível adotar uma equação de resposta na forma:

$$x(t) = e^{-\zeta_{eq}\omega_n t} \left\{ x_0 \cos \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \omega_n t + \frac{\dot{x}_0 + \zeta_{eq} \omega_n x_0}{\sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \omega_n} \sin \sqrt{1 - \zeta_{eq}^2} \omega_n t \right\} \quad (23)$$

Por outro lado, se considerarmos um sistema excitado harmonicamente com amortecimento histerético, esse pode ser escrito da seguinte forma:

$$m\ddot{x} + k(1 + i\eta)x = F_0 e^{i\omega t} \quad (24)$$

A solução em regime permanente da Eq. (24) para uma excitação harmônica será do tipo (RAO, 2008):

$$x(t) = \frac{F_0 e^{i\omega t}}{k \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^2 + i\eta \right]} \quad (25)$$

Partindo da Eq. (18) e de forma análoga a dedução da rigidez complexa, pode-se obter o conceito do módulo complexo, dado por:

$$E^* = E(1 + i\eta) \quad (26)$$

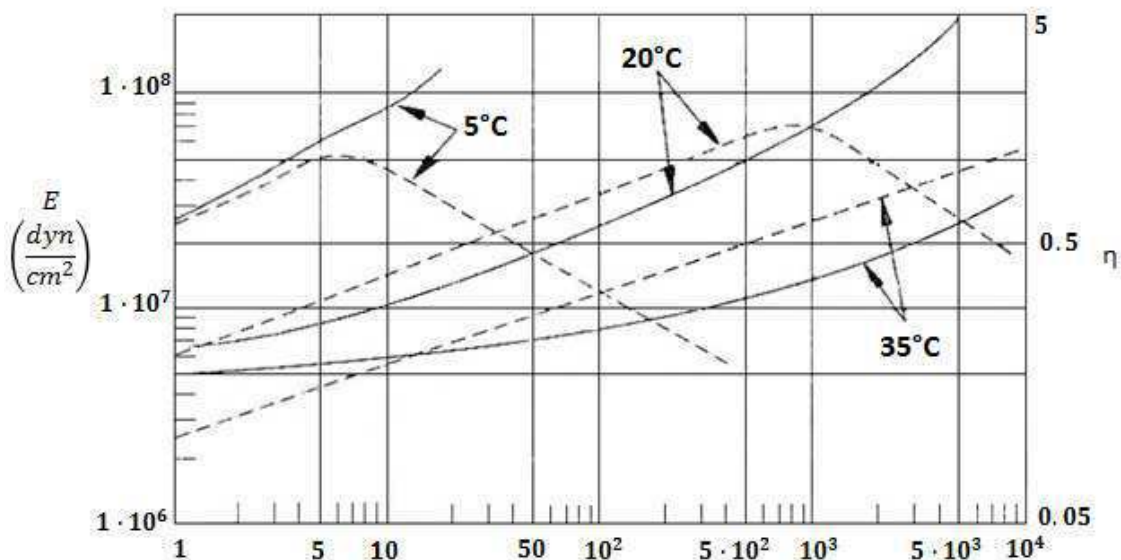
Do ponto de vista prático, o módulo complexo também pode ser relacionado com o módulo de armazenamento e com o módulo de perda. O módulo de armazenamento é a componente elástica e está relacionado à rigidez do material. Já o módulo de perda é a componente viscosa, responsável pela dissipação de energia mecânica através do movimento molecular.

Por sua vez, a relação entre os módulos de perda e de armazenamento, dado pela tangente do ângulo de fase δ , também é conhecida como o fator de perda η .

A Fig. 5 mostra o comportamento típico do módulo de elasticidade e do fator de perda em função da frequência em temperaturas fixas para um tipo de resina viscoelástica (INMAN, 2000). Neste caso, nota-se um aumento sempre crescente dos respectivos módulos com a frequência, enquanto que ocorrem variações crescentes e

decrecentes dos fatores de perda material, atingindo regiões de picos em frequências específicas.

Figura 5 – Módulo elástico (linha cheia) e fator de perda (linha pontilhada) em função da frequência para uma resina Thiokol RD em algumas temperaturas pré-definidas.



Fonte: (INMAN, 2000).

2.2 Controle de Vibração

Máquinas e equipamentos quando estão em operação ficam sujeitos a vibrações mecânicas resultantes dos esforços de seus componentes internos; de choques próprios do seu funcionamento; de processos desbalanceados. Dependendo do tipo de estrutura esta vibração acontece com maior ou menor intensidade.

O isolamento de vibração é um processo pelo qual os efeitos da vibração são minimizados ao se inserir um dispositivo isolador entre a fonte e a estrutura, de modo a evitar ou reduzir a transmissibilidade dos deslocamentos, ou seja, reduzir a relação que existe entre a magnitude do deslocamento da estrutura e a magnitude da fonte de vibração (LAGOUDAS; MAYES; KHAN, 2001).

Os sistemas de controle de vibração são sistemas que estão programados (controle ativo) ou sintonizados (controle passivo) para atenuar as vibrações em estruturas sujeitas a ações dinâmicas. O controle da resposta estrutural de uma estrutura pode ser feito, alterando as suas características dinâmicas (rigidez,

amortecimento, massa), às quais corresponde geralmente ao afastamento da sua frequência natural da frequência da excitação, ou o aumento do amortecimento.

O controle passivo consiste em um ou mais dispositivos que ligados à estrutura absorvem ou dissipam uma parte da energia transmitida pelo carregamento dinâmico, convertendo-a em energia térmica e reduzindo a absorção da energia vibratória pelos elementos da estrutura (SOONG; SPENCER, 2002). A Fig. 6 ilustra um exemplo de um absorvedor passivo utilizando para atenuação de vibrações em pontes.

Figura 6 – Absorvedor passivo sintonizado instalado em pontos específicos de uma ponte.



Fonte: (WEBER; FELTRIN; HUTH, 2006).

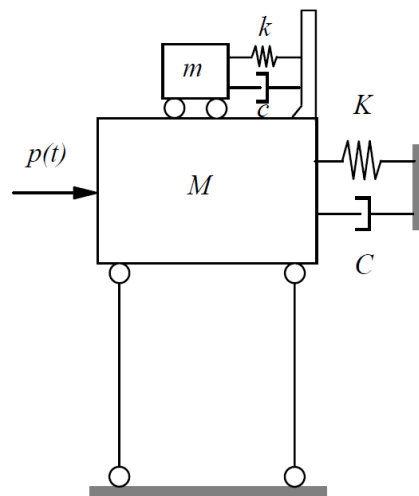
Segundo Moutinho (2007) os sistemas de controle passivo diferem entre si quanto à característica dinâmica que é controlada (massa, amortecimento ou rigidez):

- Absorvedores: São os sistemas que de algum modo adicionam uma massa a estrutura que servirá de “contrapeso”. Com isso acabam adicionando um novo grau de liberdade e um novo modo de vibrar. Esse novo modo de vibração introduzido absorve as vibrações causadas pela excitação que se pretende controlar;
- Dissipadores: São todos os sistemas que se baseiam em algum mecanismo que permite a dissipação de energia;
- Isoladores: Englobam os sistemas que utilizam dispositivos que fazem o controle alterando a rigidez.

Um tipo comum de sistema de controle passivo é o amortecedor de massa sintonizado (AMS), composto por um sistema massa-mola-amortecedor colocado na estrutura (Fig. 7) com o objetivo de reduzir a demanda de dissipação energia nos membros estruturais primários sob a ação de cargas dinâmicas. Essa redução é possível graças à transferência de parte da energia de vibração para o amortecedor de massa sintonizado.

Alguns autores, a exemplo de Lima (2007) e Gómez (2006), estudaram as aplicações de AMS em sistemas passivos de isolamento, investigando suas limitações e vantagens. As razões de massa e de frequência foram apontadas como parâmetros importantes para uma melhor atenuação. Os resultados indicaram que quanto maior for o deslocamento dinâmico, maior será a eficiência dos absorvedores e recomenda a instalação dos sistemas de absorção o mais próximo possível dos pontos de maior deslocamento.

Figura 7 – Modelo de um sistema de 1 GDL equipado com AMS.



Fonte: (CARNEIRO, 2009).

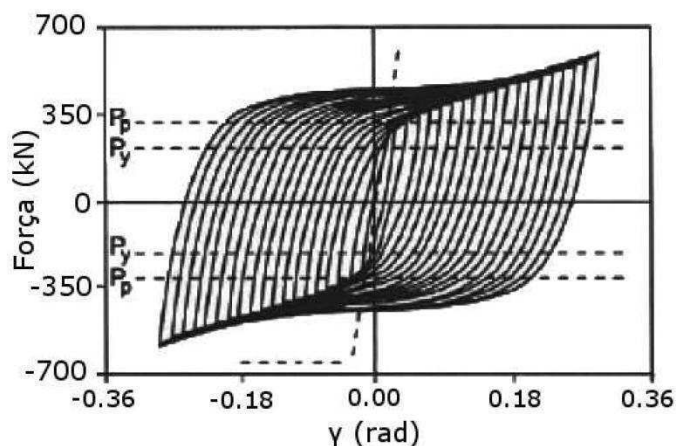
O projeto de isoladores passivos estabelece parâmetros constantes de rigidez e amortecimentos próprios de cada projeto, como isoladores viscosos, viscoelásticos, baseados em atrito, em histerese, isoladores de LMF, entre outros.

Os Amortecedores Histeréticos (Hysteretic Damper – HD) se aproveitam do comportamento não linear de alguns materiais para adicionar amortecimento a uma estrutura. Estes dispositivos utilizam o regime plástico dos materiais de modo a

dissipar energia em cada ciclo de carga e descarga (SERAFIM, 2011). Estes dispositivos são tão mais eficientes quanto maiores forem as deformações impostas ao material (dentro dos limites de ductilidade). O material que constitui o amortecedor deve ser um material com boas características de ductilidade, deve demonstrar capacidade para desenvolver elevadas deformações plásticas sem romper (KIM *et al.*, 2012).

A Fig. 8 mostra graficamente o comportamento de um amortecedor histerético em uma série de carregamentos.

Figura 8 – Série de carregamentos em um amortecedor histerético.



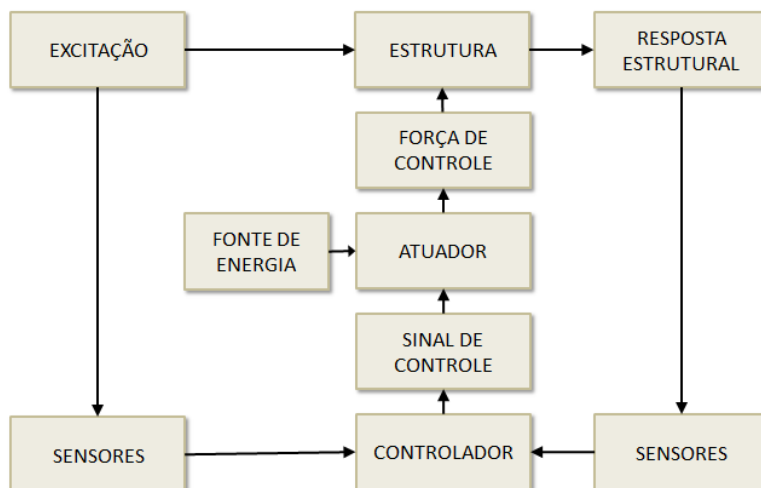
Fonte: (SERAFIM, 2011).

Vários métodos têm sido utilizados nas estratégias para controle de vibrações. Os isoladores passivos e amortecedores são os dispositivos mais utilizados quando se pretende atenuar níveis de vibração. Contudo, devido a algumas limitações os isoladores passivos apresentam e ao desenvolvimento acelerado da tecnologia de atuadores e sensores, as técnicas de controle ativo e adaptativo têm se apresentado como alternativas cada vez mais viáveis.

Paralelamente, os avanços nos estudos de controle estrutural embasam estratégias de controle que são mais eficientes do que os isoladores passivos, especialmente na proteção de estruturas contra carregamentos dinâmicos com a resposta em frequência variável no tempo. Nestas condições, o controle passivo pode não atender perfeitamente as necessidades de projeto. É nesse sentido que novas técnicas surgem como alternativa no controle estrutural, o que é caso do controle ativo e combinações de controle passivo e ativo (CHEN; LEVY, 1999).

No controle ativo o movimento é controlado ou modificado por dispositivos atuadores que estão integrados a controladores e sensores instalados na estrutura que atuam simultaneamente com a excitação para melhorar o comportamento estrutural e melhorar a disponibilidade e as condições de segurança e operação, conforme ilustra o esquema da Fig. 9.

Figura 9 – Esquema de um sistema de controle ativo.



Fonte: (CARNEIRO, 2009, modificado).

Os sistemas ativos são compostos basicamente por atuador, sensor e controlador. Os sensores captam o comportamento real da variável de controle e a transmitem aos controladores, que por sua vez tem como função comparar o valor real da variável de controle ao valor desejável e determinar a ação a ser executada. A função dos atuadores é realizar intervenções no sistema de forma que a variável de controle responda adequadamente. Atualmente, estes atuadores podem ser constituídos de materiais ativos ou inteligentes.

É possível dividir os materiais ativos em diferentes classes a partir do princípio de ativação. São eles: campo elétrico (materiais piezoelétricos), campo magnético (materiais magnetoreológicos e LMF magnéticas) e campo térmico (LMF). Nesse estudo é utilizado um campo térmico para ativar as propriedades de uma mola de LMF de Níquel-Titânio.

Os tipos de atuadores utilizados no controle ativo podem ser totalmente ativos ou semiativos. Os atuadores totalmente ativos são capazes de fornecer energia

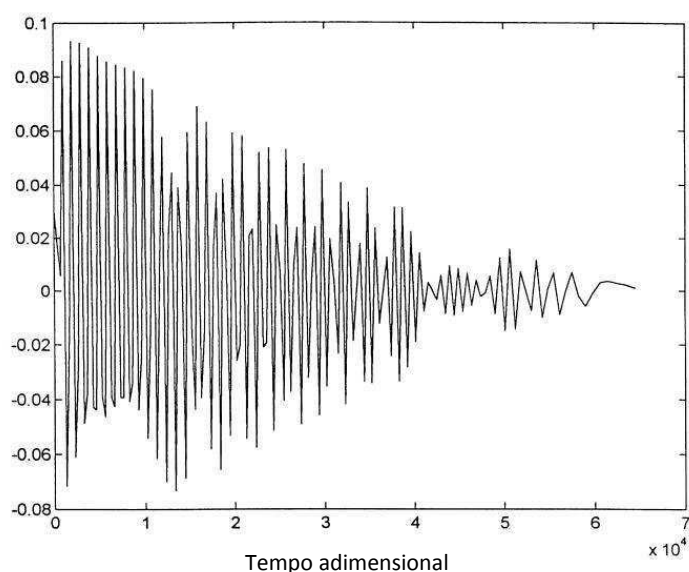
mecânica ao sistema. Alguns exemplos são atuadores piezoelétricos, dispositivos eletro-hidráulico, *shakers* eletromagnéticos, dentre outros.

Atuadores semiativos comportam-se como elementos passivos que podem armazenar ou dissipar energia, mas podem ser utilizados em controles dito ativos pela possibilidade de ajuste de suas propriedades mecânicas a partir da aplicação de um sinal de controle. Como exemplo de atuadores semiativos, encontram-se atuadores que usam fluidos eletorreológicos ou magnetorreológicos, ou ainda ligas com memória de forma. Tais sistemas também são chamados de ‘adaptativos’.

Chen e Levy (1999) realizaram uma investigação a cerca dos efeitos da temperatura na amplitude e no tempo de vibração para uma viga com uma camada de material viscoelástico e uma camada de LMF. Após as simulações foi possível concluir que a partir de variações na temperatura da LMF e, conseqüentemente, incrementos no amortecimento do sistema, reduzem o tempo de vibração e melhoram a resposta do sistema de controle para ambos os casos (sistema passivo e sistema ativo com atuador semiativo). Além disso, o controle híbrido (controle ativo com atuador semiativo) reduz significativamente o tempo de vibração se comparado com o sistema puramente passivo.

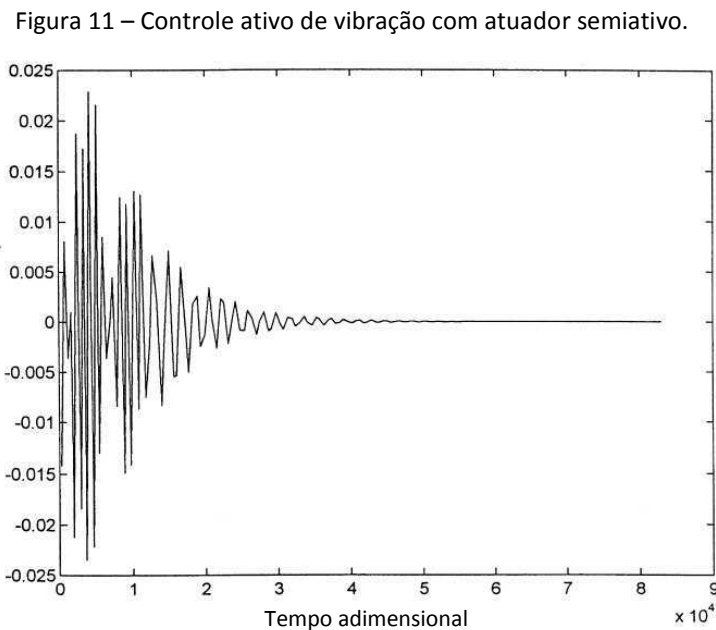
A Fig 10 mostra o resultado para o controle passivo explorando apenas a capacidade de dissipação de energia da camada de LMF.

Figura 10 – Controle de vibração passivo.



Fonte: (CHEN; LEVY, 1999, modificado).

Já a Fig. 11 mostra a resposta para a estratégia de controle híbrido, apresentando níveis de amplitudes mais baixos em um espaço menor tempo.



Em decorrência das várias propriedades particulares que as ligas com memória de forma apresentam é possível utilizá-las na fabricação de atuadores para atender as necessidades de sistemas de controle de vibrações. Esses materiais são uma classe singular de metais cujo comportamento mecânico e algumas particularidades são discutidas a seguir.

2.3 Ligas com Memória de Forma (LMF)

O comportamento das ligas com memória de forma foi descoberto em 1932 pelo físico sueco Arne Ölander em ligas de Ouro-Cádmio (AuCd) e por Greninger e Mooradian com ligas de Cobre-Zinco (CuZn). Depois disso, em 1951 surge o termo “shape recovery” criado por Chang e Read na sequência do estudo de ligas Ouro-Cádmio (AuCd), mas foi só em 1962 que William J. Buehler no “Naval Ordnance Laboratory” descobriu o efeito de memória de forma das ligas Níquel-Titânio denominadas então como NiTiNOL (Níquel-titânio do Naval Ordnance Laboratory). Foi ainda nesta década que se iniciou o comércio de ligas com memória de forma, porém

as suas aplicações ainda eram limitadas. Só depois de 20 anos é que o material conheceu as primeiras aplicações práticas (DELEMONT; DESROCHES, 2002; ZANABONI, 2008).

As ligas com memória de forma (LMF) pertencem ao grupo de materiais inteligentes (Smart Materials) que possuem a capacidade de recuperar por aquecimento sua forma original após serem deformados por forças exteriores. Ao entrar no regime plástico existe uma grande dissipação de energia no sistema, e ao contrário dos metais e ligas mais usadas, é possível retornar a forma inicial através de variações de temperatura. Este ciclo pode ser repetido várias vezes sem que as propriedades do material sejam afetadas.

As LMF vêm se destacando nas aplicações de controle de vibrações graças à capacidade que essas ligas possuem de assumir formas previamente definidas quando submetidas a determinados níveis de temperatura e tensão, de manter grandes forças e deslocamentos, de modificar características de rigidez e de amortecimento, além de se destacarem na fabricação de micro atuadores (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Dentre os vários tipos de ligas que apresentam o efeito memória de forma destacam-se: Cobre-Zinco-Alumínio, Cobre-Alumínio-Níquel e Níquel-Titânio. Neste estudo foi utilizada uma liga de Níquel-Titânio uma vez que apresenta melhores características mecânicas quando comparadas com as ligas que contêm cobre, como também por ser a mistura comercial sendo de fácil aquisição (PAVÓN *et al.*, 2012).

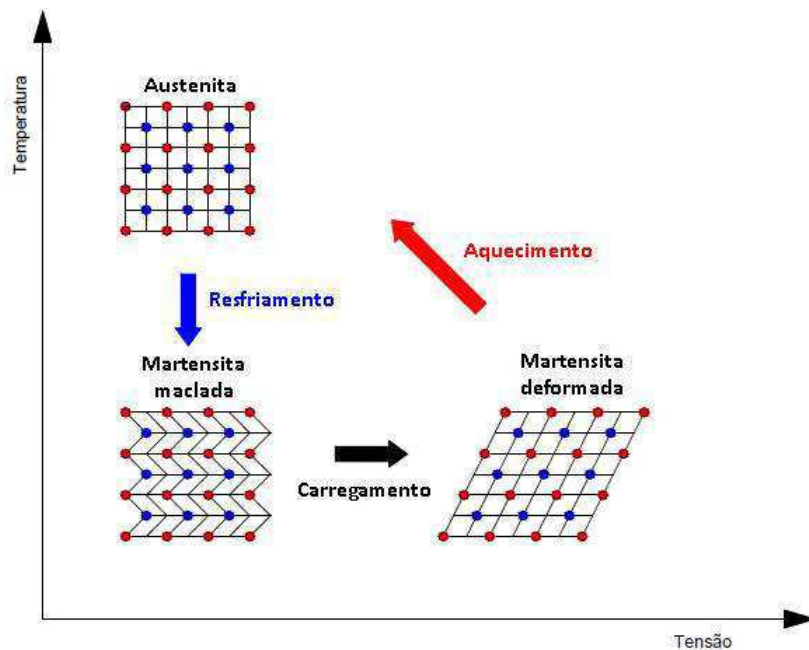
Tais ligas são conhecidas principalmente por duas propriedades termomecânicas singulares. A primeira delas, como a própria nomenclatura sugere, é a memória de forma. A outra propriedade é a superelasticidade resultante de um rearranjo da estrutura cristalina que confere ao material uma recuperação elástica que pode alcançar valores até 8%, bem superior ao dos demais metais.

Estes comportamentos devem-se às estruturas cristalinas do material designadas por fase Austenítica e fase Martensítica. São estas fases que permitem ao material exibir os comportamentos: elástico linear, efeito superelástico e efeito de memória de forma. Estas fases podem ser induzidas por tensão ou temperatura, ambas introduzem uma variação na estrutura cristalina o que altera o comportamento mecânico da liga (SERAFIM, 2011).

Na fase austenítica a estrutura dos cristais possui uma forma quadrangular regular mais compacta (cúbica de corpo centrado), o que acaba restringindo o movimento e dificultando deformações permanentes, caracterizando uma fase de natureza elástica. Já na fase martensítica os cristais se encontram organizados em forma de paralelogramo (ortorrômbica ou monoclínica) que permite maior deformação do material para uma menor tensão, fazendo com que o material atinja a zona plástica facilmente (DUERIG, 1990).

A Fig. 12 apresenta um esquema onde é possível observar a alternância de fases numa liga com memória de forma sujeita a determinados carregamentos mecânicos e térmicos.

Figura 12 – Alternância de fases das LMF.



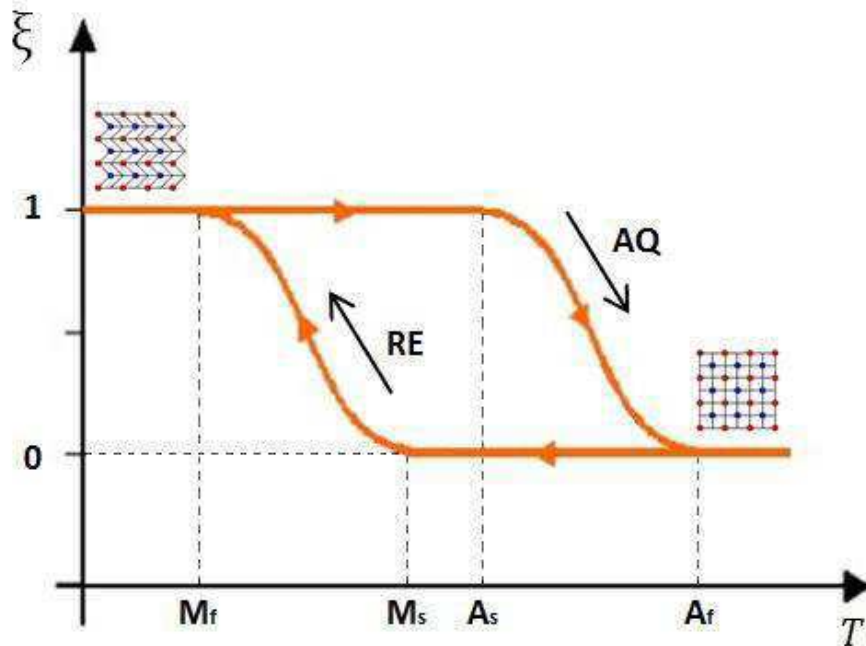
Fonte: (SEMIÃO, 2010, modificado).

A orientação cristalina também é responsável pelos altos índices de deformação plástica que essas ligas suportam quando se encontram abaixo de uma temperatura característica denominada M_f (*Martensite finish* - Martensita final). O que acontece é que durante a aplicação da tensão as variantes martensíticas existentes tendem a se acomodarem em uma forma mais estável, sofrendo uma deformação que após a retirada da tensão permanece. Chama-se este comportamento de quasiplasticidade e, dependendo da LMF, as deformações podem alcançar a ordem de

10% e ser recuperadas por aquecimento. Por isso se diz que a quasiplasticidade antecede o efeito memória de forma.

A Fig. 13 ilustra as temperaturas envolvidas na transformação martensítica, como também a fração volumétrica de martensítica ξ na estrutura cristalina da LMF durante o resfriamento (RE) e o aquecimento (AQ).

Figura 13 – Evolução da fração martensítica em função da temperatura.



Fonte: (SEMIÃO, 2010, modificado).

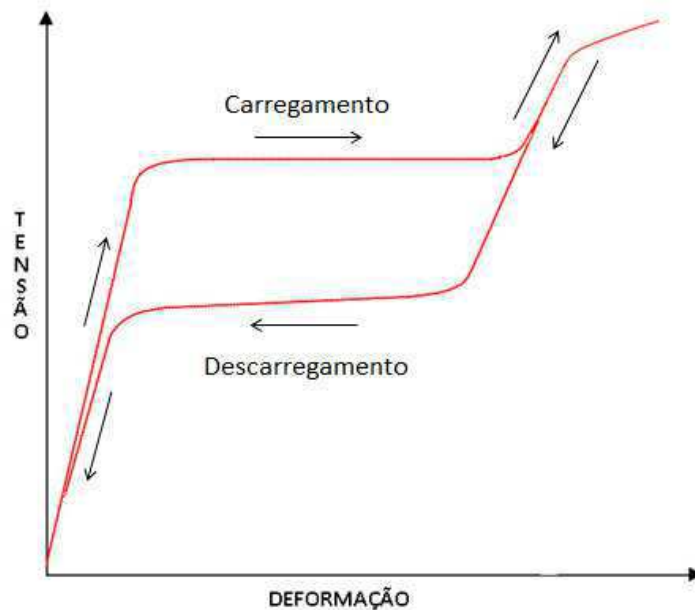
Abaixo de M_f tem-se somente martensita; enquanto que acima de A_f tem-se apenas austenita. M_s (*Martensite start* – Martensita inicial) corresponde a temperatura onde se inicia a formação de martensita, da mesma forma que A_s (*Austenite start* – Austenita inicial) representa o início da formação de austenita.

Acima de A_f (*Austenite finish* – Austenita final), as LMF se encontram na fase austenítica. Se esta estrutura for submetida a um carregamento mecânico, observa-se uma deformação a um nível de tensão praticamente constante. Com o descarregamento o corpo retorna a posição original, porém a um nível de tensão mais baixo descrevendo uma histerese mecânica. Esse fenômeno é chamado de superelasticidade.

A superelasticidade é a propriedade termomecânica que permite a recuperação da forma inicial ao ser retirado o carregamento a que o material está sujeito, podendo recuperar deformações da ordem de 8% com dissipando de energia em cada ciclo de carregamento e descarregamento, conforme ilustra a Fig. 14.

A grande diferença entre a superelasticidade e a elasticidade deve-se ao fato do descarregamento seguir o mesmo caminho do carregamento na elasticidade, enquanto que na superelasticidade os caminhos de carga e descarga não são os mesmos, devido à alternância de fases austenítica/martensítica é gerado um ciclo de dissipação de energia.

Figura 14 – Curva Tensão-Deformação ideal para uma LMF acima de A_f (superelasticidade).



Fonte: (SEMIÃO, 2010).

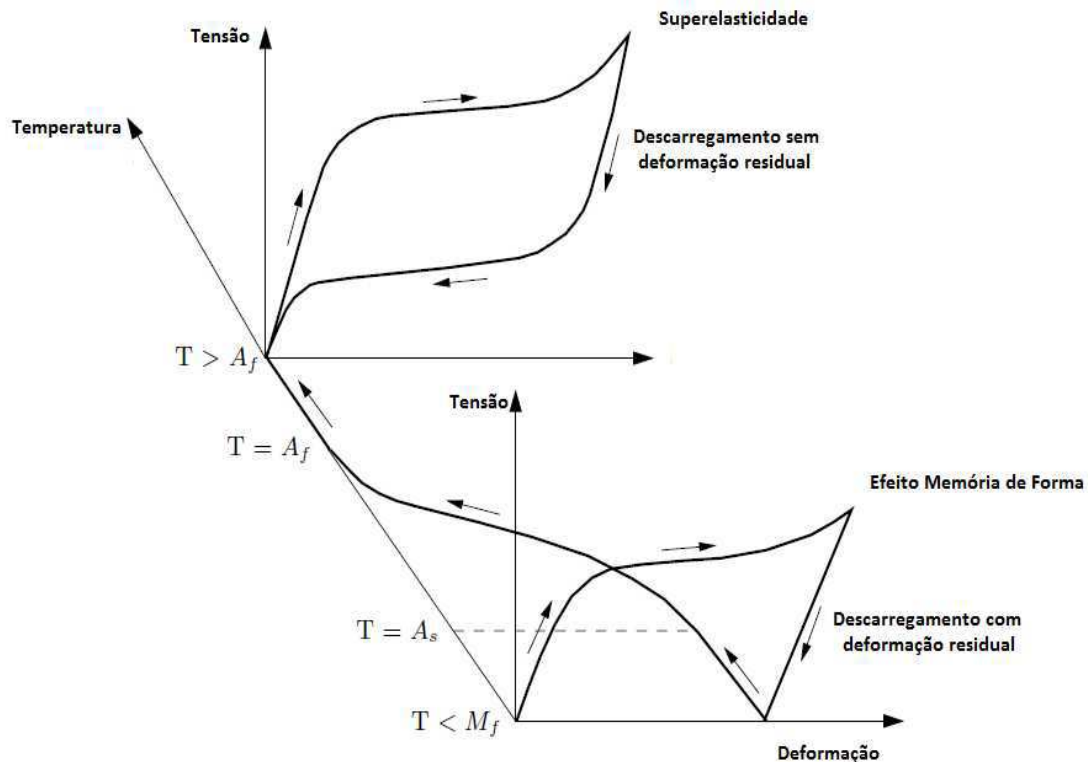
É comum usar o termo pseudoelasticidade como sinônimo de superelasticidade, porém esses dois conceitos são diferentes. Na pseudoelasticidade a deformação recuperada com o descarregamento é parcial, enquanto que na superelasticidade essa deformação recuperada é total (LÓPEZ, 2005).

O que faz das LMF materiais tão diferenciados são os valores de deformação, a capacidade de dissipação de energia e a respectiva recuperação de forma que estes

conseguem apresentar, alcançado deformações da ordem 8%, contra 0,2% de um aço comum.

Um esquema tridimensional representativo da relação entre tensão, deformação e temperatura destas ligas é ilustrado na Fig. 15, onde se pode verificar os comportamentos de uma LMF em função da temperatura, tensão e deformação.

Figura 15 – Comportamento Tensão-Deformação-Temperatura típico de uma LMF.



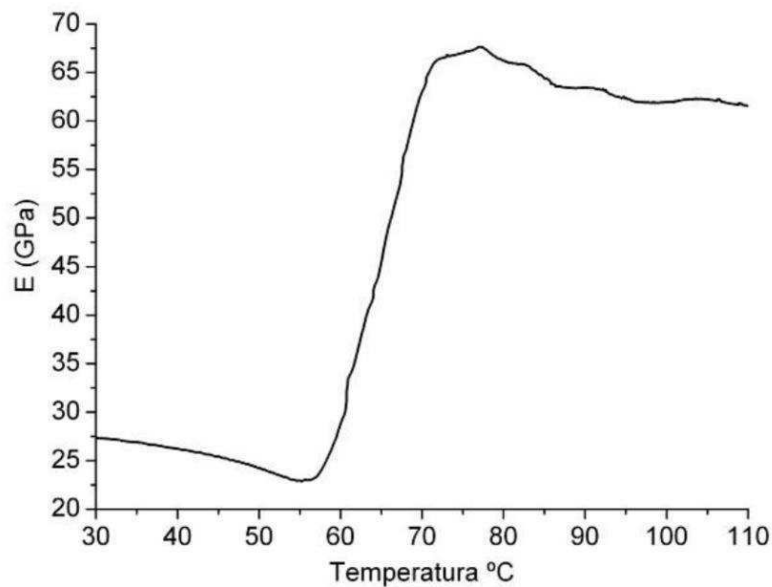
Fonte: (SEMIÃO, 2010).

Além dos efeitos de memória de forma e da superelasticidade, as LMF podem apresentar variações significativas no módulo de elasticidade e nas características de amortecimento. Dessa forma, essas ligas podem ser integradas às estruturas a fim de melhorar, aumentar e controlar as suas características estáticas ou dinâmicas. Estudos mostram que o módulo de elasticidade da fase austenítica pode ser três vezes superior ao da fase martensítica (GUPTA, 2000; GRANT; HAYWARD, 1999; LIANG; ROGERS, 1993).

A Fig. 16 mostra o comportamento do módulo de elasticidade em função da temperatura para um fio de LMF NiTi. A partir dos resultados obtidos observa-se o

expressivo aumento do módulo de armazenamento para o fio NiTi durante a transformação de fase.

Figura 16 – Comportamento do módulo de elasticidade em função da temperatura.



Fonte: (VILAR *et al.*, 2012)

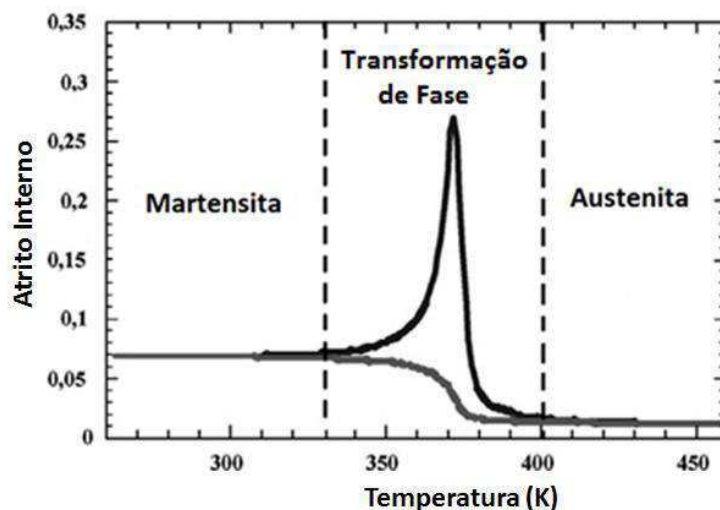
Além de variações na rigidez as LMF possuem propriedades de amortecimento significativas que estão associadas às mudanças na estrutura cristalina. A presença desse alto amortecimento é atribuída à capacidade de dissipação de energia dessas ligas. Devido à sua deformação reversível, ao elevado limite de resistência, bem como a ótima resistência a fadiga, vários estudos têm sido feitos buscando explorar as potencialidades de amortecimentos das LMF para aplicações em controles ativo e passivo de vibração (PIEDBOEUF; GAUVIN; THOMAS, 1998).

Estudos anteriores indicam que as propriedades de amortecimento das LMF estão diretamente relacionadas a três princípios: atrito interno, martensita induzida por temperatura e martensita induzida por tensão (PAN; SHO, 2007; HODGSON, 2002; LIANG; ROGERS, 1990).

Considera-se que amortecimento resultante do atrito interno é causado pela resistência do movimento das interfaces de martensita e austenita (YOSHIDA; ONO; ASAI, 2000). Os maiores níveis de atrito interno são encontrados quando a estrutura cristalina possui, aproximadamente, 50% de martensita, ou ocorre na faixa de

temperatura onde se inicia a transformação da fase Romboedral (fase R). A Fig. 17 mostra o esquema representativo do atrito interno em três fases de transformação e o respectivo comportamento do amortecimento. (UCHIL; KAMARA; MAKESH, 2002).

Figura 17 – Comportamento do atrito interno e do amortecimento durante as transformações martensíticas.



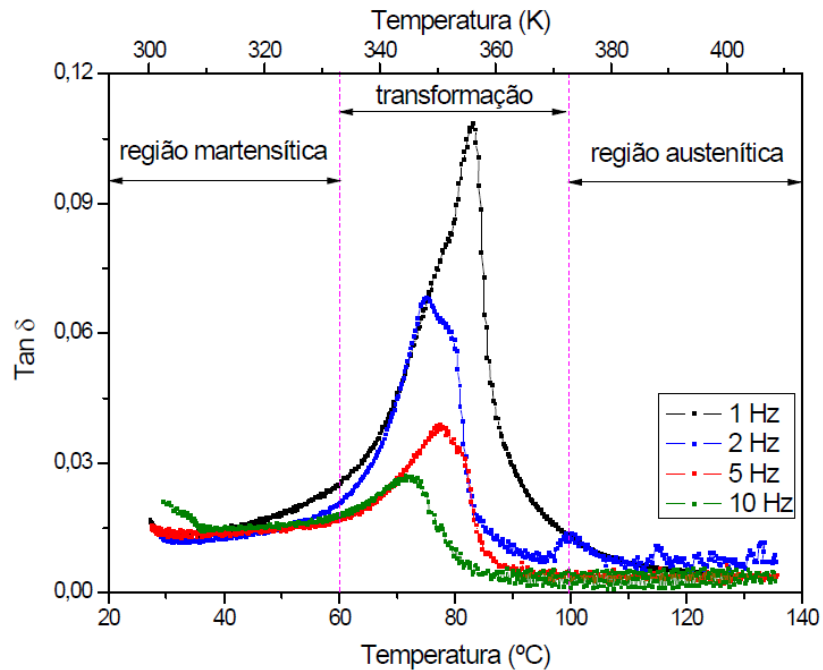
Fonte: (JUÁN; NÓ, 2003).

Alguns resultados experimentais com LMF Ni-Ti evidenciam que a fase martensítica e a fase R intermediária possuem uma capacidade de amortecimento maior do que a fase austenítica. Pois os movimentos entre os planos e placas de martensita nas fases frias são mais intensos, enquanto que na fase austenítica o amortecimento segue o comportamento do atrito interno e é mínimo, bem como pela não existência de interfaces e defeitos móveis (JUÁN; NÓ, 2003).

O amortecimento apresentado pela LMF na fase martensítica se deve ao deslocamento dos planos de martensita induzido por tensão. E é fortemente dependente da amplitude com um comportamento relativamente complexo. Em todo caso, na fase martensítica, as LMF apresentam uma boa capacidade de amortecimento para uma ampla faixa de amplitude (JUÁN; NÓ, 2003).

Silva (2009) estudou o comportamento termomecânico de uma liga de NiTi com memória de forma utilizando um Analisador Dinâmico Mecânico (DMA) comercial e mostrou a influência da frequência no fator de perda dessa liga. A Fig. 18 mostra as curvas encontradas no ensaio para frequências entre 1 e 10 Hz.

Figura 18 – Comportamento da capacidade de amortecimento com a variação da frequência de excitação em uma LMF NiTi.

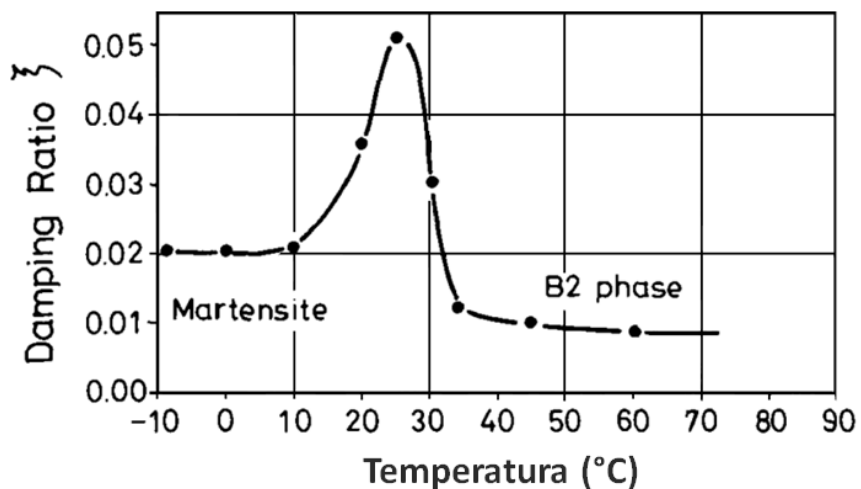


Fonte: (SILVA, 2009).

Portanto, as máximas capacidades de amortecimento ocorrem durante a transformação de fase e são fortemente dependentes da frequência de excitação, como pode ser observado no decaimento das curvas com o aumento da frequência.

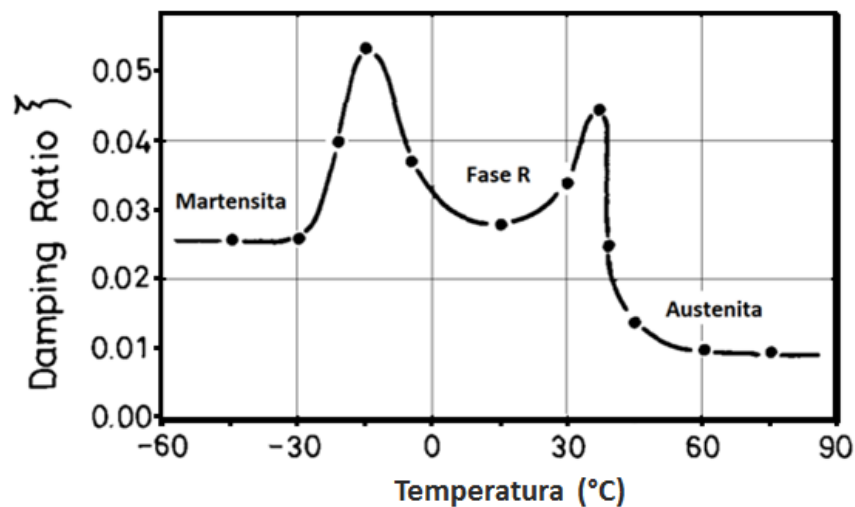
As Figs. 19 e 20 mostram o comportamento do fator de amortecimento em duas ligas de Nitinol, onde uma apresenta fase R, enquanto a outra não.

Figura 19 – Fator de amortecimento em função da temperatura para uma liga $Ni_{49,8}Ti_{50,2}$.



Fonte: (LIN; WU; YEH, 1993).

Figura 20 – Fator de amortecimento em função da temperatura para uma liga $Ni_{49}Ti_{51}$.



Fonte: (LIN; WU; YEH, 1993).

Os resultados de Lin, Wu e Yeh (1993) coincidem com as conclusões que Juan e Nó (2003) elaboraram posteriormente, ao propor uma metodologia para análise do atrito interno em LMF como uma importante ferramenta na medição do amortecimento durante as transformações martensíticas.

O baixo atrito interno na fase austenítica resulta numa baixa capacidade de amortecimento, além disso, a redução nos processos dinâmicos de ordenamento de defeitos na estrutura cristalina também influencia na baixa capacidade de dissipação de energia nessa fase (CHANG; WU, 2007).

Nas regiões de transformação de fase são observados picos de amortecimento que estão associados ao movimento dos planos de martensita e de austenita que vão se formando durante o carregamento térmico. Essa dependência se estende a outros parâmetros além da temperatura.

Portanto, dada estas considerações, a fase martensítica é tradicionalmente considerada para aplicações de amortecimento de vibrações. Porém, o componente de LMF martensítico apresentaria baixo módulo de elasticidade e estaria sujeito à deformação plástica, o que obrigaria um aquecimento externo para recuperação de forma. Na fase austenítica a capacidade de amortecimento é menor, mas as forças de recuperação são maiores e a deformação residual é mínima (SONG; MA; LI, 2006).

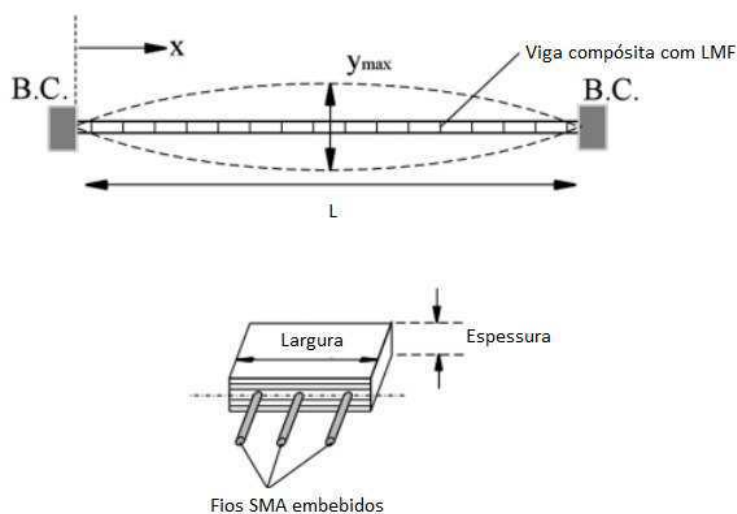
2.4 Controle de Vibração Utilizando Ligas com Memória de Forma

Controlar vibração é reduzir forças e movimentos que são transmitidos de um elemento a outro de uma estrutura, ou entre várias estruturas. Para isso são utilizados sistemas de isolamento entre essas estruturas a fim de reduzir efeitos ou perturbações indesejadas. Os estudos de controle de vibrações encontram nos materiais inteligentes uma oportunidade para aprimorar as técnicas já existentes.

A utilização de ligas com memória de forma em estruturas é uma técnica bem disseminada na literatura científica. As propriedades dessas ligas são aproveitadas para aperfeiçoar sistemas de controle, para a concepção de absorvedores de vibração mais eficientes, para o desenvolvimento de elementos de máquinas com rigidez variável, para o projeto de atuadores com respostas mais rápidas e segue evoluindo na medida em que novos desafios são vislumbrados.

Lau (2002) estudou a influência de fios com memória de forma sobre a frequência natural e a razão de amortecimento em vigas compósitas incorporando LMF (Fig. 21). As respostas analíticas e experimentais permitiram concluir que as frequências naturais não sofrem grandes alterações para a condição pré-tensionada dos fios. Ao passo que a razão de amortecimento aumenta juntamente com a temperatura, independente da condição de tensão dos fios.

Figura 21 – Modelo teórico de uma viga compósita com LMF.



Fonte: (LAU, 2002, modificado).

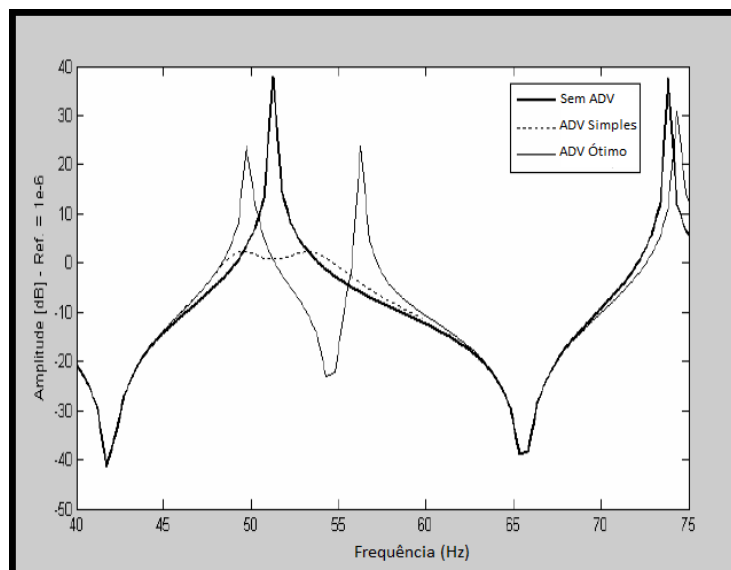
Recentemente, Auricchio e Mekki (2011) estudaram a superelasticidade e o amortecimento de LMF para desenvolver um sistema de dissipação de energia que funcione como um dispositivo passivo de controle em cabos de pontes. A partir de uma modelagem linear para os cabos e de um modelo unidimensional para as ligas com memória de forma, considerando a histerese envolvida, estudou-se o problema da concepção ótima do dispositivo. Por fim, os resultados numéricos mostraram que o dispositivo com LMF responde melhor as vibrações do sistema do que um dispositivo convencional.

Williams *et al.* (2005) estudaram o aprimoramento de um dispositivo clássico de controle passivo, que ao aproveitar as propriedades das LMF pode ser chamado de absorvedor de vibração sintonizado (*Tuned Vibration Adsorbers – TVA*). Esse dispositivo é utilizado em sistemas onde a frequência é variável ou imprecisa. O TVA com memória de forma permite alterar a sua rigidez de acordo com a temperatura. Esta propriedade faz com que o TVA com memória de forma possa atenuar as vibrações do sistema em uma faixa de frequência apenas alterando o módulo de elasticidade, por intermédio de uma variação térmica.

Dias e Cunha (2008) desenvolveram e simularam um ADV incorporando LMF. As simulações foram feitas para um sistema de dois graus de liberdade. Neste caso, variou-se a frequência natural do sistema secundário visando sintonizá-la com a frequência natural do sistema primário, tornando possível a redução dos níveis de vibração do sistema primário. O elemento de rigidez que ligava os dois sistemas era uma mola de LMF. Através da variação da temperatura da mola foi possível sintonizar a frequência natural da massa secundária e reduzir os níveis de vibração.

A Fig. 22 mostra as curvas de resposta em frequência para o sistema sem ADV, com um ADV simples e com um ADV adaptativo com LMF.

Figura 22 – FRF para ADV adaptativo ótimo



Fonte: (DIAS; CUNHA, 2008).

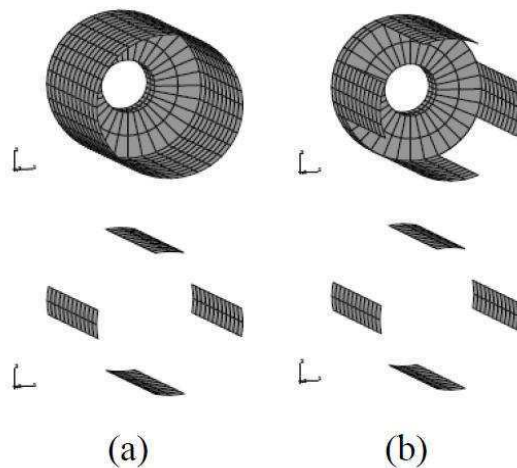
A variação de rigidez em mancais usando LMF foi alvo dos estudos de He *et al.* (2007). Os autores montaram um rotor desbalanceado sobre mancais de rolamento visando à redução das amplitudes na zona de ressonância. Nesse caso as LMF estavam incorporadas na forma de molas helicoidais que constituíam o elemento de rigidez de um dos mancais. O mancal de rigidez variável era composto por molas distribuídas ao redor do suporte do rotor e no interior de cada mola existia uma barra responsável pelo aquecimento das molas. Este aquecimento provocava uma mudança nos níveis de vibração do eixo quando o sistema passava pela faixa de frequências críticas, permitindo assim a atenuação proposta pelos autores.

Silva e Mesquita (2009) simularam numericamente um controle ativo de vibrações em rotores. O eixo de rotação considerado estava apoiado sobre dois mancais de LMF. Considerando a rigidez variável das LMF foi simulado um eixo com dois rotores desbalanceados e estimadas as amplitudes para as primeiras frequências naturais. Verificou-se que o controle ativo reduziu os níveis em algumas situações consideradas; 99% para o primeiro rotor e 62% para o segundo quando comparados com um sistema idêntico, porém sem rigidez variável.

Ainda estudando máquinas rotativas Zak, Cartmell e Ostachowicz (2003) propuseram uma metodologia para o controle de vibração utilizando uma luva compósita com fitas de LMF. Foram analisadas várias combinações possíveis variando

espessura e quantidade de material da luva e das fitas, como mostra a Fig. 23. Os autores concluíram que a metodologia empregada é capaz de reduzir a amplitude de vibração nas velocidades críticas, como também é capaz de modificar a resposta do sistema para uma faixa de frequência.

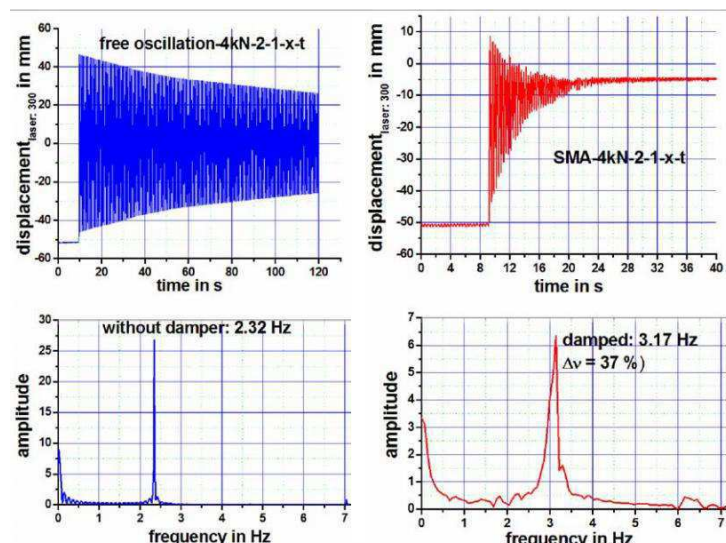
Figura 23 – Modelo numérico de uma luva compósita com fitas SMA (a) totalmente e (b) parcialmente preenchida.



Fonte: (ZAK; CARTMELL; OSTACHOWICZ, 2003).

Auguet *et al.* (2011) estudaram o incremento no amortecimento ao introduzir fios de LMF em cabos de construções civis. Foram realizados testes experimentais comparando as respostas no domínio do tempo e da frequência para cabos “comuns” e cabos com fios de LMF. Ao final desse estudo os autores propõem uma relação entre o comprimento dos fios de LMF e a redução do pico máximo de amplitude, considerando o comprimento do cabo comum já instalado. Além disso, foi proposto um diâmetro ótimo dos fios com memória de forma. A Fig. 24 mostra os resultados experimentais dessa análise.

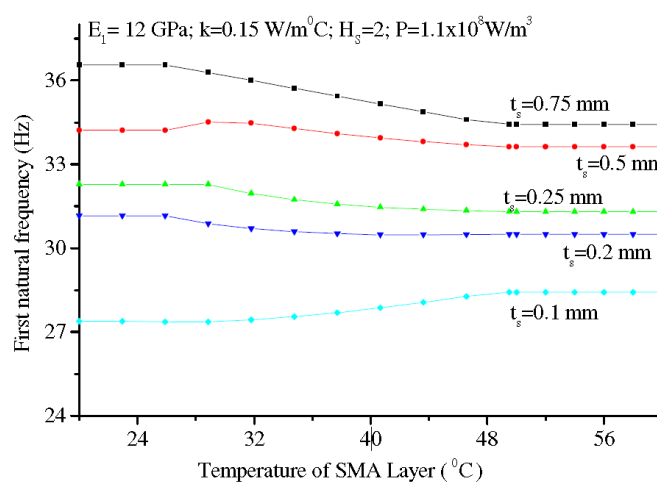
Figura 24 – Respostas experimentais de oscilações induzidas no cabo: Esquerda, sem amortecimento.
Direita, com amortecimento.



Fonte: (AUGUET *et al.*, 2011).

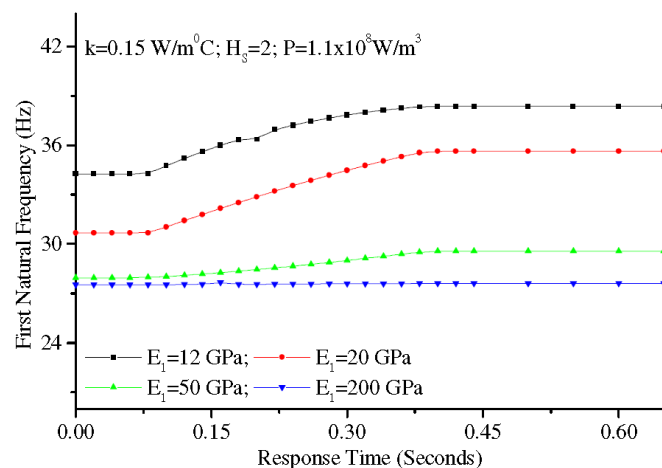
Balagol, Bajoria e Kulkarni (2006) apresentaram um modelo em elementos finitos para análise de vibração livre em placas compostas com LMF. Estes autores estudaram o efeito sobre a vibração mediante a variação do volume de LMF, da temperatura da liga e da espessura, largura e rigidez da placa. As Figs. 25 e 26 apresentam alguns dos resultados encontrados neste trabalho.

Figura 25– Primeira frequência natural em função da temperatura para diferentes espessuras da placa.



Fonte: (BALAPGOL; BAJORIA; KULKARNI, 2006).

Figura 26 – Resposta no tempo das primeiras frequências naturais para diferentes matrizes de rigidez.



Fonte: (BALAPGOL; BAJORIA; KULKARNI, 2006).

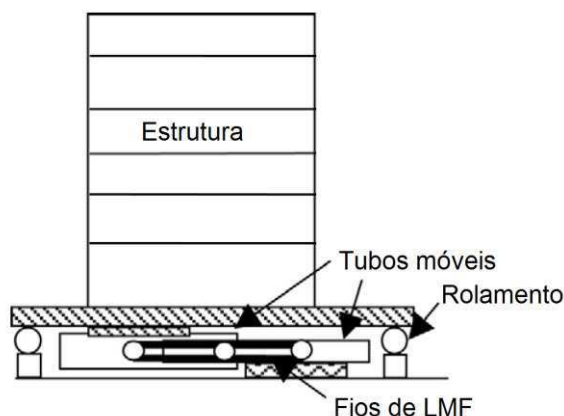
As LMF vêm se destacando como um material relevante no que diz respeito à atenuação de vibrações nas estruturas da construção civil, ao serem utilizadas no desenvolvimento de sistemas de controle passivos, ativos e semiativos buscando reduzir os efeitos dos carregamentos dinâmicos aos quais essas estruturas estão comumente expostas.

Os controles estruturais passivos que usam LMF se baseiam nas propriedades de amortecimento. Nesse sentido, as LMF se destacam em aplicações de isolamento pela base e em sistemas de dissipação de energia.

Embora se baseiem na mesma propriedade de amortecimento das LMF, esses dois mecanismos são diferentes na concepção e nos princípios. Um isolador com LMF proporciona uma variação na rigidez para a estrutura de acordo com os níveis de excitação, além de dissipar energia e de restaurar a forma após o descarregamento. Por isso, ligas superelásticas são as mais usadas na concepção de isoladores. Por outro lado, sistemas de dissipação de energia procuram atenuar a resposta dinâmica de estruturas absorvendo energia de vibração baseado no laço de histerese entre tensão-deformação. Logo, tanto ligas superelásticas como ligas martensíticas são estudadas nesse caso (SAADAT *et al.* 2002).

Dolce, Cardone e Marnetto (2000) desenvolveram e testaram um sistema de isolamento baseado em fios de Nitinol, buscando investigar a viabilidade da utilização desses fios no desenvolvimento de sistemas de controle de vibração. A Fig. 27 esquematiza a montagem do experimento.

Figura 27 – Esquema de um sistema de isolamento com LMF para prédios.



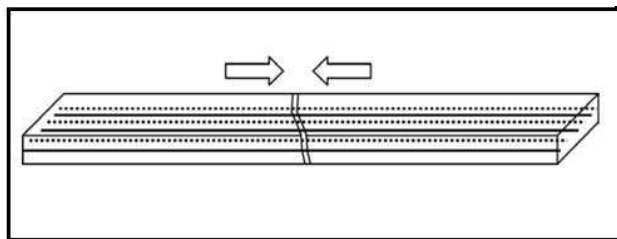
Fonte: (DOLCE; CARDONE; MARNETTO, 2000).

Um fio de Nitinol superelástico é conectado a tubos móveis de maneira que, quando houver um movimento longitudinal entre a estrutura e a fundação, o fio é deformado e a amplitude da vibração é amortecida. Ensaios mostraram que o sistema de isolamento apresenta uma rigidez que varia com a intensidade da carga e uma efetiva redução na transmissão de energia. O teste foi realizado para controlar as respostas em vibração livre, confirmando a aplicabilidade de fios LMF em sistemas de controle estrutural passivo.

Os controles estruturais ativos sintonizam a frequência natural das estruturas tentando afastar o máximo possível a zona de ressonância. Com o aquecimento, as LMF incorporadas ou instaladas nas estruturas sofrem uma variação na sua rigidez e acabam sintonizando a frequência natural. McGavin e Guerin (2002) relataram um experimento onde a frequência natural de uma estrutura de aço era alterada a partir de atuadores de LMF. Foram realizados testes para diferentes quantidades e configurações de fios LMF na estrutura e foi avaliado a sua influência na frequência natural. Dessa forma, os autores conseguiram promover uma variação de 32% na frequência natural do sistema, ao considerar uma configuração que usava pares de fios LMF trançados, ao invés do fio simples.

Também é importante citar o uso de LMF na reabilitação de danos estruturais causados por eventos sísmicos. Song, Ma e Li (2006) propuseram um tipo de concreto armado inteligente que incorpora fios de LMF martensíticos tensionados (Fig. 28). Caso haja o aparecimento de fissuras, os fios de LMF podem ser aquecidos para que recuperem sua forma e com isso reduzam a severidade das fissuras.

Figura 28 – Esquema do corpo de prova com fios de LMF.



Fonte: (SONG; MA; LI, 2006).

As Figs. 29 e 30 mostram imagens de testes em que foi possível recuperar uma fissura de aproximadamente 8 mm.

Figura 29 – Fissura no corpo de prova durante o carregamento.



Fonte: (SONG; MA; LI, 2006).

Figura 30 – Corpo de prova após o descarregamento e aquecimento dos fios de LMF.

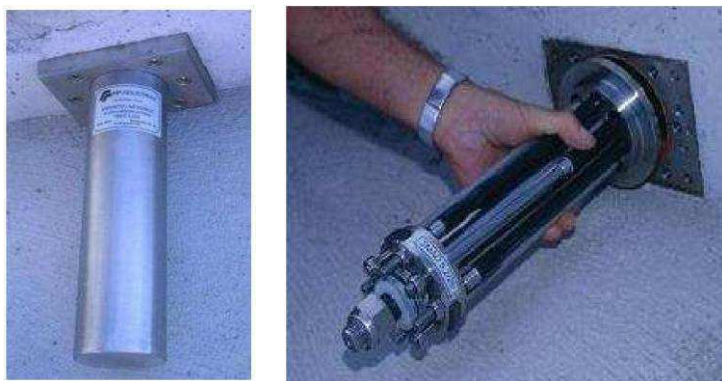


Fonte: (SONG; MA; LI, 2006).

Na Fig. 31, tem-se um exemplo de um dispositivo com LMF superelásticas utilizado para reduzir a ação sísmica em uma antiga construção. Esse dispositivo de LMF apresenta propriedades estruturais diferentes para diferentes forças aplicadas. Sob baixo nível de carregamento, o dispositivo é rígido e não permite deslocamentos

significativos. Sob altas solicitações horizontais, tais como um terremoto, sua rigidez reduz para controlar os deslocamentos das paredes de alvenaria e para impedir danos mais graves (FUGAZZA, 2003).

Figura 31 – Dispositivo LMF de controle dos efeitos sísmicos.



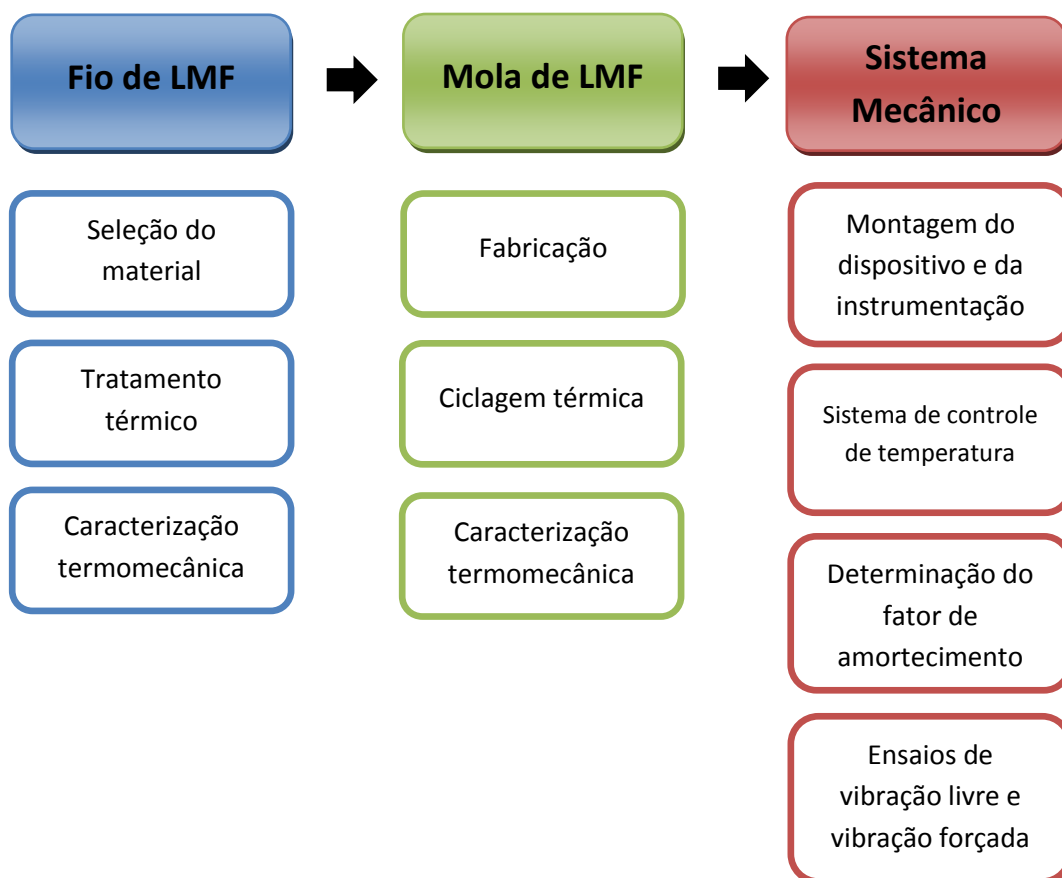
Fonte: (FUGAZZA, 2003).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esse trabalho foi desenvolvido através de abordagens quantitativas e classificado como pesquisa aplicada de caráter exploratório, uma vez que objetiva gerar conhecimentos dirigidos à solução de problemas específicos e resultados replicáveis, identificando fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos estudados (LAKATOS, 2007).

As várias etapas metodológicas foram realizadas com o apoio da infraestrutura do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) e do Laboratório de Vibrações (LVi), ambos da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). A Fig. 32 apresenta um esquema dos procedimentos metodológicos realizados durante a pesquisa.

Figura 32 – Etapas metodológicas.



Fonte: Autoria própria.

3.1 Seleção e Caracterização do Fio de LMF

Dentre os materiais disponíveis foi escolhido o fio de liga Níquel-Titânio (NiTi), composto de 50% Níquel (Ni) e 50% Titânio (Ti), no estado bruto de trabalho a frio, com diâmetro de 2,02 mm.

Para eliminar parte do encruamento do material, o fio escolhido foi recozido a 400°C durante 30 minutos, no forno de resistência elétrica, modelo *Titan Platinum Quartz*, do fabricante EDG, e resfriado em temperatura ambiente. Além de eliminar boa parte do encruamento da liga bruta, esse tratamento também promove a liberação da transformação martensítica, fenômeno responsável pelo efeito memória de forma.

Após esse tratamento retirou-se duas amostras do fio selecionado utilizando a máquina de corte de precisão da marca BUEHLER, modelo Isomet, equipada com um disco diamantado. As dimensões das amostras são mostradas na Tab. 1.

Tabela 1 – Dimensões das amostras do fio selecionado.

| | Amostra 1 | Amostra 2 |
|--------------------|------------------|------------------|
| Comprimento | 1,5 mm | 31,2 mm |
| Peso | 0,0065 g | 0,663 g |

Fonte: Autoria própria.

A amostra 1 foi utilizada na determinação das temperaturas de transformação de fase desse fio de LMF NiTi por ensaio de calorimetria DSC (Differential Scanning Calorimeter). Para essa medição utilizou-se um calorímetro DSC da marca TA Instruments, modelo Q20. O teste foi realizado com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C/min e uma faixa de temperatura entre 0°C e 100°C.

A Amostra 2 foi submetida a duas análises de comportamento dinâmico, realizadas no DMA (Dynamic Mechanical Analyser) Q800, da TA Instruments com o intuito de observar a influência da frequência de excitação e da temperatura no comportamento do módulo elasticidade e do fator de perda.

O primeiro ensaio foi isotérmico e repetido para três temperaturas diferentes, escolhidas de modo que o fio de LMF fosse analisado na fase martensítica, na faixa

intermediária de transformação de fase e na fase austenítica. O ensaio foi realizado no modo de viga simplesmente engastada com a aplicação de uma força oscilatória de frequência variável (8 a 150 Hz) e amplitude constante (5 μm). Na montagem do ensaio a amostra 2 apresentou comprimento útil de 17,08 mm.

Já o segundo ensaio buscou analisar a influência da frequência no comportamento do amortecimento a partir de uma varredura de temperatura partindo de 25°C até 100°C, para quatro frequências diferentes (1 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 12 Hz). As frequências mais baixas (1 Hz e 5 Hz) foram escolhidas tomando como base o trabalho de Silva (2009), no qual ele concluiu que em frequência mais baixas o $\text{Tan } \delta$ tende a ser máximo. Já as frequências mais altas (10 Hz e 12 Hz) foram escolhidas por estarem próximas a frequência natural do sistema mecânico adotado. A taxa de aquecimento foi de 5°C/min com uma amplitude de 5 μm , conforme Silva (2009).

3.2 Fabricação e Caracterização da Mola de LMF

Concluído o processo de caracterização do fio de LMF, uma mola foi confeccionada através de um método de fabricação consolidado em trabalhos anteriores pelo LVi. Esse processo consiste na conformação mecânica desse fio ao redor de um fuso com um diâmetro próximo do diâmetro efetivo desejado para a mola. A Fig. 33 mostra a mola confeccionada a partir do fio selecionado e na Tab. 2 é possível encontrar os parâmetros de projeto da mesma.

Figura 33 – Mola de LMF NiTi.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 2 – Dados da mola de LMF confeccionada.

| Dados | Mola |
|----------------------|------------------------|
| Material | Níquel-Titânio (50-50) |
| Diâmetro do fio | 2,02 mm |
| Diâmetro efetivo | 12,00 mm |
| Passo | 4,61 mm |
| Nº de Espiras ativas | 7 |

Fonte: Autoria própria.

Buscando estabilizar a transformação de fase da LMF usada para a fabricação da mola, realizou-se uma ciclagem térmica utilizando um dispositivo projetado por Brandão e Silva (2012), mostrado na Fig. 34, para treinamento de molas de LMF. Para a mola em análise o treinamento teve caráter de tratamento. Foram realizados 500 ciclos de aquecimento e resfriamento com o objetivo de estabilizar o comportamento de efeito memória de forma na mola de LMF. Em um ciclo de treinamento, a mola era aquecida até 80°C e logo em seguida resfriada até 3°C.

Figura 34 – Dispositivo para ciclagem térmica de molas de LMF.



Fonte: (BRANDÃO, SILVA, 2012).

Esse novo tratamento térmico visa estabilizar as transformações martensíticas da liga, melhorando as respostas das propriedades mecânicas do elemento com LMF, como as temperaturas de transformação de fase, força desenvolvida e rigidez.

Como discutido anteriormente, as ligas com memória de forma apresentam alterações em algumas de suas propriedades mecânicas quando submetidas a determinados carregamentos. Como, por exemplo, mudanças no módulo de elasticidade a partir de um carregamento térmico. Portanto, como a rigidez de uma mola é função do módulo de elasticidade do material do qual é constituída, essa característica também irá variar junto com o módulo.

Em virtude desse comportamento, optou-se por estudar o comportamento da rigidez da mola de LMF a partir de abordagens teóricas e experimentais.

Para a análise teórica foi escolhido um modelo matemático constitutivo que considera, além dos parâmetros característicos (geometria, material, número de espiras ativas), as temperaturas de transformação da LMF utilizada e a fração de martensita da amostra. Dessa forma, o modelo introduz os efeitos da histerese térmica que as LMF apresentam e que influenciam a evolução da rigidez, resultando em curvas de rigidez distintas durante o aquecimento e o resfriamento e em equações diferentes para cada carregamento térmico (IKUTA *et al.*, 1991).

A Eq. (27) corresponde ao comportamento da rigidez durante o aquecimento e a Eq. (28) durante o resfriamento.

$$k_{LMF-A} = k_{min} + \left((k_{max} - k_{min}) - \frac{(k_{max} - k_{min})}{1 + e^{\left(\frac{6,2}{A_F - A_S} \cdot \left(T \cdot \frac{A_F + A_S}{2}\right)\right)}} \right) \quad (27)$$

$$k_{LMF-R} = k_{min} + \left((k_{max} - k_{min}) - \frac{(k_{max} - k_{min})}{1 + e^{\left(\frac{6,2}{M_S - M_F} \cdot \left(T \cdot \frac{M_F + M_S}{2}\right)\right)}} \right) \quad (28)$$

Onde:

k_{LMF-A} – Rigidez da mola durante o aquecimento;

k_{LMF-R} – Rigidez da mola durante o resfriamento;

k_{min} – Rigidez mínima;

k_{max} – Rigidez máxima;

M_S – Temperatura inicial de transformação da fase martensítica;

M_F – Temperatura final de transformação da fase martensítica;

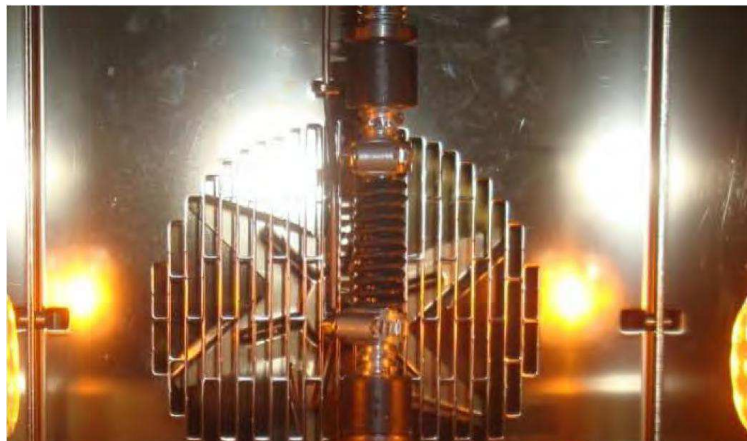
A_S – Temperatura inicial de transformação da fase austenítica;

A_F – Temperatura final de transformação da fase austenítica;

T – Temperatura da mola;

Para verificar a validade do modelo adotado realizou-se um ensaio para determinação da rigidez da mola em função da temperatura, utilizando a máquina universal de ensaios eletromecânica Instron® 5582 com câmara de aquecimento controlado, como mostra a Fig. 35. Para esse experimento foi utilizada uma célula de carga de 5 kN. A leitura da temperatura foi feita a partir de um sistema de aquisição ligado a um termopar fixado ao corpo da mola.

Figura 35 – Montagem da mola de LMF para ensaio.



Fonte: (AQUINO, 2011).

O ensaio consistiu na compressão e descompressão da mola, com uma deformação máxima de 10 mm. Cada ciclo (compressão e descompressão) durava 12 segundos e em cada ensaio eram realizados cinco ciclos.

A primeira curva a ser levantada foi a curva de rigidez durante o resfriamento. Para isso, a mola foi aquecida e estabilizada em 80°C, de onde se iniciou o processo de resfriamento do atuador. A coleta de dados teve início a 70°C, sendo repetida em intervalos de 5°C até atingir a temperatura mínima de 25°C.

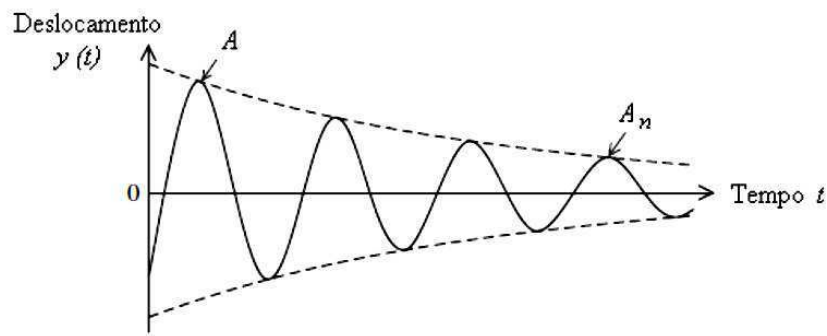
O mesmo método foi adotado para o aquecimento, partindo de 25°C até alcançar 80°C. Com isso buscou-se traçar a curva de rigidez experimental da mola de LMF para comparar com a rigidez teórica do modelo adotado.

Como um dos objetivos desse estudo é determinar a rigidez complexa de uma mola de LMF, fez-se necessário que o amortecimento do atuador fosse encontrado para cada uma das temperaturas escolhidas anteriormente no teste de rigidez, visto que as propriedades de amortecimento também se alteram quando há variação na temperatura da LMF.

Para calcular o fator de amortecimento equivalente ζ_{eq} foi feita uma análise da resposta do sistema em vibração livre a uma entrada do tipo impulso dada através de um martelo de impacto *PCB Piezotronics*, modelo 086C03. A partir dessa excitação foi possível traçar a curva envoltória de natureza exponencial que envolve o sinal e caracteriza o decaimento dos deslocamentos com o tempo. Para isso utilizou-se o método do decremento logarítmico, calculando a razão entre duas amplitudes escolhidas do sinal. A expressão decremento logarítmico refere-se à taxa de redução logarítmica, relacionada com a redução do movimento ao longo do tempo, pois a energia é transferida para outras partes do sistema ou é absorvida pelo próprio elemento.

Quando um sistema oscilatório com um grau de liberdade (1 GDL), com amortecimento viscoso é excitado por um impulso sua resposta vem na forma de decaimento no tempo (Fig. 36):

Figura 36 – Resposta ao impulso para um sistema de 1 GDL em vibração livre.



Fonte: (SILVA, 2007).

Estudos anteriores (AQUINO, 2011; JUÁN, LÓ, 2011), mostram que o fator de amortecimento para LMF geralmente é menor do que 0,1. Neste caso a equação para cálculo do fator de amortecimento pelo método do decremento logarítmico pode ser simplificada e ser utilizada na forma da Eq. (29):

$$\zeta = -\frac{1}{2\pi n} \ln\left(\frac{A_n}{A_1}\right) \quad (29)$$

Onde:

n: número de períodos;

A_1 : amplitude do primeiro ciclo;

A_n : Amplitude o n-ésimo ciclo;

Com o valor do fator de amortecimento pode-se encontrar a constante de amortecimento viscoso a partir da relação:

$$c = 2m\omega_n\zeta \quad (30)$$

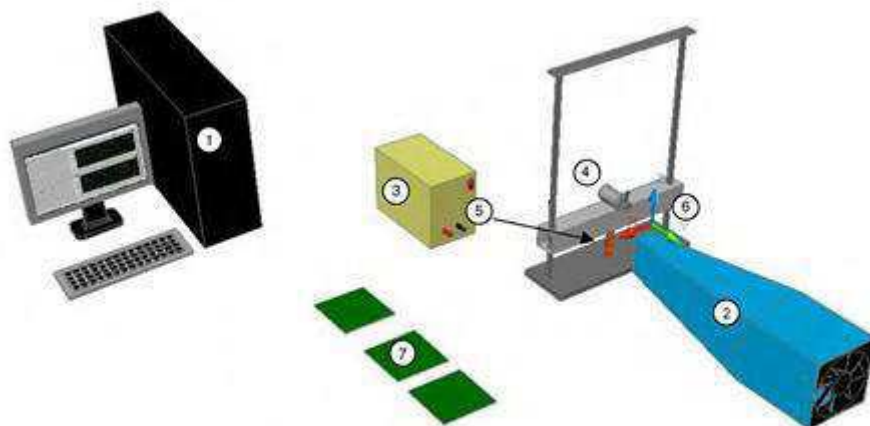
Neste estudo foram coletadas curvas de resposta ao impulso para cada temperatura analisada (25°C a 70°C) e aplicado o método do decremento logarítmico para cálculo do fator de amortecimento viscoso, a partir da curva exponencial que caracteriza o decaimento do sinal com tempo.

3.3 Instrumentação e Montagem Experimental

O dispositivo experimental adotado foi desenvolvido por Aquino (2011) e consiste em um sistema massa-mola de um grau de liberdade, excitado por um motor desbalanceado que está fixado em uma barra de alumínio fixada na mola de LMF. O sistema é guiado através de duas hastes montada à massa através de dois rolamentos lineares de esferas.

A Fig. 37 ilustra um esquema da montagem do sistema mecânico adotado. Já a Tab. 3 apresenta os componentes utilizados na construção do dispositivo especificando as características relevantes a essa investigação.

Figura 37 – Esquema da Bancada Experimental.



Fonte: (AQUINO, 2011, adaptado).

- | | |
|-----------------------|---------------------------|
| 1. Computador; | 5. Mola de LMF; |
| 2. Cooler; | 6. Barra de alumínio; |
| 3. Fonte de corrente; | 7. Circuitos eletrônicos. |
| 4. Motor; | |

Tabela 3 – Componentes do dispositivo experimental.

| Componentes | Massa (kg) |
|---------------------|-------------------|
| Barra de alumínio | 0,238 |
| Parafusos | 0,031 |
| Motor elétrico | 0,193 |
| Fixador do motor | 0,0378 |
| Massa desbalanceada | 0,006 |

Fonte: Autoria própria.

Para avaliar o comportamento da rigidez e do amortecimento e sua influência nas respostas estruturais do dispositivo mecânico adotado foi necessário desenvolver um sistema de controle que permitisse variar a temperatura da mola até uma referência imposta pelo usuário e que mantivesse essa temperatura o mais constante possível durante o tempo de experimento.

Nesse sentido, foi utilizado o sistema de controle desenvolvido por Aquino (2011), baseado em lógica fuzzy que controla o aquecimento e o resfriamento da mola.

Uma vez que o usuário indica a temperatura desejada para a mola (referência), o programa de controle realiza a leitura da temperatura atual da mola (real) e calcula o sinal de controle necessário para que se alcance a temperatura de referência. O monitoramento da temperatura real da mola e da temperatura de referência foi feito em tempo real, através do programa de controle da temperatura.

Para a medição da temperatura da mola utilizou-se um termopar de fio fino tipo K com 300 μm de diâmetro e junta exposta, soldada por resistência. O sinal do termopar passa por um amplificador de carga antes de ser lido pelo sistema de aquisição de dados instalado.

O aquecimento da mola de LMF se deu por efeito Joule. Para geração da corrente elétrica usou-se uma fonte que fornece uma corrente elétrica com amplitude de até 20 ampères. Para elevar a temperatura da mola basta aumentar a passagem de corrente na mola. Para evitar a fuga de corrente elétrica para o sistema, a mola foi rosqueada em fusos de nylon que é isolante elétrico.

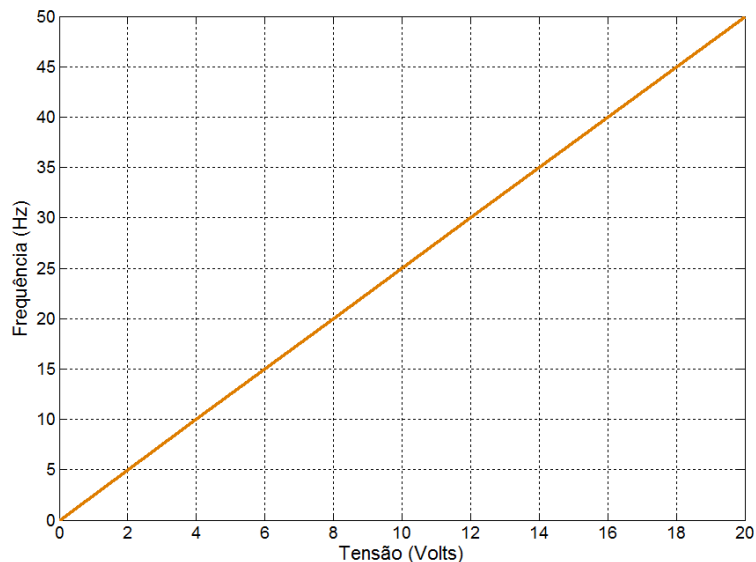
Por outro lado, o resfriamento da mola de LMF foi realizado por convecção forçada a partir de um cooler e uma estrutura auxiliar que direciona o ar até a mola. O

controle do fluxo de ar foi feito através da variação da tensão elétrica fornecida ao motor do cooler.

Ambos os sistemas de alimentação de corrente passam por um circuito de amplificação ligado a uma placa USB 6008 da National Instruments®.

A força excitadora do sistema foi gerada pelo motor desbalanceado acoplado a massa do sistema. O motor com desbalanceamento rotativo é responsável pela variação da frequência de excitação transmitida ao sistema a partir do fornecimento de tensão elétrica. O motor utilizado pode ser alimentado até uma tensão de 24 volts. A Fig. 38 mostra a evolução da frequência de excitação do motor em função da tensão de alimentação

Figura 38 – Relação entre tensão e frequência de excitação do motor.



Fonte: Autoria própria.

Juntamente com o programa de controle de temperatura encontra-se o sistema de aquisição de dados responsável pela leitura das respostas estruturais do dispositivo adotado. Essa aquisição é feita via acelerômetro (PCB 352B10 da Piezotronics) e interpretada por um programa desenvolvido em ambiente LabVIEW®.

Com o dispositivo operante e o sistema de instrumentação e coleta de dados funcionando foram realizados os seguintes procedimentos experimentais para estudo da resposta estrutural.

Inicialmente, foi verificada a influência da temperatura na resposta em frequência, para isso o sistema foi colocado em ressonância e logo em seguida a mola foi submetida a um aquecimento para variação da rigidez.

Posteriormente, o sistema foi colocado em ressonância para cada uma das temperaturas consideradas no ensaio de rigidez. Dessa forma, foi possível avaliar a influência da variação de rigidez na frequência natural e do amortecimento nos níveis de amplitude.

Em outro momento, o sistema foi colocado em ressonância na temperatura mais baixa ($T=25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega_n=11\text{ Hz}$) e aquecido para que a frequência natural fosse alterada e a ressonância deslocada. O mesmo foi feito para a temperatura mais alta ($T=70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega_n=12,9\text{ Hz}$), sendo que a mola foi resfriada para alteração da rigidez.

A coleta das curvas de resposta no tempo e na frequência foi feita via LabVIEW® e armazenadas como um arquivo de banco de dados do Matlab®. O número de pontos das curvas varia de acordo com o tamanho da janela de tempo do experimento.

De posse desses dados experimentais foi possível traçar as curvas características dessas propriedades mecânicas, além de embasar a modelagem do comportamento da rigidez complexa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

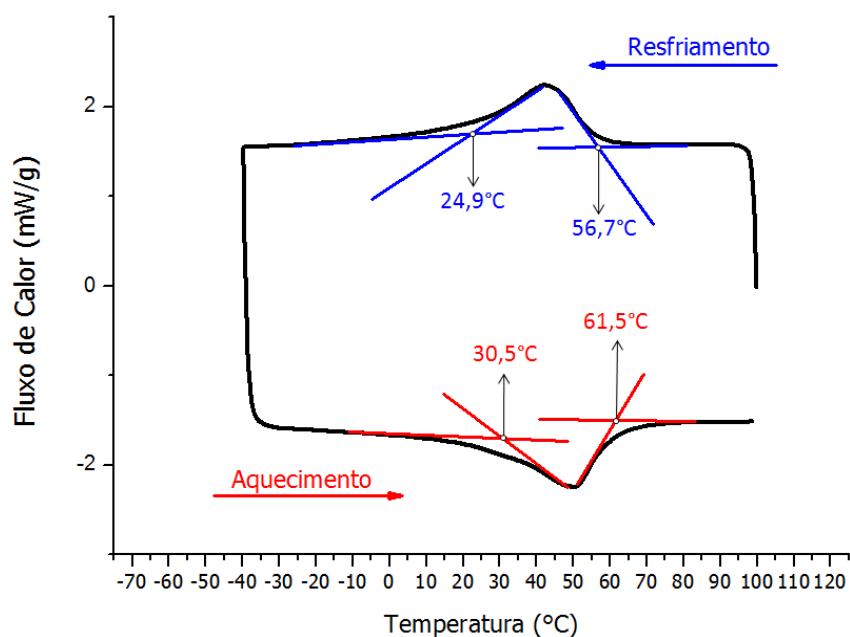
4.1 Caracterização Termomecânica do Fio de LMF

Antes do processo de fabricação da mola foram realizados alguns experimentos visando caracterizar termomecanicamente o fio de LMF do qual será fabricado o atuador. A determinação das temperaturas de transformação e a análise do comportamento dinâmico devem ser realizadas em amostras com tamanho reduzido, devido a limitações dos próprios equipamentos.

Para determinar as temperaturas de transformação foi utilizado o método de calorimetria diferencial de varredura, em que uma amostra de 0.0065 gramas foi retirada da mola e levada para o DSC.

A Fig. 39 mostra o gráfico de DSC em função temperatura para amostra. A determinação das temperaturas características foi feita a partir do método das tangentes aplicados aos picos de transformação, definido pelas normas internacionais F2004 (ASTM, 2005a), F2005 (ASTM, 2005b) e F2082 (ASTM, 2006).

Figura 39 – Temperaturas de transformação obtidas por DSC.

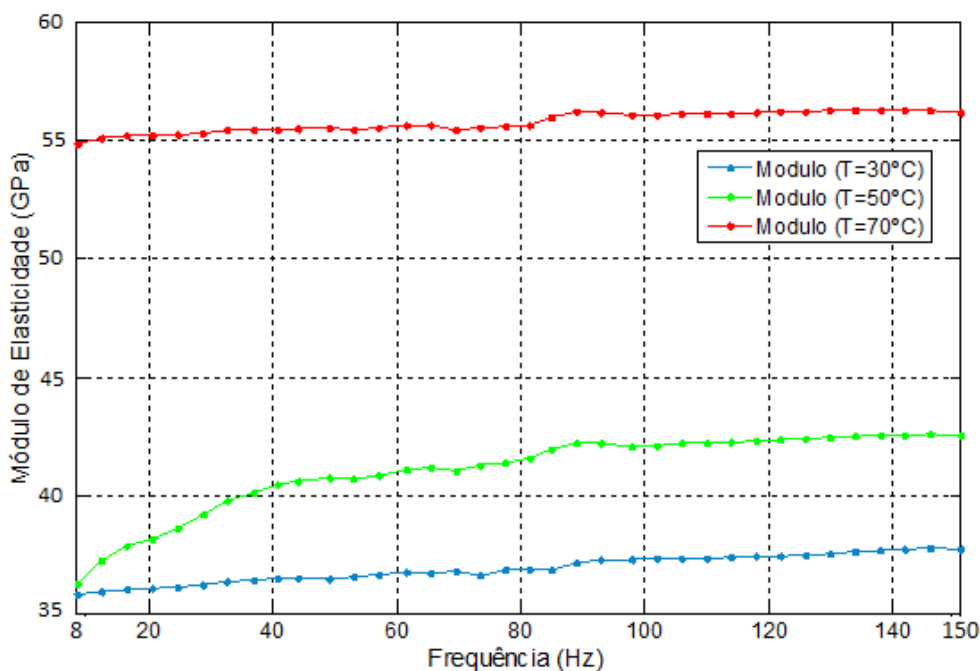


Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Fig. 38 verifica-se que as temperaturas de transformação da fase fria são $M_s=56,7^\circ\text{C}$ (temperatura de início da transformação martensítica) e $M_f=24,9^\circ\text{C}$ (temperatura final da transformação martensítica) e para a transformação inversa tem-se $A_s=30,5^\circ\text{C}$ (temperatura de início da transformação austenítica) e $A_f=61,5^\circ\text{C}$ (temperatura final da transformação austenítica). Imediatamente, percebe-se que essa LMF NiTi apresenta uma baixa histerese térmica, que pode ser quantificada pela diferença entre o valor do pico da transformação inversa ($A_p=50,4^\circ\text{C}$) e o valor do pico da transformação martensítica ($M_p=42,4^\circ\text{C}$), resultando numa histerese $H=8^\circ\text{C}$. Essa baixa histerese pode melhorar o tempo de resposta da mola quando submetida à variação de temperatura na operação do sistema.

Para análise do comportamento dinâmico do material, foi separada uma amostra de aproximadamente 30 mm de comprimento do fio para ser ensaiada no Analisador Dinâmico-Mecânico (DMA) para três temperaturas (30°C , 50°C e 70°C) que representam as regiões onde ocorrem mudanças mais acentuadas nessa LMF. Os resultados dos ensaios realizados com a amostra 2 do fio de LMF são mostrados nas Figs. 40 e 41. Os resultados mais detalhados se encontram tabelados no Apêndice A.

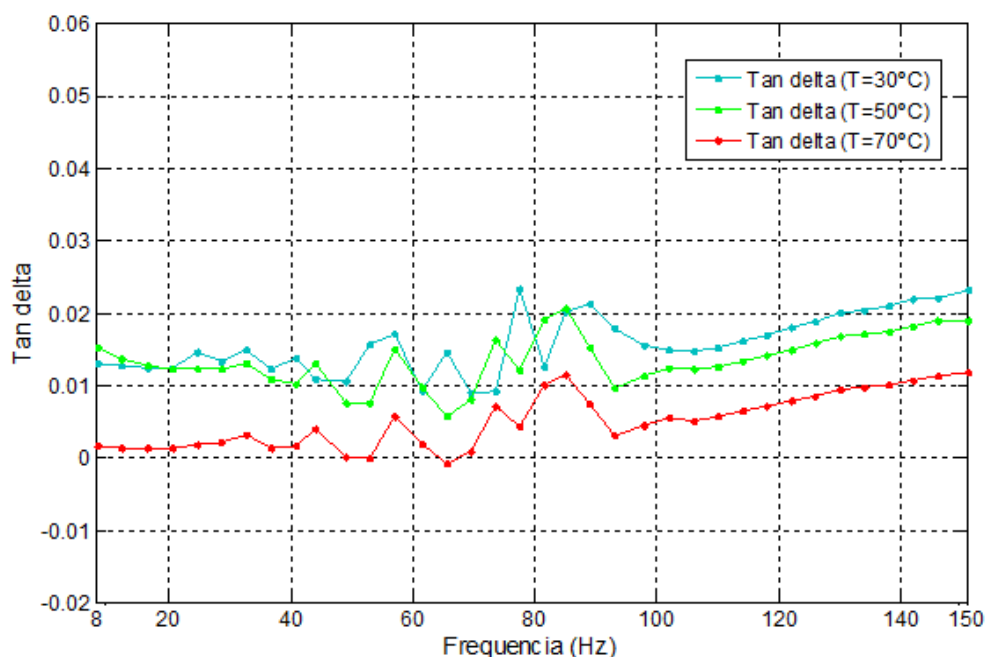
Figura 40 – Módulo de elasticidade em função da frequência para 30°C , 50°C e 70°C .



Fonte: Autoria própria.

A resposta do módulo de elasticidade às variações de temperatura foi a esperada para LMF. Observa-se que com o aumento das temperaturas do material o módulo de elasticidade aumentou significativamente, apresentando valores da ordem de 37 GPa (30°C), 42 GPa (50°C) e 56 GPa (70°C) tomando 100 Hz como a frequência de referência. No que diz respeito ao comportamento em função da frequência, observou-se que ocorreram pequenas variações durante o ensaio, com tendência de estabilização acima de 100 Hz.

Figura 41 – Fator de Perda em função da frequência para 30°C, 50°C e 70°C.

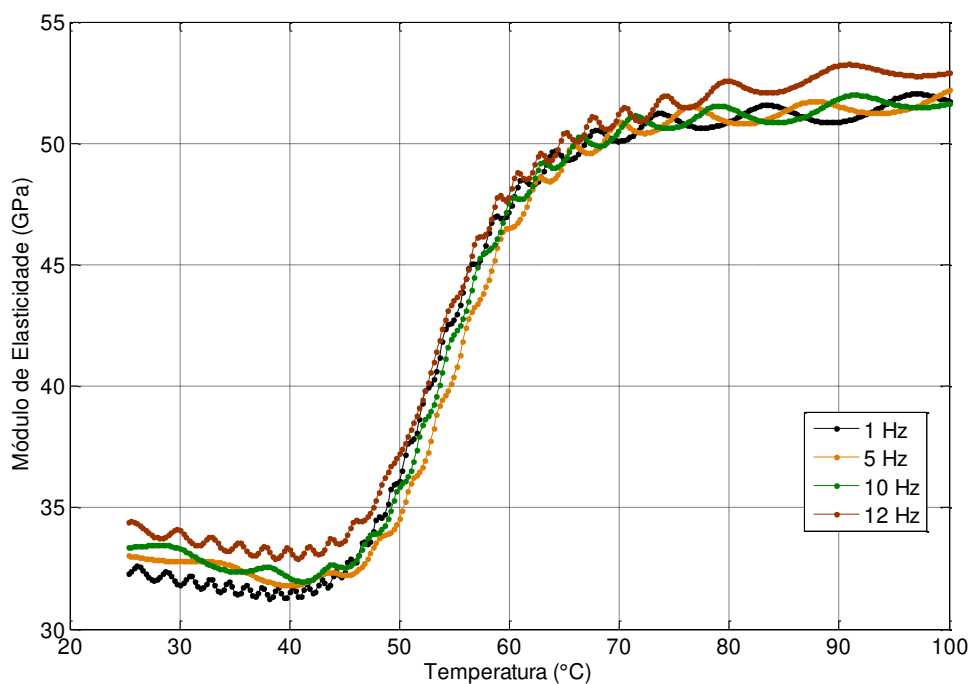


Fonte: Autoria própria.

Analisando o comportamento do fator de perda observou-se o inverso do comportamento do módulo elástico. Houve uma redução nos valores medidos com o aumento da temperatura. Como já discutido anteriormente, o amortecimento na fase austenítica é menor do que os valores encontrados nas fases R e martensítica. As temperaturas dos ensaios foram escolhidas exatamente para garantir que cada uma das fases cristalinas (martensita e austenita) seja avaliada. Já a variação do fator de perda em função da frequência também foi pequena em boa parte do ensaio, com tendência de aumento para frequências acima de 100 Hz.

O segundo ensaio realizado no DMA foi uma varredura de temperatura para quatro frequências diferentes (1 Hz, 5 Hz, 10 Hz e 12 Hz), conforme já explicado na metodologia. As Figs. 42 e 43 mostram as curvas obtidas na análise dinâmico-mecânica. Os resultados de forma mais detalhada se encontram tabelados no Apêndice B.

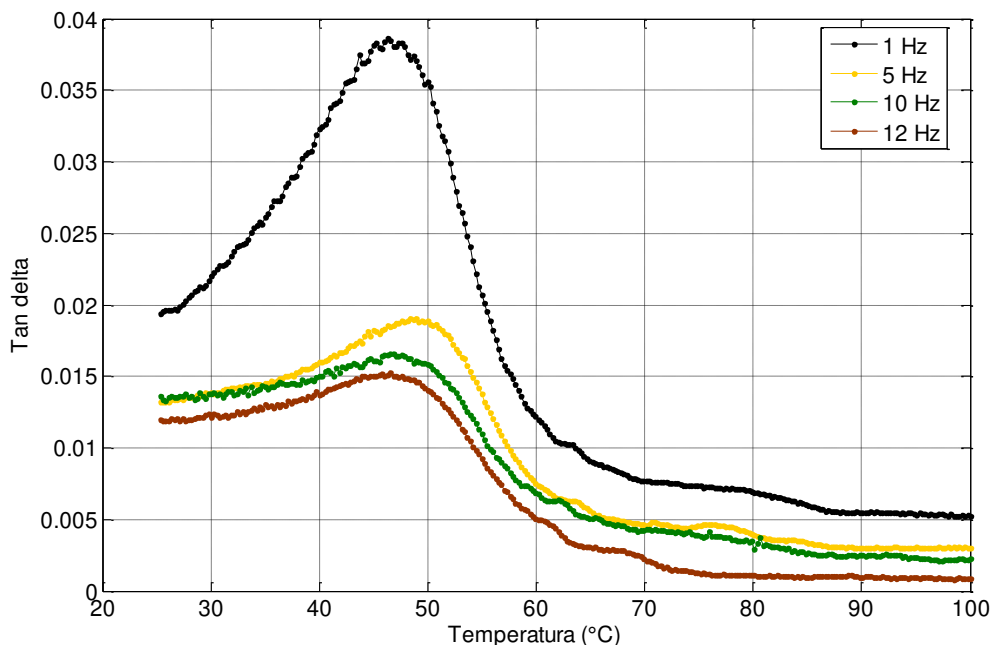
Figura 42 – Comportamento do módulo elástico com a modificação da frequência de excitação na amostra 2.



Fonte: Autoria própria.

As curvas dos módulos elásticos não sofreram muita influência com as variações de frequências sendo mais dependentes das temperaturas de ensaio. Pela Fig. 41 percebe-se um aumento considerável no módulo em todas as frequências ao longo da transformação de fase. O aumento do módulo elástico com a temperatura indica um acréscimo na rigidez do material, resultando em uma menor dissipação de energia pela estrutura em altas temperaturas. Essa variação do módulo está relacionada a movimentos internos na estrutura do material, apresentando rigidez inferior na fase martensítica se comparada à fase austenítica (OTSUKA; WAYMAN, 1998). A Fig. 43 mostra os resultados para o fator de perda.

Figura 43 – Comportamento do fator de perda com a modificação da frequência de excitação na amostra 2.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que os maiores picos do fator de perda ocorrem durante a transformação de fase e para o menor valor de frequência (1 Hz). Frequências de excitação mais elevadas tendem a inibir o pico de $\text{Tan } \delta$, tanto que para excitações maiores que 5 Hz os picos são bem reduzidos e decrescem rapidamente

4.2 Caracterização Termomecânica da Mola de LMF

Conhecendo as temperaturas de transformação de fase é possível escolher o intervalo de temperatura do ensaio para determinação da rigidez da mola, visto que se pretende determinar a rigidez para o estado martensítico e acompanhar a evolução da propriedade até que a estrutura cristalina mude para austenita.

Baseando-se nas temperaturas da Fig. 39 e considerando as limitações no controle de temperatura da máquina universal de ensaios eletromecânica Instron®, optou-se por ensaiar a mola no intervalo de temperatura de 25°C até 70°C com incrementos de 5°C. A limitação na temperatura relatada anteriormente, diz respeito à insuficiência da câmara térmica da máquina em reduzir a temperatura abaixo da

ambiente. Para que isso ocorresse, seria necessário resfriar forçadamente a mola de LMF o que não garantiria uma distribuição adequada da temperatura, gerando um dado não confiável.

A mola foi submetida a cinco ciclos, cada ciclo composto por compressão e descompressão de 10 mm, em cada temperatura de medição. A Tab. 4 mostra os valores de rigidez no aquecimento e no resfriamento para cada temperatura considerada.

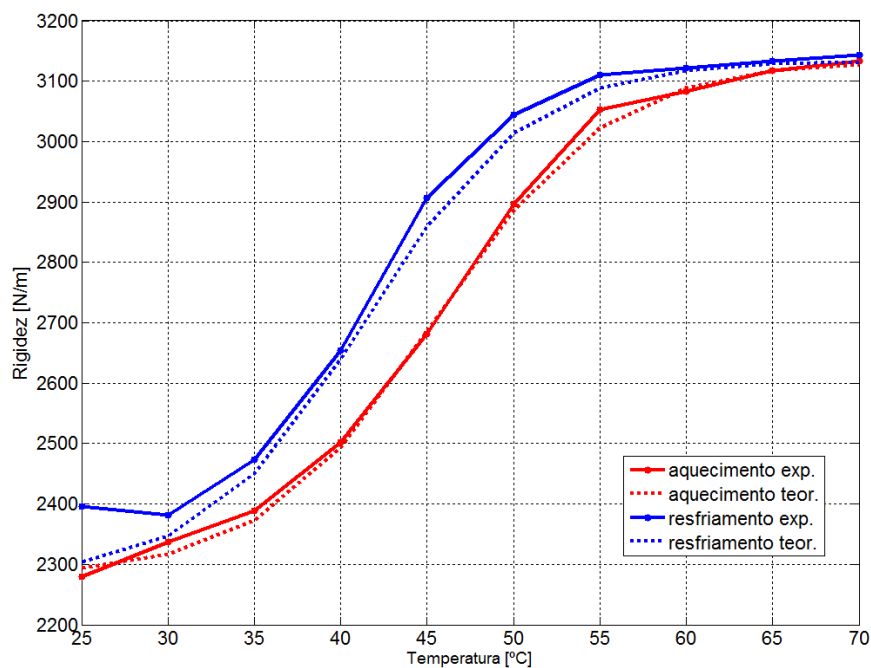
Tabela 4 – Rigidez experimental da mola.

| Temperatura (°C) | Rigidez (N/m) | |
|------------------|---------------|--------------|
| | Aquecimento | Resfriamento |
| 25 | 2280,3 | 2396,3 |
| 30 | 2337,1 | 2382,5 |
| 35 | 2388,6 | 2474,8 |
| 40 | 2502,6 | 2654,1 |
| 45 | 2701,6 | 2907,4 |
| 50 | 2897,2 | 3044,7 |
| 55 | 3053,8 | 3110,3 |
| 60 | 3083,1 | 3128,4 |
| 65 | 3117,4 | 3137,6 |
| 70 | 3134,5 | 3144,4 |

Fonte: Autoria própria.

A Fig. 44 mostra os valores teóricos e experimentais num mesmo gráfico para fins de análise e validação do modelo teórico adotado (Eqs. 27 e 28).

Figura 44 – Curvas de rigidez teórica e experimental da mola de LMF NiTi.



Fonte: Autoria própria.

A partir dessas curvas observa-se que a rigidez aumentou 1,37 vezes no final do aquecimento quando comparada com o valor inicial, bem como é possível perceber que acima de 60°C a rigidez tende a se estabilizar, pois a partir desse ponto a estrutura cristalina é completamente austenítica. Pode se prever comportamento semelhante de estabilização para a rigidez, nas temperaturas abaixo dos 25°C quando a liga for 100 % martensita.

Os resultados experimentais estão coerentes com o modelo teórico adotado. Variações mais acentuadas, como as encontradas em 25°C e 30°C, podem ter acontecido em virtude de imprecisões do sistema de instrumentação e inércia térmica da mola e do termopar utilizado.

Comparando-se a Fig. 44 com a Fig. 42 observa-se um comportamento semelhante de ambas as curvas. Isso mostra que o módulo elástico do fio e a rigidez da mola se comportam de maneira bastante similar a partir de um carregamento térmico.

4.3 Respostas de Vibração Livre do Sistema com Mola de LMF

Para essa etapa, o sistema massa-mola foi submetido a carregamentos do tipo impulsivo com o uso de um martelo de impacto e a partir daí foram coletados as respostas em termos de deslocamentos ao longo do tempo. A Fig. 45 mostra uma foto da bancada experimental, com instrumentação e martelo de impacto utilizado.

Figura 45 – Bancada experimental montada e martelo de impacto.

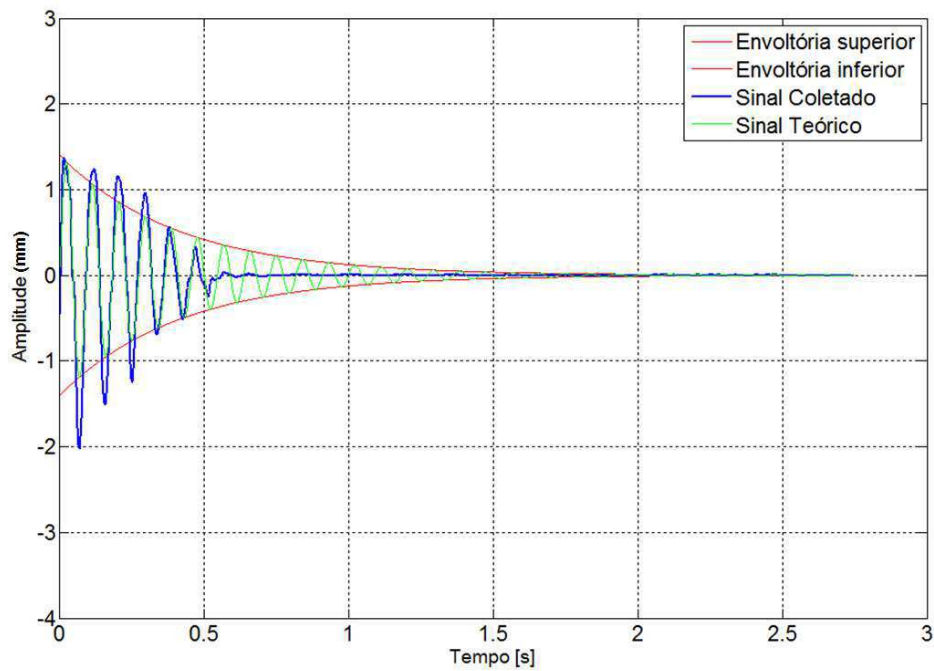


Fonte: Aatoria Própria.

Em uma condição de vibração livre, o sistema volta ao repouso mais rápido em um sistema com amortecimento maior, se comparado com outro sistema de amortecimento menor.

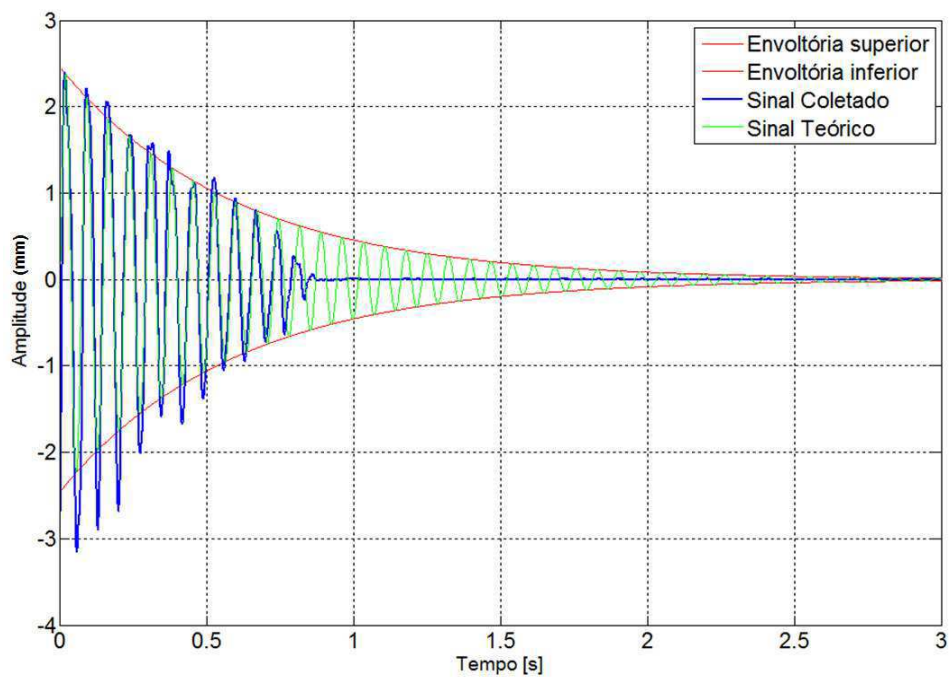
As Figs. 46 e 47 mostram o decaimento exponencial da resposta do sistema para a mola de LMF em duas condições: fria (25°C) e quente (70°C), respectivamente.

Figura 46 – Resposta ao impulso a 25°C.



Fonte: Autoria própria.

Figura 47 – Resposta ao impulso a 70°C

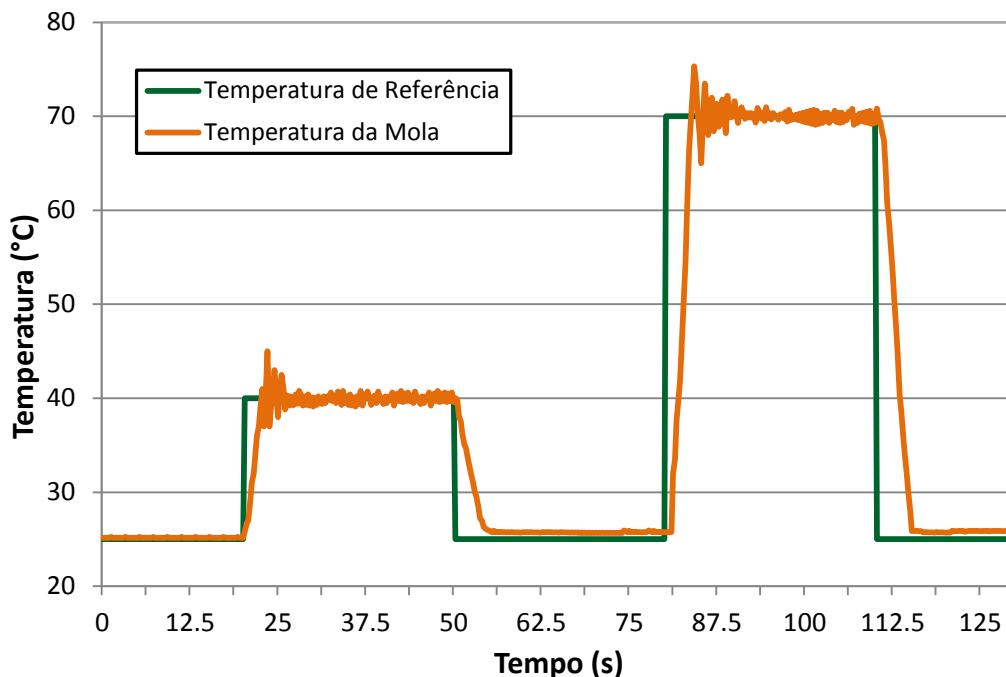


Fonte: Autoria própria.

Para melhorar a análise da influência do amortecimento junto com a rigidez, faz-se necessário que sejam determinados os fatores de amortecimento equivalente para as mesmas temperaturas consideradas anteriormente no ensaio de

rigidez. Para isso o sistema de controle de temperatura, desenvolvido por Aquino (2011), irá atuar aquecendo e resfriando a mola de acordo com a ação de controle necessária para mantê-la mais próxima da temperatura de referência imposta pelo operador. A Fig. 48 mostra a atuação do sistema de controle com a estabilização da temperatura da mola.

Figura 48 – Atuação do sistema de controle de temperatura.



Fonte: Autoria própria.

A coleta foi feita para as mesmas temperaturas usadas no ensaio de rigidez e o cálculo da curva exponencial que envolve o decaimento do sinal amortecido foi feito utilizando o método do decremento logarítmico.

O amortecimento que a mola de LMF transfere ao sistema varia de acordo com a temperatura. Para 25°C o fator de amortecimento ζ_{eq} encontrado foi de 0,0303, enquanto que para a mola a 70°C foi obtido um fator de 0,0194. Na Fig. 47 o amortecimento da mola é maior, logo o decaimento dos deslocamentos é mais rápido do que o encontrado na Fig. 48. Porém, o sinal experimental não segue exatamente a curva da envoltória teórica. Depois de várias aquisições e análises das respostas no tempo foi possível concluir que o atrito entre as hastes e as guias do dispositivo estava influenciando na medição do amortecimento. Por esse motivo, a curva experimental é

interrompida antes do final da envoltória, pois o amortecimento ao qual o sistema está exposto não está livre de interferências externas.

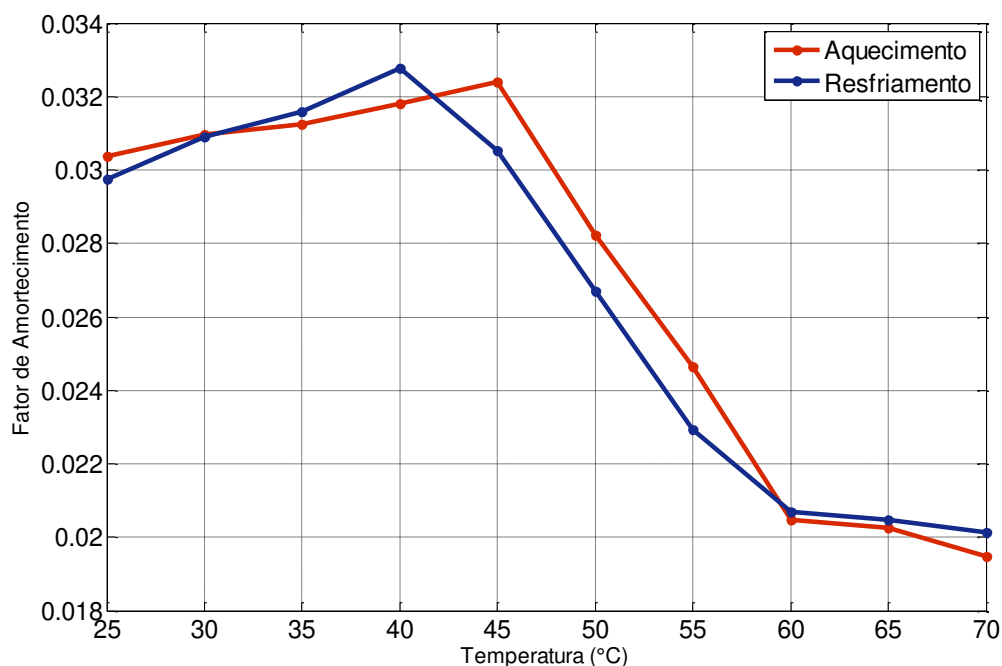
Após as aquisições impulsionais para a mesma escala de temperaturas usadas no ensaio de rigidez foi possível montar a Tab. 5 e a Fig. 49 com os valores do fator de amortecimento do sistema.

Tabela 5 – Amortecimento do sistema em função da temperatura.

| Temperatura (°C) | Fator de Amortecimento ζ_{eq} | |
|------------------|-------------------------------------|--------------|
| | Aquecimento | Resfriamento |
| 25 | 0,03037 | 0,02976 |
| 30 | 0,03096 | 0,03091 |
| 35 | 0,03124 | 0,03158 |
| 40 | 0,03179 | 0,03277 |
| 45 | 0,03241 | 0,03054 |
| 50 | 0,02823 | 0,02669 |
| 55 | 0,02465 | 0,02293 |
| 60 | 0,02048 | 0,02069 |
| 65 | 0,02027 | 0,02047 |
| 70 | 0,01947 | 0,02013 |

Fonte: Autoria própria.

Figura 49 – Variação do fator de amortecimento em função da temperatura.



Fonte: Autoria própria.

Analisando as curvas da Fig. 49, nota-se que os picos de amortecimento podem ser observados durante a transformação de fase, no intervalo entre 40°C e 45°C. Nesses pontos o fator de amortecimento medido foram 0,03277 e 0,03241, respectivamente. O mínimo amortecimento foi encontrado na fase austenítica (70°C), com valor igual a 0,01947. Já na fase martensítica o maior fator medido foi de 0,03037.

O comportamento do amortecimento na Fig. 49 foi semelhante ao comportamento do $\text{Tan } \delta$ do fio de LMF medido no DMA para as frequências próximas a frequência de operação do dispositivo (10 Hz e 12 Hz), como mostrado na Fig. 43.

O pico de amortecimento encontrado durante a transformação de fase é observado principalmente devido ao caráter transitório dessa região, que está relacionado à acomodação das placas de martensita-austenita durante a transformação induzida termicamente. Vale ressaltar que o amortecimento medido é maior durante a variação de temperatura, onde sofreria influência dos efeitos cinéticos da transformação de fase.

Comparando os valores obtidos da Tab. 5, aqui reforçados com as respectivas constantes de amortecimento (Tab. 6), nota-se que esses se aproximam dos resultados experimentais encontrados por Aquino (2011) e por Juan e Nó (2003).

Tabela 6 – Constantes de amortecimento viscoso.

| Temperatura | Fator de Amortecimento ζ_{eq} | Constante de amortecimento viscoso (N.s/m) |
|-------------|-------------------------------------|--|
| 25 | 0,03037 | 2,058 |
| 30 | 0,03096 | 2,124 |
| 35 | 0,03124 | 2,166 |
| 40 | 0,03179 | 2,256 |
| 45 | 0,03241 | 2,390 |
| 50 | 0,02823 | 2,156 |
| 55 | 0,02465 | 1,933 |
| 60 | 0,02048 | 1,613 |
| 65 | 0,02027 | 1,606 |
| 70 | 0,01947 | 1,547 |

Fonte: Autoria própria.

4.4 Respostas do Sistema sob Excitação Harmônica

Analisando as respostas estruturais no domínio do tempo e da frequência é possível acompanhar o comportamento do sistema e entender melhor como as variações de parâmetros do atuador de LMF interferem nas respostas clássicas desse tipo de modelo mecânico. Para isso foi feita uma simulação numérica da resposta dinâmica do sistema adotado, utilizando uma rotina em Matlab® que se baseia na fundamentação teórica anteriormente apresentada e nos parâmetros de projeto do dispositivo para gerar as curvas de resposta.

Os dados de rigidez e amortecimento foram extraídos dos resultados experimentais mostrados anteriormente (Tabs. 4 e 6), respeitando as temperaturas consideradas. A Tab. 7 mostra os parâmetros utilizados nessa simulação.

Tabela 7 – Dados utilizados na simulação

| Parâmetro | Valor |
|--------------------------------------|--------------|
| Massa do sistema (kg) | 0,4998 |
| Massa desbalanceada (kg) | 0,006 |
| Excentricidade (m) | 0,033 |
| Rigidez da Mola a 25°C (N/m) | 2280,3 |
| Rigidez da Mola a 70°C (N/m) | 3134,5 |
| Amortecimento da Mola a 25°C (N.s/m) | 2,058 |
| Amortecimento da Mola a 70°C (N.s/m) | 1,547 |

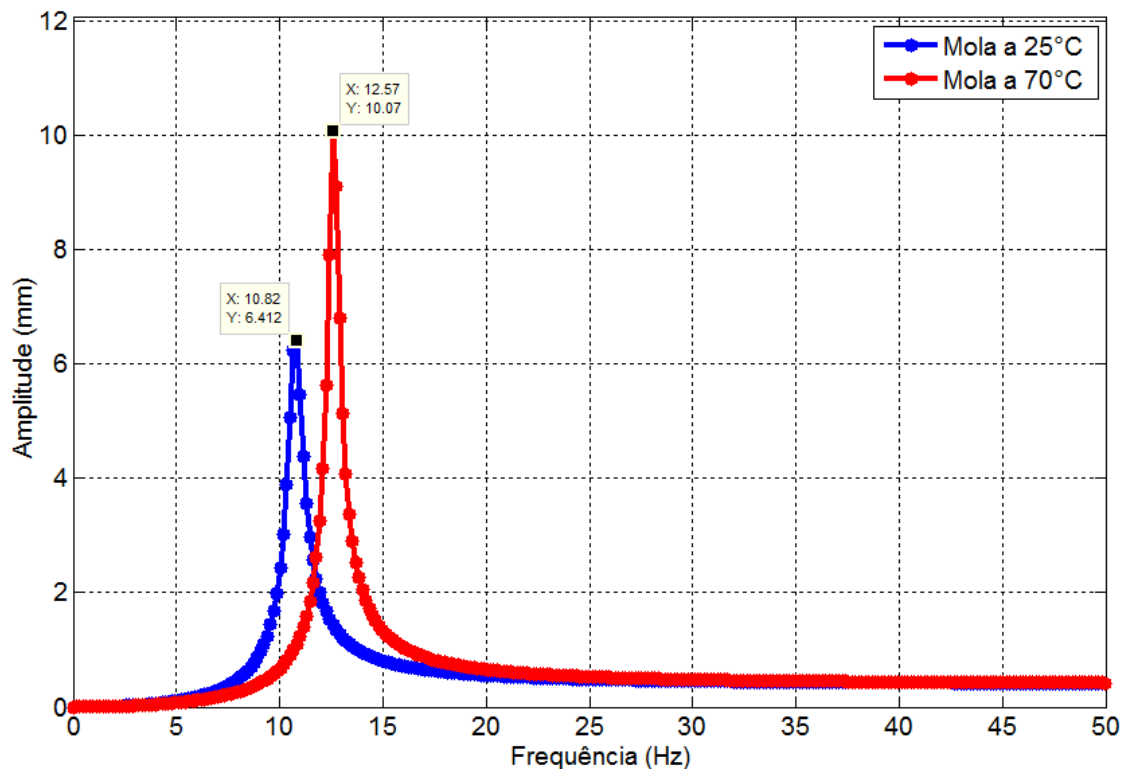
Fonte: Autoria própria.

A simulação numérica também permite prever com maior confiabilidade os resultados experimentais do sistema, como frequências naturais e amplitudes de vibração, aprimorando assim a rotina de ensaios. Além disso, também é uma ferramenta eficaz para corroboração dos testes experimentais, a partir da comparação dos resultados das duas metodologias.

Para tanto foi empregada a Eq. (7) que descreve a resposta em frequência à ação de um desbalanceamento rotativo, apresentada no Capítulo 2, juntamente com as especificações de projeto da bancada experimental, como: massa desbalanceada, excentricidade imposta, massa do sistema, rigidez e amortecimento para simular as curvas de resposta em frequência para a mola nas fases martensítica (25°C) e austenítica (70°C).

A Fig. 50 mostra o resultado dessa simulação para as duas condições analisadas: para a mola na fase martensítica (25°C) e para a mola na fase austenítica (70°C).

Figura 50 – Simulação computacional da Função de Resposta em Frequência (FRF) do sistema com mola LMF.



Fonte: Autoria própria

Para a mola na fase martensítica (linha azul), a frequência de ressonância foi de aproximadamente 10,8 Hz, parâmetro diretamente influenciado pela rigidez e amortecimento. Também foi observado o menor valor de amplitude de pico na faixa de ressonância, reflexo da maior capacidade de amortecimento da mola.

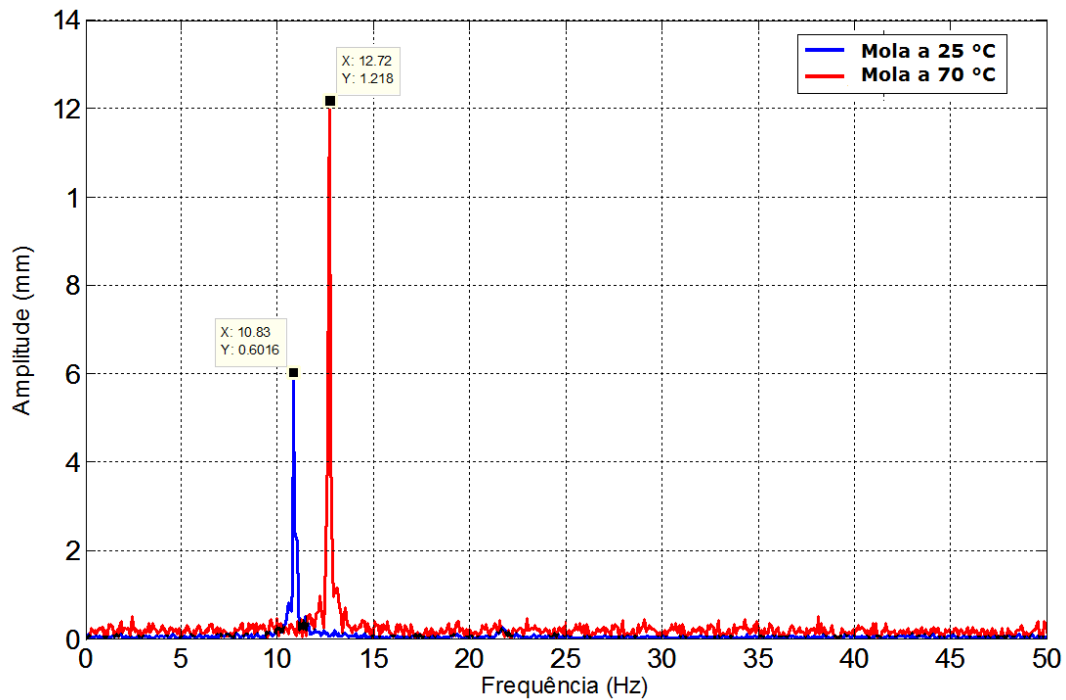
Aumentando a temperatura da simulação (linha vermelha), a rigidez da mola também aumenta e desloca a frequência natural para direita, aproximadamente 12,5 Hz. Na temperatura de 70°C o atuador se encontra completamente austenítico apresentando o menor amortecimento das LMF, o que resulta em amplitudes de vibração mais elevadas, aproximadamente duas vezes maior do que a amplitude de ressonância da fase martensítica quando o sistema se encontra em ressonância.

Portanto, percebe-se a influência que os parâmetros de rigidez e amortecimento exercem sobre as amplitudes de vibração e a resposta em frequência do sistema. Logo, essas respostas acabam variando de acordo com a temperatura da mola, uma vez que as variações nas propriedades mecânicas no atuador desse estudo são induzidas por carregamento térmico.

Para verificar como o sistema se comporta e validar a simulação foram realizadas várias rodadas de ensaios na bancada experimental, avaliando as respostas no domínio da frequência e a influência do carregamento térmico sobre as mesmas.

A Fig. 51 mostra duas dessas respostas em frequência do sistema coletada experimentalmente para a mola na fase martensítica e na fase austenítica.

Figura 51 – Curvas experimentais da resposta em frequência do sistema com mola LMF.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que quando a mola se encontra a 25°C o sistema apresentou uma frequência natural de 10,83 Hz e uma amplitude máxima de deslocamento de aproximadamente 6 mm. Nessa fase mais fria a mola apresenta uma rigidez menor do que as encontradas na fase austenítica, entretanto o fator de amortecimento aqui é maior. Como pode ser evidenciado, observando a amplitude máxima que o pico de ressonância da curva azul alcança.

A mola de LMF em análise apresenta a menor capacidade de amortecimento na fase austenítica, o que fica claro ao observar o aumento na amplitude máxima de deslocamento na ressonância que a curva vermelha apresenta. Nessa condição a mola estava a 70°C, completamente austenítica. Paralelamente, a rigidez também sofreu variação, apresentando um aumento quando comparada com a fase martensítica, o

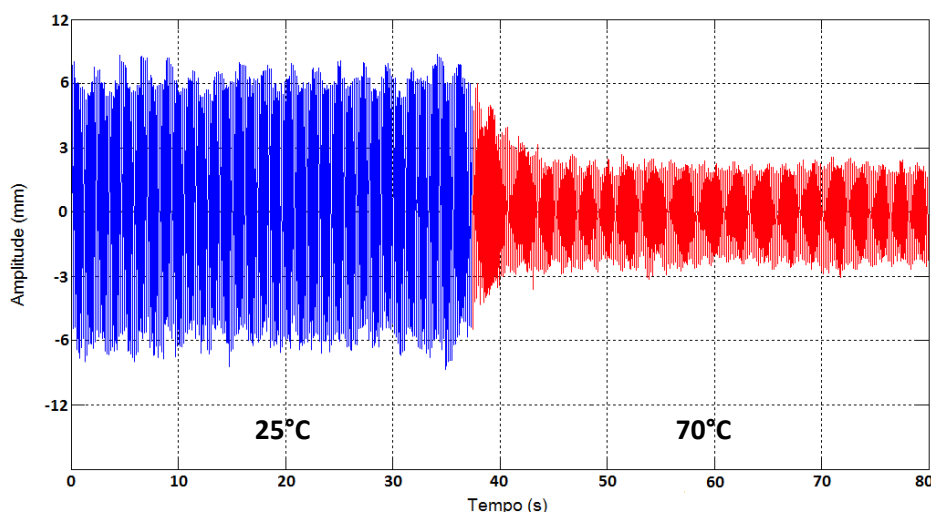
que fez com que a frequência natural do sistema ficasse em 12,7 Hz, deslocando a curva de ressonância para a direita.

Comparando os valores da simulação (Fig. 50) com os resultados encontrados experimentalmente (Fig. 51), se observa uma boa concordância entre as frequências naturais com erros da ordem de 0,09% e 1,1% para as ressonâncias das fases martensítica e austenítica, respectivamente. Além da frequência natural os picos de amplitude também apresentam uma boa concordância entre os dados simulados e as respostas experimentais.

4.5 Respostas do Sistema com Controle de Temperatura na Condição de Ressonância

No primeiro teste realizado a mola de LMF estava na fase martensítica, com a temperatura inicial de 25 °C (curva em azul) e frequência natural de 10,83 Hz. Dessa forma o motor foi alimentado com uma tensão constante que permitisse transmitir essa frequência de excitação durante todo o ensaio. A Fig. 52 mostra a resposta no tempo para essa condição de ensaio.

Figura 52 – Resposta do sistema a uma excitação na ressonância com variação de temperatura e a mola inicialmente na fase martensítica ($f_n=10,83$ Hz).



Fonte: Autoria própria.

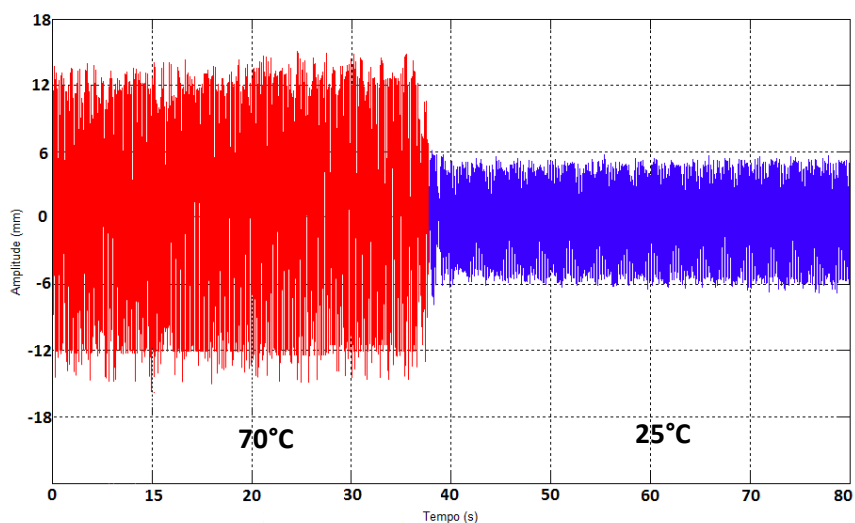
Na faixa azul da Fig. 52 a mola estava a temperatura ambiente de 25°C sem atuação do sistema de controle de temperatura. Percebe-se que nessa situação as

amplitudes de vibração alcançavam picos da ordem de 6 mm e o sistema encontra-se com uma capacidade de amortecimento elevada, o que reflete diretamente nos níveis de deslocamento medidos.

O início do aquecimento coincide com a faixa vermelha da Fig. 52. Nessa condição a amplitude máxima alcançada foi 2,7 mm. Comparando com a fase martensítica, tem-se uma redução de 55% nos níveis de deslocamento na zona de ressonância.

No segundo caso (Fig. 53), o sistema foi excitado na sua frequência natural (12,7 Hz) com a mola a 70°C (curva em vermelho). Após 35 segundos iniciou-se o resfriamento da mola até 25°C (curva em azul) para que o sistema deixe a ressonância e as amplitudes de vibração sejam reduzidas.

Figura 53 - Resposta do sistema a uma excitação na ressonância com variação de temperatura e a mola inicialmente na fase austenítica ($f_n=12,70$ Hz).



Fonte: Autoria própria.

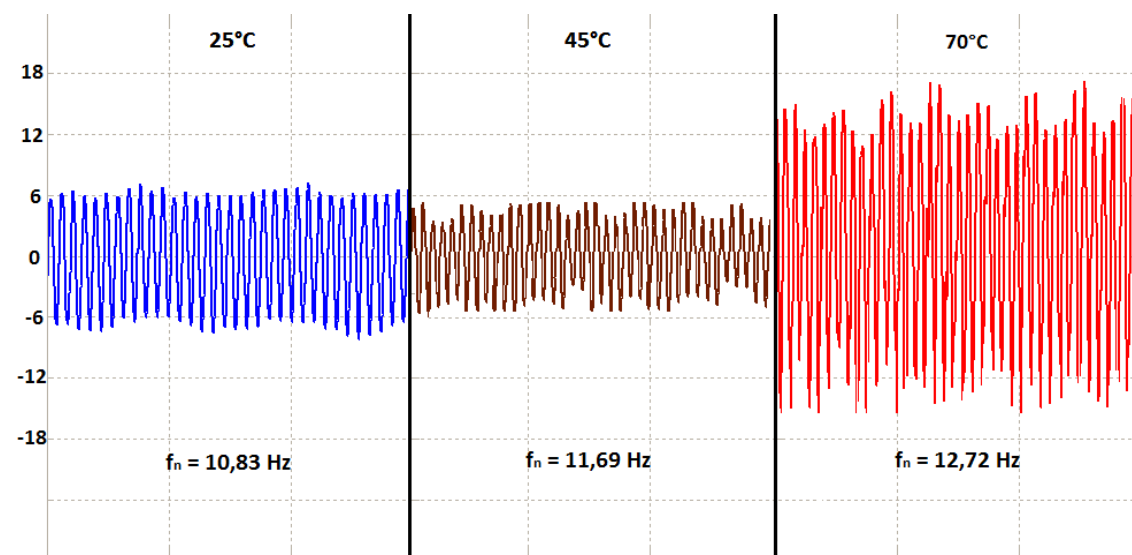
Nessa condição as amplitudes de vibração do sistema apresentaram valores de picos próximos a 12,18 mm quando a mola se encontra na fase austenítica (faixa vermelha da Fig. 53). Comparando os níveis de amplitude da fase martensítica na Fig. 52 com os níveis da fase austenítica da Fig. 53, percebe-se a influência que o amortecimento exerce no sistema. Observa-se que os deslocamentos passaram de 6 mm para 12,18 mm, na fase onde o fator de amortecimento é bem reduzido.

Passados 30 segundos a mola é resfriada para que o sistema possa sair da região de ressonância. A queda nos níveis de amplitude acontece, inicialmente, de forma mais discreta, pois a rigidez varia pouco no início do resfriamento, como mostrado na curva do comportamento da rigidez na Fig. 44. Assim que essa variação fica mais acentuada as amplitudes começam a cair e alcançam níveis de 5,6 mm.

Nesse segundo cenário de testes, as amplitudes de vibração foram reduzidas de 12,18 mm na fase austenítica para 4,9 mm na fase martensítica. Uma redução da ordem de 60%.

Na Fig. 54 pode-se visualizar de forma mais contundente os níveis de vibração encontrados quando o sistema é colocado em ressonância em três temperaturas diferentes.

Figura 54 – Resposta no tempo do sistema em ressonância em três temperaturas.



Fonte: Autoria Própria

Com o aumento da temperatura e variação do amortecimento do sistema as amplitudes se apresentam de forma bem peculiar. O amortecimento é alto na fase martensítica, apresenta um leve acréscimo na região de transformação de fase e é mínimo na austenita. Essa característica pode ser vista quando se analisa a amplitude de vibração nas zonas de ressonância. A menor amplitude é encontrada em 45°C, temperatura onde o amortecimento é máximo. Já a 70°C as amplitudes são bem superiores às medidas anteriormente, em virtude do baixo amortecimento que a mola

apresenta nessa faixa de temperatura. Essas curvas foram coletadas separadamente, colocando o sistema em ressonância para cada temperatura analisada.

Analisando o sistema na ressonância, quando $r=1$, a Eq. (5) assume a seguinte forma:

$$\eta = \frac{F_o/k}{X} \quad (31)$$

A partir das respostas no tempo do sistema em ressonância é possível construir a Tab. 8 que relaciona os valores do fator de perda η na ressonância, calculados a partir da Eq. (31), com os fatores de amortecimento mostrados na Tab. 5.

A Fig. 55 foi construída a partir da análise da Tab. 8 buscando verificar a relação entre o fator de perda e o fator de amortecimento, assumida como sendo $\eta = 2\zeta$. Essa relação só é válida quando o sistema mecânico se encontra em ressonância.

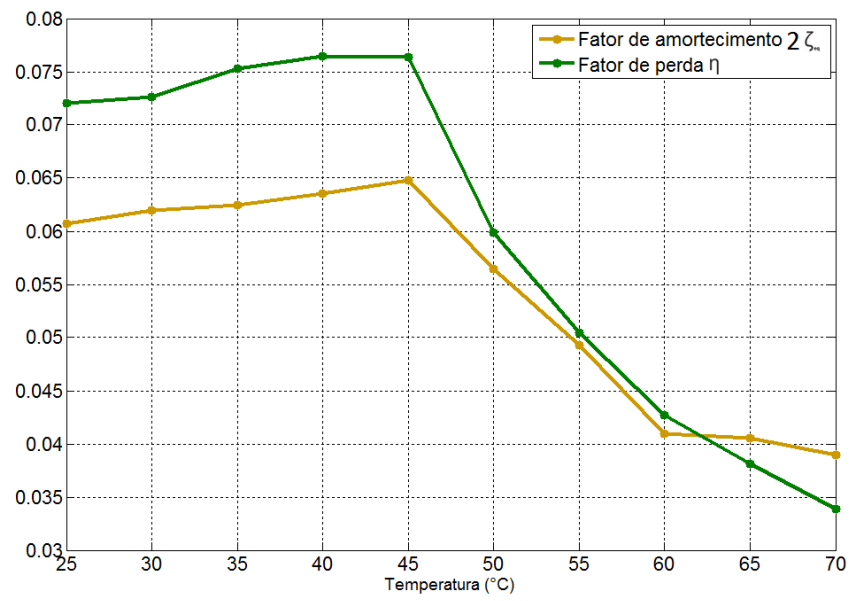
Tabela 8 – Relação entre o Fator de Amortecimento e o Fator de Perda na ressonância.

| Temperatura (°C) | Fator de Amortecimento $2\zeta_{eq}$ | Fator de Perda η |
|------------------|--------------------------------------|-----------------------|
| 25 | 0,06074 | 0,07204 |
| 30 | 0,06192 | 0,07265 |
| 35 | 0,06248 | 0,07529 |
| 40 | 0,06358 | 0,07643 |
| 45 | 0,06482 | 0,07635 |
| 50 | 0,05646 | 0,05988 |
| 55 | 0,0493 | 0,05043 |
| 60 | 0,04096 | 0,04268 |
| 65 | 0,04054 | 0,03810 |
| 70 | 0,03894 | 0,03385 |

Fonte: Autoria própria.

Analisando a Tab. 8 e as curvas da Fig. 55, observa-se uma boa concordância entre os dados, com erros variando de 2% a 12% na faixa de 25°C a 45°C, e praticamente coincidindo na temperatura de 55°C.

Figura 55 – Relação entre o Fator de Amortecimento e o Fator de Perda.



Fonte: Autoria própria.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Essa pesquisa abordou a fabricação e caracterização de um atuador de liga com memória de forma e a sua utilização como elemento atenuador de vibrações em um dispositivo massa-mola com um grau de liberdade sujeito a vibrações livres e sob excitação harmônica. As principais conclusões que podem ser destacadas a partir dos resultados obtidos são apresentadas a seguir:

- A determinação das temperaturas de transformação da LMF (NiTi) mostrou que a mesma se encontra na fase martensítica abaixo de 24,9°C e que acima de 61,2°C a liga se encontra na fase austenítica. Enquanto que na fase martensítica a rigidez é baixa e o amortecimento é mais elevado, na fase austenítica percebe-se o inverso. Estas variações são mais fortes durante a transformação de fase. Por isso, a faixa de temperatura escolhida para operação do sistema de controle foi a faixa entre 25°C e 70°C.
- Na análise dinâmico-mecânica (DMA), foi observado que o aumento da frequência de excitação do fio de LMF leva a um decaimento da capacidade de amortecimento, $\tan \delta$, muito devido à diminuição da mobilidade na estrutura cristalina. O fio de LMF apresentou o menor $\tan \delta$ na fase austenítica e o maior na região de transformação de fase, muito embora a capacidade de amortecimento da região martensítica seja bem considerável e mais utilizada, uma vez que não depende da energia cinética gerada pela mudança de fase para se manifestar. Observou-se ainda uma boa concordância dos dados em relação aos resultados obtidos por Silva (2009).
- O módulo elástico apresentou um discreto aumento com a frequência nos resultados da análise dinâmico-mecânica. Por outro lado, o módulo apresentou aumento significativo durante as transformações de fase, constatando a influência da temperatura no seu comportamento. Observou-se um aumento de 60% nesta propriedade quando comparados os valores da fase martensítica com os da fase austenítica.
- A partir das curvas de rigidez experimental da mola de LMF obtidas durante o aquecimento e resfriamento com temperaturas variando entre 25°C e 70°C, os

resultados apresentaram uma boa concordância com as curvas do modelo de teórico proposto do Ikuta *et al.* (1991). A rigidez da fase austenítica chegou a ser 1,37 vezes a encontrada na fase martensítica. Além disso, foi possível comprovar que a liga escolhida apresenta baixa histerese térmica da ordem de 8°C. Ressalta-se que quando se analisa as curvas dos módulos de elasticidade do fio de LMF obtidas dos ensaios DMA, percebe-se uma boa relação com a curva de rigidez da mola de LMF.

- O fator de amortecimento medido experimentalmente no sistema também se comportou da maneira esperada, apresentando um valor maior na fase martensítica do que na fase austenítica e um leve pico de capacidade máxima na região de transformação de fase. Ou seja, o comportamento do amortecimento é o contrário do comportamento da rigidez e cada um desses parâmetros interfere de maneira diferente na resposta dinâmica do sistema.
- O sistema de controle de temperatura utilizado conseguiu atender às necessidades de aquecimento e resfriamento da mola quando solicitado. Devido à baixa histerese em temperatura que a LMF utilizada apresentou, que foi da ordem de 8°C, o sistema de controle de temperatura apresentou boa eficiência, já que o laço de histerese que deveria ser superado era baixo.
- O sistema apresentou respostas dinâmicas distintas para as diferentes condições de temperaturas testadas. Quando a mola se encontrava a 25°C a frequência natural do sistema foi 10,8 Hz com níveis de máximos de amplitude da ordem de 6 mm. Nessa temperatura a mola de LMF apresenta rigidez menor e amortecimento maior quando comparada com as propriedades da mola a 70°C. Na condição mais quente a frequência de ressonância mudou para 12,7 Hz e as amplitudes máximas de deslocamento alcançaram picos de 12 mm.
- Analisando as respostas do sistema nos domínios do tempo e da frequência, foi possível comprovar que a relação entre o fator de amortecimento $2\zeta_{eq}$ e o fator de perda η apresentaram uma boa concordância entre a formulação teórica e procedimento experimental adotado. Vale ressaltar, que essa relação é válida apenas na região de ressonância, e por isso o fator de perda considerado foi o calculado pela Eq. (31).

- Quando foi analisada a ação do sistema de controle na região de ressonância, pode-se perceber a eficiência das LMF em aplicações de atenuação de vibrações. Para a mola inicialmente a 25°C os deslocamentos máximos do sistema eram de 6 mm e sofreram uma redução para 2,7 mm depois do aquecimento, o que representa uma redução de 55%. Por outro lado, quando o sistema foi colocado em ressonância com a mola inicialmente a 70°C os deslocamentos máximos alcançaram níveis da ordem de 12,18 mm. Esse valor foi reduzido para 4,9 mm depois que a mola foi resfriada. Nesse caso, obteve-se uma redução de 60 % nos níveis de amplitude.

Ainda há muito que ser estudado no que diz respeito a aplicações de ligas com memória de forma no controle e atenuação de vibrações. O tempo de estudo foi pequeno para que se compreendessem todas as particularidades e possibilidades do objeto de estudo, devido às complexidades dessa linha de pesquisa. Por exemplo, o sistema de controle de temperatura pode ser aprimorado para realizar o controle dos níveis de vibrações a partir de níveis de amplitudes críticas permitidas.

As LMF podem ser utilizadas no desenvolvimento de Absorvedores Dinâmicos de Vibração Adaptativos clássicos, onde um dispositivo de parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento é acoplado a uma estrutura primária cujas vibrações desejam-se atenuar. A incorporação de materiais inteligentes permitiria o ajuste dos parâmetros (massa, rigidez e amortecimento), conferindo ao dispositivo a possibilidade de sintonização em uma faixa maior de frequência.

Além disso, molas com LMF podem ser estudadas em sistemas mais complexos como um dispositivo com dois ou mais graus de liberdade, ou ainda em sistemas em escala reduzida, com a utilização de micro molas no desenvolvimento de sistemas de atenuação de vibrações para aplicações de nanotecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2004-5** - Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis. Annual book of ASTM standards, v. 13.01, p. 1-4, West Conshohocken, United States, 2005a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2005-5** - Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys. Annual book of ASTM Standards, v. 13.01, p. 1-3, West Conshohocken, United States, 2005b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM F2082-5** - Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free Recovery. Annual book of ASTM Standards, v. 13.01, p. 1-7, West Conshohocken, United States, 2006

AUGUET, C.; TORRA, V.; ISALQUE, A.; CARRERAS, G.; LOVEY, F.C.; TERRIAULT, P.; DIENG, L. **SMA in Mitigation of Extreme Loads in Civil Engineering: Damping Actions in Stayed Cables**. Applied Mechanics and Materials, v.82, p.539-544, 2011.

AURICCHIO, F.; MEKKI, O.B. **Performance Evaluation of Shape-Memory-Alloy Superelastic Behavior to Control a Stay Cable in Cable-Stayed Bridges**. International Journal of Non-Linear Mechanics, v. 46, p. 470-477, 2011.

AQUINO, A.S. **Controle de Vibração de um Sistema sob Desbalanceamento Rotativo Utilizando Atuador de Liga com Memória de Forma**. Tese – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba – Brasil, 2011.

BALAPGOL, B.S.; BAJORIA, K.M.; KULKARNI, S.A. **Natural Frequencies of a Multilayer SMA Laminated Composite Cantilever Plate**. Smart Materials and Structures, v.15, n.4, 2006.

BARZEGARI, M.M.; DARDEL, M.; FATHI, A.; PASHAEI, M.H. **Effect of Shape Memory Alloys Wires on Natural Frequency of Plates**. Journal of Mechanical Engineering and Automation, v.2(1), p. 23-28, 2012.

BRANDÃO, V.A.A.; SILVA, A.A. **Testes e Validação Experimental de um Dispositivo para Ciclagem Térmica de Atuadores com Memória de Forma**. IX Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

CARNEIRO, R.B. **Controle Semi-Ativo de Vibrações em Estruturas Utilizando Amortecedor Magnetoreológicos**. Tese – Universidade de Brasília, Brasília, 2009.

CHANG, S.H.; WU, S.K. **Internal Friction of R-Phase And B19 Martensite In Equiatomic TiNi Shape Memory Alloy Under Isothermal Conditions**. Journal of Alloys and Compounds, v. 438, p. 120-126, 2007.

CHEN, Q.; LEVY, C. **Vibration Analysis and Control of Flexible Beam by Using Smart Damping**. Composites: Part B – Engineering, v. 30, p. 395-406, 1999.

DELEMONT, M.; DESROCHES, R. **Seismic Retrofit of Simply Supported Bridges Using Shape Memory Alloys**. Engineering Structures, v.24(3), p.325–332, 2002.

DIAS, F.L.G.; CUNHA, S.S., Jr. **Concepção, Análise numérica e Otimização de um Absorvedor de Vibrações Adaptativo**. Anais do V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador, Bahia, 2008.

DOLCE, M.; CARDONE, D.; MARNETTO, R. **Implementation and Testing of Passive Control Devices Based on Shape Memory Alloys**. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, v.29, p.945–968, 2000.

DUERIG, T. **Engineering Aspects Of Shape Memory Alloys**. London: Butterworth-Heinemann, 1990.

FUGAZZA, D. **Shape Memory Alloys Devices in Earthquake Engineering: Mechanical Properties, Constitutive Modelling and Numerical Simulations**. Dissertação – Università Degli Studi di Pavia, Pavia – Itália, 2003.

GIURGIUTIU, V. Recent Advances in Smart-Material Rotor Control Actuation. **Structural Dynamics and Materials Conference and Exhibit**, Atlanta, USA, 2000.

GÓMEZ, A.L.Z. **Controle de Vibrações em Edifícios Submetidos à Ação de Cargas Dinâmicas Utilizando Amortecedor de Massa Sintonizado na Forma de Pêndulo**. Dissertação - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

GRANT, D., HAYWARD, V. **Vibration Isolation with High Strain Shape Memory Alloys Actuators: Case of the Impulsive Disturbance**. Proceedings, of International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Canadá, v. 229, 1999.

GRIFFIN, M. D. **Handbook of Human Vibration**. Second Printing, Academic Press, London, 1997.

GUPTA, K. **Critical Speed Analysis of Fibre Reinforced Composite Rotor Embedded with Shape Memory Alloys Wires**. International Journal of Rotating Machinery, v. 6, n. 3, p. 201-213, 2000.

HASHIM, H.; GHANI, A.R.A.; MAKHTAR, A.K.; RAMLI, M.H.M.; PATAR, M.N.A.A. ; **Active Tendon Vibration Control of Cantilevered Beam Using Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. Applied Mechanics and Materials, v. 110-116, p. 740-747, 2011.

HE, Y.; SATOKO, O.; CHU, F.L.; LI, H.X. **Vibration Control of a Rotor-bearing System Using Shape Memory Alloy: II – Experimental Study**. Smart Materials and Structures, v.16, p.122-127, 2007.

INMAN, D.J. **Engineering Vibration**. 2ª ed. Prentice Hall, 2000.

IKUTA, K.; HIROSE, S.; TSUKAMOTO, M. **Mathematical Model and Experimental Verification of Shape Memory Alloy for Designing Microactuator**. Proceedings of the 1991 IEEE MicroElectralMechanical Systems Conference, pp. 103-108, 1991.

MOUTINHO, C.M.R. **Controlo de Vibrações em Estruturas de Engenharia Civil**. Tese – Universidade do Porto, Porto – Portugal, 2007.

HODGSON, D.E. **Damping Applications of Shape Memory Alloys**. Materials Science Forum, v. 394, p. 60-74, 2002. INMAN, D.J. **Engineering Vibration**. 2ª ed. Prentice Hall, 2000.

JUÁN, J.S.; NÓ, M.L. **Damping Behavior During Martensitic Transformation in Shape Memory Alloys**. Journal of Alloys and Compounds, v. 355, i. 1-2, p. 65-71, 2003.

KIM, H.G.; YOSHITOMI, S.; TSUJI, M.; TAKEWAKI, I. **Analytical and Experimental Study on a New Stud-type Hysteretic and Visco-elastic Damper System**. Architectoni.ca, v. 2, p. 106-117, 2012.

LAGOUDAS, D.C.; MAYES, J.J.; KHAN, M.M. **Simplified Shape Memory Alloy (SMA) Material Model for Vibration Isolation**. Proceedings of International Society for Optical Engineering (SPIE), 2001.

LAKATOS, E.M.; MARCONI, M.A. **Metodologia do Trabalho Científico**. 7ª Ed., Atlas, São Paulo, 2007.

LAU, K.T. **Vibration Characteristics of SMA Composite Beams With Different Boundary Conditions**. Materials and Design, v. 23, p. 741-749, 2002.

LIANG, C.; ROGERS, C.A. **One Dimensional Thermomechanical Constitutive Relations for Shape Memory Materials**, Journal of Intelligent Materials System and Structures, V. 1, p. 207-234, 1990.

LIANG, C.; ROGERS, C. A. **Design of Shape Memory Alloys Springs with Applications in Vibration Control**. Journal of Sound and Vibration and Acoustics, v. 115, p. 129-135, 1993.

LIMA, D.V.F. **Controle de Vibrações Induzidas em uma Laje de Academia de Ginástica com a Utilização de Amortecedores de Massa Sintonizados**. Dissertação – Universidade de Brasília, Brasília, 2007.

LIN, H.C.; WU, S.K.; YEH, M.T. **Damping Characteristics of TiNi Shape Memory Alloys**. Metallurgical Transactions A, v. 24A, p. 2189-2194, 1993.

LÓPEZ, S.F. **Simulación Numérica y Correlación Experimental de las Propiedades Mecánicas em la Aleaciones com Memoria de Forma** . (Tese) Universidade Politécnica da Catalunha, Espanha, 2005.

MCGAVIN, G.; GUERIN, G. **Real-Time Seismic Damping and Frequency Control of Steel Structures Using Nitinol Wire**. Proc. SPIE 4696, Smart Structures and Materials 2002: Smart Systems for Bridges, Structures, and Highways, v. 176, 2002.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5.^a Ed. Pearson Education Brasil: São, Paulo, 2011.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C.M.; **Shape Memory Materials**. 1^a ed. Cambridge University: New York, 1998.

PAN, Q.; CHO, C. **The Investigation of a Shape Memory Alloy Micro-Damper for MEMS Applications**. Sensors, v. 7, p. 1887-1900, 2007.

PAVÓN, L.A.P.; CUELLAR, E.L.; BALLESTEROS, C.; CASTRO, A.T.; DE LA CRUZ, A.M.; DE ARAÚJO, C.J. **Nanoparticles from Cu-Zn-Al shape memory alloys physically synthesized by ion milling deposition**. Materials Research, v. 15, n.3, 2012.

PIEDBOEUF, M.C.; GAUVIN, R.; THOMAS, M. **Damping Behavior of Shape Memory Alloys: Strain, Amplitude and Temperature Effects**. Journal of Sound and Vibration, v.214, p.885-901, 1998.

RAO S. **Vibrações Mecânicas**. Prentice Hall, 4^a Edição, São Paulo, 2008.

SAADAT, S.; SALICHS, J.; NOORI, M.; HOU, Z.; DAVOODI, H.; BAR-ON, I.; SUZUKI, Y.; MASUDA, A. **An Overview of Vibration and Seismic Application of Niti Shape Memory Alloy**. Smart Materials and Structures, v.11 , p. 218–229, 2002.

SEMIÃO, L.A.P. **Utilização de Ligas com Memória de Forma no Controle de Vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil**. Dissertação – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa – Portugal, 2010.

SERAFIM, P.M.F. **Controlo de Vibrações em Engenharia Civil - Caso de Estudo: Aplicação de Ligas de SMA na Ponte de Santa Margarida do Sado**. Dissertação - Nova de Lisboa, Lisboa – Portugal, 2011.

SILVA, J.A.B.; MESQUITA, A.L.A. **Adaptive vibration control in rotating machine using bearing with shape memory alloy springs**. 20th International Congress of Mechanical Engineering - COBEM 2009, Porto Alegre – RS, 2009.

SILVA, N.J. **Estudo do Comportamento Termomecânico de uma Liga Ni-Ti com Memória de Forma Usando Análise Dinâmico-Mecânica**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

SILVA, C.W. **Vibration Damping, control, and design**. Taylor & Francis Group, Vancouver, Canada, 2007.

SONG, G.; MA, N.; LI, H.N. **Applications of Shape Memory Alloys in Civil Structures**. Engineering Structures, v. 28, p. 1266-1274, 2006.

SOONG, T.T.; SPENCER, B.F. **Supplementary Energy Dissipation: State-of-the-Art and State-of-the-Practice**. Engineering Structures, v. 24, p. 243–259, 2002.

UCHIL, J.; KAMARA, K.G.; MAKESH, K.K. **Effect Of Thermal Cycling On R-Phase Stability In A Niti Shape Memory Alloy**, Materials Science and Engineering, v.332, p. 25-28, 2002.

VILAR, Z.T.; DOS SANTOS, M.B.A.; CAVALCANTI, M.B.A.; DE ARAÚJO, C.J.; AMORIM JR., W.F. **Caracterização da funcionalidade de um compósito ativo CFRP/Ni-Ti**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v. 7.1, p. 26-33, 2012.

WANG, Z.; CHEN, S.; HAN, W. **Integrated Structural and Control Optimization of Intelligent Structures**. Engineering Structures - ELSEVIER, v. 21, p. 183-191, 1999.

WEBER, F.; FELTRIN, G.; HUTH, O. **Guidelines for Structural Control**. Structural Engineering Research Laboratory, Swiss Laboratories for Materials Testing and Research. Switzerland, 2006.

WILLIAMS, K.A.; CHIU, G.T.C.; BERNHARD, R.J. **Nonlinear Control of a Shape Memory Alloy Adaptive Tuned Vibration Absorber**, Journal of Sound and Vibration, v.288, p.1131-1155, 2005.

YAN, Y. J.; YAM, L. H. **A Synthetic Analysis on Design of Optimum Control for an Optimized Intelligent Structure**. Journal of Sound and Vibration, v. 249, n. 4, p. 775-784, 2002.

YAGIZ, N.; SAKMAN, L. E. **Vibrations of a Rectangular Bridge as an Isotropic Plate under a Traveling Full Vehicle Model**. Journal of Vibration and Control, v. 12, n. 1, p. 83-98, 2006.

YOSHIDA, I.; ONO, T.; ASAI, M. **Internal friction of Ti–Ni alloys**. Journal of Alloys and Compounds, v. 310, p. 339-343, 2000.

YUVARAJA, M.; KUMAR, M.S.; **Experimental Studies on SMA Spring Based Dynamic Vibration Absorber for Active Vibration Control**. European Journal of Scientific Research, v. 77, n.2, p. 240-251, 2012.

ZANABONI, E. **One Way and Two Way-Shape Memory Effect: Thermo-Mechanical Characterization on Ni-Ti Wires**. (Dissertação) Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica. Università degli Studi di Pavia. Itália, 2008.

ZAK, A. J., CARTMELL, M. P., OSTACHOWICZ, W. M. **Dynamics and Control of a Rotor Using an Integrated SMA/Composite Active Bearing Actuator**. Key Engineering Materials, v. 245-246, 2003.

ZUO, X.B.; CHANG, W.; LI, A.Q.; CHEN, Q.F., **Desing and Experimental Investigation of a Superelastic SMA Damper**. Materials Science and Engineering, v. 438, p. 1150-1153, 2006.

APÊNDICE A – Dados do Ensaio de DMA (Fio de Liga NiTi).

Módulo Elástico e Fator de Perda em Função da Frequência (T=30°C, 50°C e 70°C)

| Frequência (Hz) | Módulo Elástico (GPa) | | | Tan δ | | |
|-----------------|-----------------------|-------|-------|--------------|--------|--------|
| | 30°C | 50°C | 70°C | 30°C | 50°C | 70°C |
| 8,3 | 35,83 | 36,31 | 54,87 | 0,0127 | 0,0137 | 0,0014 |
| 12,2 | 35,95 | 37,25 | 55,09 | 0,0125 | 0,0128 | 0,0014 |
| 16,4 | 36,03 | 37,90 | 55,20 | 0,0125 | 0,0123 | 0,0014 |
| 20,5 | 36,09 | 38,18 | 55,23 | 0,0147 | 0,0123 | 0,0019 |
| 24,6 | 36,15 | 38,62 | 55,24 | 0,0133 | 0,0123 | 0,0021 |
| 28,6 | 36,26 | 39,19 | 55,31 | 0,0150 | 0,0131 | 0,0033 |
| 32,6 | 36,40 | 39,79 | 55,43 | 0,0124 | 0,0109 | 0,0014 |
| 36,8 | 36,44 | 40,15 | 55,45 | 0,0138 | 0,0102 | 0,0017 |
| 40,8 | 36,54 | 40,46 | 55,44 | 0,0110 | 0,0132 | 0,0041 |
| 44 | 36,54 | 40,64 | 55,50 | 0,0106 | 0,0077 | 0,0002 |
| 49 | 36,46 | 40,78 | 55,57 | 0,0157 | 0,0076 | 0,0001 |
| 53 | 36,60 | 40,73 | 55,44 | 0,0172 | 0,0151 | 0,0057 |
| 57 | 36,69 | 40,87 | 55,54 | 0,0093 | 0,0097 | 0,0021 |
| 61,5 | 36,75 | 41,09 | 55,67 | 0,0147 | 0,0058 | 0,0007 |
| 65,5 | 36,73 | 41,19 | 55,66 | 0,0090 | 0,0081 | 0,0009 |
| 69,5 | 36,84 | 41,05 | 55,44 | 0,0093 | 0,0163 | 0,0071 |
| 73,5 | 36,64 | 41,30 | 55,57 | 0,0233 | 0,0121 | 0,0044 |
| 77,5 | 36,89 | 41,40 | 55,58 | 0,0127 | 0,0192 | 0,0101 |
| 81,5 | 36,87 | 41,58 | 55,66 | 0,0202 | 0,0207 | 0,0116 |
| 85 | 36,88 | 41,96 | 56,00 | 0,0213 | 0,0153 | 0,0075 |
| 89 | 37,18 | 42,23 | 56,25 | 0,0179 | 0,0097 | 0,0032 |
| 93 | 37,30 | 42,22 | 56,21 | 0,0156 | 0,0114 | 0,0046 |
| 98 | 37,33 | 42,10 | 56,06 | 0,0149 | 0,0124 | 0,0055 |
| 102 | 37,35 | 42,15 | 56,10 | 0,0149 | 0,0123 | 0,0051 |
| 106 | 37,35 | 42,22 | 56,12 | 0,0153 | 0,0127 | 0,0058 |
| 110 | 37,36 | 42,23 | 56,14 | 0,0163 | 0,0135 | 0,0065 |
| 114 | 37,40 | 42,27 | 56,15 | 0,0170 | 0,0141 | 0,0072 |
| 118 | 37,44 | 42,31 | 56,20 | 0,0180 | 0,0149 | 0,0079 |
| 122 | 37,47 | 42,35 | 56,21 | 0,0188 | 0,0158 | 0,0086 |
| 126 | 37,52 | 42,41 | 56,24 | 0,0200 | 0,0168 | 0,0094 |
| 130 | 37,57 | 42,46 | 56,26 | 0,0204 | 0,0172 | 0,0099 |
| 134 | 37,65 | 42,52 | 56,30 | 0,0210 | 0,0175 | 0,0102 |
| 138 | 37,69 | 42,55 | 56,30 | 0,0220 | 0,0182 | 0,0108 |
| 142 | 37,74 | 42,57 | 56,29 | 0,0221 | 0,0190 | 0,0114 |
| 146 | 37,78 | 42,59 | 56,26 | 0,0232 | 0,0191 | 0,0118 |
| 150 | 37,77 | 42,57 | 56,18 | 0,0139 | 0,0180 | 0,0027 |

**APÊNDICE B – Dados do Ensaio de DMA (Fio de Liga NiTi).
Módulo Elástico e Fator de Perda em Função da Temperatura (1, 5, 10 e 12 Hz)**

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 25,04 | 32,27 | 33,02 | 33,39 | 34,41 | 0,01937 | 0,01318 | 0,01362 | 0,01194 |
| 25,26 | 32,39 | 33,01 | 33,39 | 34,43 | 0,01952 | 0,01320 | 0,01335 | 0,01189 |
| 25,53 | 32,52 | 32,99 | 33,39 | 34,41 | 0,01960 | 0,01319 | 0,01330 | 0,01189 |
| 25,79 | 32,59 | 32,97 | 33,40 | 34,36 | 0,01965 | 0,01324 | 0,01355 | 0,01193 |
| 26,05 | 32,56 | 32,95 | 33,41 | 34,27 | 0,01960 | 0,01334 | 0,01366 | 0,01206 |
| 26,32 | 32,43 | 32,93 | 33,42 | 34,17 | 0,01970 | 0,01335 | 0,01350 | 0,01195 |
| 26,58 | 32,26 | 32,91 | 33,44 | 34,06 | 0,01967 | 0,01336 | 0,01357 | 0,01203 |
| 26,84 | 32,12 | 32,90 | 33,45 | 33,96 | 0,01984 | 0,01347 | 0,01364 | 0,01192 |
| 27,11 | 32,03 | 32,88 | 33,46 | 33,87 | 0,02002 | 0,01335 | 0,01360 | 0,01209 |
| 27,37 | 32,00 | 32,87 | 33,47 | 33,81 | 0,02025 | 0,01355 | 0,01376 | 0,01190 |
| 27,63 | 32,04 | 32,85 | 33,48 | 33,77 | 0,02056 | 0,01353 | 0,01358 | 0,01197 |
| 27,90 | 32,14 | 32,84 | 33,48 | 33,75 | 0,02068 | 0,01356 | 0,01365 | 0,01198 |
| 28,16 | 32,29 | 32,83 | 33,47 | 33,76 | 0,02094 | 0,01354 | 0,01340 | 0,01204 |
| 28,42 | 32,39 | 32,82 | 33,47 | 33,80 | 0,02099 | 0,01369 | 0,01344 | 0,01216 |
| 28,68 | 32,35 | 32,81 | 33,45 | 33,87 | 0,02125 | 0,01362 | 0,01390 | 0,01211 |
| 28,95 | 32,17 | 32,80 | 33,43 | 33,97 | 0,02119 | 0,01368 | 0,01361 | 0,01212 |
| 29,21 | 31,98 | 32,79 | 33,39 | 34,06 | 0,02138 | 0,01385 | 0,01342 | 0,01228 |
| 29,47 | 31,85 | 32,79 | 33,35 | 34,10 | 0,02168 | 0,01380 | 0,01379 | 0,01237 |
| 29,74 | 31,82 | 32,79 | 33,31 | 34,06 | 0,02202 | 0,01386 | 0,01376 | 0,01216 |
| 30,00 | 31,89 | 32,79 | 33,25 | 33,95 | 0,02228 | 0,01378 | 0,01383 | 0,01239 |
| 30,26 | 32,05 | 32,80 | 33,19 | 33,79 | 0,02251 | 0,01390 | 0,01367 | 0,01230 |
| 30,53 | 32,21 | 32,80 | 33,12 | 33,66 | 0,02275 | 0,01384 | 0,01376 | 0,01216 |
| 30,79 | 32,18 | 32,80 | 33,06 | 33,55 | 0,02278 | 0,01403 | 0,01356 | 0,01220 |
| 31,05 | 31,98 | 32,80 | 32,99 | 33,48 | 0,02280 | 0,01412 | 0,01382 | 0,01228 |
| 31,32 | 31,77 | 32,81 | 32,92 | 33,46 | 0,02302 | 0,01411 | 0,01397 | 0,01216 |
| 31,58 | 31,67 | 32,81 | 32,85 | 33,48 | 0,02340 | 0,01416 | 0,01393 | 0,01234 |
| 31,84 | 31,70 | 32,81 | 32,79 | 33,55 | 0,02377 | 0,01420 | 0,01369 | 0,01228 |
| 32,11 | 31,86 | 32,81 | 32,73 | 33,67 | 0,02408 | 0,01423 | 0,01381 | 0,01255 |
| 32,37 | 32,05 | 32,80 | 32,67 | 33,78 | 0,02419 | 0,01425 | 0,01402 | 0,01242 |
| 32,63 | 32,03 | 32,79 | 32,62 | 33,81 | 0,02425 | 0,01431 | 0,01399 | 0,01254 |
| 32,90 | 31,80 | 32,78 | 32,57 | 33,72 | 0,02433 | 0,01436 | 0,01423 | 0,01241 |
| 33,16 | 31,59 | 32,76 | 32,52 | 33,55 | 0,02456 | 0,01440 | 0,01373 | 0,01258 |
| 33,42 | 31,53 | 32,74 | 32,48 | 33,39 | 0,02504 | 0,01437 | 0,01424 | 0,01261 |
| 33,69 | 31,62 | 32,71 | 32,45 | 33,27 | 0,02539 | 0,01442 | 0,01385 | 0,01277 |
| 33,95 | 31,84 | 32,68 | 32,42 | 33,22 | 0,02556 | 0,01441 | 0,01403 | 0,01262 |
| 34,21 | 31,93 | 32,64 | 32,40 | 33,22 | 0,02581 | 0,01445 | 0,01413 | 0,01284 |
| 34,48 | 31,75 | 32,60 | 32,38 | 33,30 | 0,02567 | 0,01440 | 0,01436 | 0,01270 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 34,74 | 31,50 | 32,55 | 32,36 | 33,45 | 0,02614 | 0,01452 | 0,01426 | 0,01306 |
| 35,00 | 31,42 | 32,50 | 32,36 | 33,58 | 0,02639 | 0,01454 | 0,01414 | 0,01285 |
| 35,26 | 31,50 | 32,45 | 32,36 | 33,57 | 0,02684 | 0,01468 | 0,01425 | 0,01295 |
| 35,53 | 31,72 | 32,39 | 32,36 | 33,42 | 0,02725 | 0,01465 | 0,01424 | 0,01281 |
| 35,79 | 31,82 | 32,33 | 32,38 | 33,23 | 0,02725 | 0,01469 | 0,01446 | 0,01305 |
| 36,05 | 31,62 | 32,28 | 32,41 | 33,09 | 0,02725 | 0,01482 | 0,01458 | 0,01292 |
| 36,32 | 31,38 | 32,22 | 32,44 | 33,02 | 0,02762 | 0,01489 | 0,01456 | 0,01307 |
| 36,58 | 31,33 | 32,16 | 32,47 | 33,05 | 0,02826 | 0,01498 | 0,01443 | 0,01300 |
| 36,84 | 31,47 | 32,11 | 32,51 | 33,15 | 0,02854 | 0,01503 | 0,01446 | 0,01330 |
| 37,11 | 31,71 | 32,06 | 32,54 | 33,31 | 0,02890 | 0,01508 | 0,01451 | 0,01309 |
| 37,37 | 31,69 | 32,02 | 32,56 | 33,42 | 0,02889 | 0,01506 | 0,01455 | 0,01327 |
| 37,63 | 31,44 | 31,97 | 32,56 | 33,36 | 0,02905 | 0,01524 | 0,01448 | 0,01328 |
| 37,90 | 31,27 | 31,94 | 32,55 | 33,17 | 0,02967 | 0,01534 | 0,01441 | 0,01336 |
| 38,16 | 31,33 | 31,90 | 32,52 | 33,00 | 0,03023 | 0,01555 | 0,01477 | 0,01342 |
| 38,42 | 31,58 | 31,87 | 32,46 | 32,91 | 0,03048 | 0,01549 | 0,01461 | 0,01341 |
| 38,69 | 31,71 | 31,84 | 32,40 | 32,93 | 0,03064 | 0,01551 | 0,01469 | 0,01359 |
| 38,95 | 31,50 | 31,82 | 32,32 | 33,03 | 0,03076 | 0,01562 | 0,01479 | 0,01356 |
| 39,21 | 31,28 | 31,81 | 32,25 | 33,22 | 0,03124 | 0,01578 | 0,01473 | 0,01368 |
| 39,48 | 31,30 | 31,80 | 32,18 | 33,34 | 0,03192 | 0,01585 | 0,01490 | 0,01394 |
| 39,74 | 31,53 | 31,80 | 32,11 | 33,27 | 0,03232 | 0,01604 | 0,01506 | 0,01374 |
| 40,00 | 31,74 | 31,80 | 32,05 | 33,09 | 0,03244 | 0,01600 | 0,01503 | 0,01377 |
| 40,27 | 31,58 | 31,81 | 32,01 | 32,95 | 0,03260 | 0,01608 | 0,01534 | 0,01391 |
| 40,53 | 31,35 | 31,83 | 31,98 | 32,91 | 0,03294 | 0,01619 | 0,01541 | 0,01408 |
| 40,79 | 31,35 | 31,85 | 31,97 | 32,97 | 0,03381 | 0,01636 | 0,01525 | 0,01415 |
| 41,06 | 31,60 | 31,89 | 31,97 | 33,15 | 0,03402 | 0,01649 | 0,01505 | 0,01423 |
| 41,32 | 31,85 | 31,95 | 31,99 | 33,36 | 0,03415 | 0,01646 | 0,01556 | 0,01431 |
| 41,58 | 31,69 | 32,00 | 32,02 | 33,39 | 0,03425 | 0,01663 | 0,01529 | 0,01436 |
| 41,84 | 31,48 | 32,07 | 32,07 | 33,28 | 0,03486 | 0,01668 | 0,01572 | 0,01441 |
| 42,11 | 31,52 | 32,14 | 32,14 | 33,13 | 0,03554 | 0,01679 | 0,01561 | 0,01453 |
| 42,37 | 31,83 | 32,20 | 32,24 | 33,07 | 0,03560 | 0,01697 | 0,01577 | 0,01443 |
| 42,63 | 32,06 | 32,26 | 32,36 | 33,13 | 0,03567 | 0,01716 | 0,01576 | 0,01459 |
| 42,90 | 31,90 | 32,31 | 32,48 | 33,29 | 0,03573 | 0,01714 | 0,01589 | 0,01468 |
| 43,16 | 31,73 | 32,34 | 32,58 | 33,55 | 0,03648 | 0,01729 | 0,01583 | 0,01489 |
| 43,42 | 31,83 | 32,34 | 32,64 | 33,72 | 0,03750 | 0,01746 | 0,01571 | 0,01481 |
| 43,69 | 32,20 | 32,33 | 32,65 | 33,69 | 0,03694 | 0,01735 | 0,01564 | 0,01500 |
| 43,95 | 32,40 | 32,32 | 32,63 | 33,56 | 0,03691 | 0,01779 | 0,01596 | 0,01500 |
| 44,21 | 32,23 | 32,28 | 32,58 | 33,50 | 0,03710 | 0,01814 | 0,01615 | 0,01491 |
| 44,48 | 32,13 | 32,26 | 32,54 | 33,54 | 0,03772 | 0,01781 | 0,01625 | 0,01502 |
| 44,74 | 32,33 | 32,24 | 32,54 | 33,67 | 0,03812 | 0,01820 | 0,01610 | 0,01502 |
| 45,00 | 32,77 | 32,24 | 32,56 | 33,89 | 0,03828 | 0,01815 | 0,01605 | 0,01505 |
| 45,27 | 32,90 | 32,26 | 32,61 | 34,19 | 0,03799 | 0,01802 | 0,01603 | 0,01511 |
| 45,53 | 32,75 | 32,30 | 32,71 | 34,41 | 0,03787 | 0,01825 | 0,01645 | 0,01519 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 45,79 | 32,75 | 32,37 | 32,84 | 34,48 | 0,03838 | 0,01829 | 0,01647 | 0,01506 |
| 46,06 | 33,04 | 32,45 | 33,02 | 34,46 | 0,03862 | 0,01852 | 0,01647 | 0,01514 |
| 46,32 | 33,54 | 32,56 | 33,26 | 34,45 | 0,03851 | 0,01845 | 0,01655 | 0,01523 |
| 46,58 | 33,62 | 32,71 | 33,52 | 34,50 | 0,03810 | 0,01855 | 0,01659 | 0,01505 |
| 46,85 | 33,51 | 32,90 | 33,75 | 34,62 | 0,03804 | 0,01870 | 0,01640 | 0,01505 |
| 47,11 | 33,60 | 33,13 | 33,87 | 34,80 | 0,03835 | 0,01869 | 0,01638 | 0,01494 |
| 47,37 | 34,01 | 33,36 | 33,92 | 35,03 | 0,03830 | 0,01885 | 0,01648 | 0,01500 |
| 47,64 | 34,52 | 33,58 | 33,93 | 35,31 | 0,03809 | 0,01882 | 0,01638 | 0,01488 |
| 47,90 | 34,63 | 33,75 | 33,99 | 35,63 | 0,03751 | 0,01887 | 0,01626 | 0,01489 |
| 48,16 | 34,58 | 33,84 | 34,10 | 35,97 | 0,03716 | 0,01902 | 0,01628 | 0,01478 |
| 48,42 | 34,71 | 33,88 | 34,28 | 36,26 | 0,03739 | 0,01897 | 0,01595 | 0,01475 |
| 48,69 | 35,18 | 33,93 | 34,53 | 36,50 | 0,03706 | 0,01906 | 0,01612 | 0,01462 |
| 48,95 | 35,75 | 34,00 | 34,86 | 36,70 | 0,03668 | 0,01883 | 0,01598 | 0,01458 |
| 49,21 | 35,96 | 34,13 | 35,31 | 36,87 | 0,03607 | 0,01889 | 0,01595 | 0,01438 |
| 49,48 | 35,98 | 34,30 | 35,66 | 37,04 | 0,03544 | 0,01880 | 0,01590 | 0,01421 |
| 49,74 | 36,09 | 34,55 | 35,88 | 37,23 | 0,03557 | 0,01887 | 0,01586 | 0,01407 |
| 50,00 | 36,57 | 34,86 | 35,99 | 37,44 | 0,03525 | 0,01867 | 0,01575 | 0,01393 |
| 50,27 | 37,18 | 35,27 | 36,10 | 37,56 | 0,03415 | 0,01853 | 0,01554 | 0,01379 |
| 50,53 | 37,64 | 35,68 | 36,27 | 37,92 | 0,03356 | 0,01867 | 0,01531 | 0,01353 |
| 50,79 | 37,73 | 36,01 | 36,53 | 38,20 | 0,03254 | 0,01837 | 0,01512 | 0,01342 |
| 51,06 | 37,82 | 36,22 | 36,89 | 38,49 | 0,03181 | 0,01820 | 0,01492 | 0,01309 |
| 51,32 | 38,10 | 36,35 | 37,39 | 38,79 | 0,03148 | 0,01799 | 0,01462 | 0,01287 |
| 51,58 | 38,62 | 36,48 | 37,93 | 39,11 | 0,03071 | 0,01787 | 0,01450 | 0,01268 |
| 51,85 | 39,28 | 36,66 | 38,39 | 39,45 | 0,02989 | 0,01763 | 0,01418 | 0,01245 |
| 52,11 | 39,80 | 36,94 | 38,63 | 39,80 | 0,02897 | 0,01728 | 0,01415 | 0,01222 |
| 52,37 | 39,97 | 37,29 | 38,79 | 40,17 | 0,02793 | 0,01695 | 0,01385 | 0,01195 |
| 52,64 | 40,08 | 37,75 | 38,97 | 40,55 | 0,02695 | 0,01667 | 0,01350 | 0,01173 |
| 52,90 | 40,27 | 38,28 | 39,24 | 40,98 | 0,02643 | 0,01634 | 0,01321 | 0,01135 |
| 53,16 | 40,64 | 38,81 | 39,58 | 41,42 | 0,02576 | 0,01627 | 0,01284 | 0,01112 |
| 53,43 | 41,20 | 39,19 | 40,05 | 41,88 | 0,02479 | 0,01575 | 0,01256 | 0,01070 |
| 53,69 | 41,82 | 39,44 | 40,57 | 42,35 | 0,02407 | 0,01533 | 0,01229 | 0,01050 |
| 53,95 | 42,34 | 39,61 | 41,14 | 42,75 | 0,02307 | 0,01497 | 0,01203 | 0,01006 |
| 54,22 | 42,54 | 39,81 | 41,62 | 43,10 | 0,02214 | 0,01457 | 0,01169 | 0,00981 |
| 54,48 | 42,62 | 40,08 | 41,93 | 43,35 | 0,02127 | 0,01421 | 0,01133 | 0,00955 |
| 54,74 | 42,73 | 40,38 | 42,12 | 43,51 | 0,02070 | 0,01380 | 0,01096 | 0,00924 |
| 55,00 | 42,98 | 40,82 | 42,29 | 43,67 | 0,02010 | 0,01324 | 0,01061 | 0,00889 |
| 55,27 | 43,34 | 41,29 | 42,49 | 43,85 | 0,01951 | 0,01286 | 0,01014 | 0,00864 |
| 55,53 | 43,86 | 41,84 | 42,76 | 44,09 | 0,01888 | 0,01248 | 0,00990 | 0,00838 |
| 55,79 | 44,44 | 42,39 | 43,09 | 44,41 | 0,01819 | 0,01202 | 0,00974 | 0,00808 |
| 56,06 | 44,84 | 42,80 | 43,47 | 44,82 | 0,01759 | 0,01161 | 0,00937 | 0,00784 |
| 56,32 | 45,02 | 43,08 | 43,96 | 45,36 | 0,01688 | 0,01126 | 0,00925 | 0,00759 |
| 56,58 | 45,04 | 43,26 | 44,47 | 45,87 | 0,01625 | 0,01089 | 0,00900 | 0,00743 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 56,85 | 45,07 | 43,40 | 44,91 | 46,14 | 0,01577 | 0,01053 | 0,00878 | 0,00707 |
| 57,11 | 45,20 | 43,58 | 45,26 | 46,19 | 0,01547 | 0,01015 | 0,00858 | 0,00694 |
| 57,37 | 45,45 | 43,80 | 45,45 | 46,19 | 0,01515 | 0,00980 | 0,00829 | 0,00661 |
| 57,64 | 45,81 | 44,08 | 45,52 | 46,27 | 0,01485 | 0,00953 | 0,00803 | 0,00647 |
| 57,90 | 46,32 | 44,40 | 45,59 | 46,50 | 0,01441 | 0,00925 | 0,00777 | 0,00613 |
| 58,16 | 46,74 | 44,77 | 45,70 | 46,86 | 0,01403 | 0,00902 | 0,00760 | 0,00605 |
| 58,43 | 46,99 | 45,20 | 45,86 | 47,39 | 0,01361 | 0,00871 | 0,00738 | 0,00583 |
| 58,69 | 47,01 | 45,70 | 46,09 | 47,78 | 0,01311 | 0,00842 | 0,00735 | 0,00571 |
| 58,95 | 46,94 | 46,08 | 46,38 | 47,87 | 0,01283 | 0,00816 | 0,00734 | 0,00563 |
| 59,22 | 46,91 | 46,35 | 46,74 | 47,71 | 0,01261 | 0,00796 | 0,00722 | 0,00535 |
| 59,48 | 46,99 | 46,48 | 47,16 | 47,64 | 0,01242 | 0,00774 | 0,00700 | 0,00524 |
| 59,74 | 47,18 | 46,52 | 47,54 | 47,79 | 0,01225 | 0,00753 | 0,00688 | 0,00509 |
| 60,01 | 47,45 | 46,55 | 47,76 | 48,15 | 0,01201 | 0,00736 | 0,00677 | 0,00502 |
| 60,27 | 47,82 | 46,62 | 47,79 | 48,59 | 0,01179 | 0,00728 | 0,00651 | 0,00494 |
| 60,53 | 48,22 | 46,73 | 47,74 | 48,83 | 0,01154 | 0,00714 | 0,00635 | 0,00486 |
| 60,80 | 48,48 | 46,89 | 47,71 | 48,74 | 0,01132 | 0,00700 | 0,00632 | 0,00479 |
| 61,06 | 48,54 | 47,11 | 47,74 | 48,56 | 0,01100 | 0,00690 | 0,00632 | 0,00466 |
| 61,32 | 48,45 | 47,37 | 47,85 | 48,52 | 0,01073 | 0,00674 | 0,00632 | 0,00454 |
| 61,58 | 48,35 | 47,71 | 48,02 | 48,59 | 0,01052 | 0,00658 | 0,00628 | 0,00440 |
| 61,85 | 48,29 | 48,08 | 48,26 | 48,81 | 0,01045 | 0,00649 | 0,00634 | 0,00417 |
| 62,11 | 48,33 | 48,40 | 48,59 | 49,16 | 0,01032 | 0,00644 | 0,00631 | 0,00393 |
| 62,37 | 48,44 | 48,58 | 48,93 | 49,49 | 0,01036 | 0,00637 | 0,00617 | 0,00376 |
| 62,64 | 48,61 | 48,61 | 49,17 | 49,63 | 0,01021 | 0,00632 | 0,00603 | 0,00352 |
| 62,90 | 48,85 | 48,54 | 49,24 | 49,53 | 0,01023 | 0,00629 | 0,00577 | 0,00342 |
| 63,16 | 49,15 | 48,47 | 49,18 | 49,35 | 0,01022 | 0,00632 | 0,00560 | 0,00331 |
| 63,43 | 49,45 | 48,44 | 49,07 | 49,28 | 0,01002 | 0,00626 | 0,00543 | 0,00323 |
| 63,69 | 49,64 | 48,47 | 49,00 | 49,33 | 0,00980 | 0,00619 | 0,00530 | 0,00319 |
| 63,95 | 49,69 | 48,56 | 48,98 | 49,50 | 0,00963 | 0,00607 | 0,00520 | 0,00313 |
| 64,22 | 49,62 | 48,70 | 49,04 | 49,77 | 0,00941 | 0,00592 | 0,00523 | 0,00310 |
| 64,48 | 49,50 | 48,90 | 49,13 | 50,13 | 0,00926 | 0,00583 | 0,00511 | 0,00309 |
| 64,74 | 49,39 | 49,17 | 49,26 | 50,41 | 0,00910 | 0,00565 | 0,00509 | 0,00311 |
| 65,01 | 49,33 | 49,48 | 49,44 | 50,46 | 0,00899 | 0,00549 | 0,00508 | 0,00299 |
| 65,27 | 49,32 | 49,74 | 49,65 | 50,33 | 0,00893 | 0,00534 | 0,00512 | 0,00307 |
| 65,53 | 49,36 | 49,89 | 49,89 | 50,18 | 0,00884 | 0,00527 | 0,00510 | 0,00292 |
| 65,80 | 49,44 | 49,91 | 50,11 | 50,08 | 0,00885 | 0,00517 | 0,00494 | 0,00294 |
| 66,06 | 49,56 | 49,83 | 50,24 | 50,08 | 0,00870 | 0,00513 | 0,00482 | 0,00288 |
| 66,32 | 49,72 | 49,73 | 50,29 | 50,18 | 0,00870 | 0,00507 | 0,00477 | 0,00291 |
| 66,59 | 49,92 | 49,65 | 50,25 | 50,38 | 0,00857 | 0,00505 | 0,00477 | 0,00288 |
| 66,85 | 50,13 | 49,60 | 50,15 | 50,67 | 0,00854 | 0,00503 | 0,00464 | 0,00292 |
| 67,11 | 50,34 | 49,60 | 50,05 | 50,97 | 0,00846 | 0,00502 | 0,00459 | 0,00283 |
| 67,38 | 50,48 | 49,63 | 49,98 | 51,11 | 0,00834 | 0,00498 | 0,00465 | 0,00282 |
| 67,64 | 50,55 | 49,70 | 49,92 | 51,05 | 0,00828 | 0,00489 | 0,00457 | 0,00281 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 67,90 | 50,55 | 49,81 | 49,90 | 50,88 | 0,00815 | 0,00489 | 0,00453 | 0,00281 |
| 68,16 | 50,49 | 49,94 | 49,91 | 50,71 | 0,00809 | 0,00482 | 0,00438 | 0,00271 |
| 68,43 | 50,39 | 50,12 | 49,96 | 50,60 | 0,00793 | 0,00481 | 0,00431 | 0,00268 |
| 68,69 | 50,29 | 50,32 | 50,03 | 50,58 | 0,00789 | 0,00477 | 0,00432 | 0,00258 |
| 68,95 | 50,21 | 50,53 | 50,12 | 50,63 | 0,00782 | 0,00470 | 0,00432 | 0,00251 |
| 69,22 | 50,15 | 50,71 | 50,23 | 50,75 | 0,00775 | 0,00473 | 0,00419 | 0,00250 |
| 69,48 | 50,10 | 50,83 | 50,36 | 50,94 | 0,00769 | 0,00465 | 0,00420 | 0,00239 |
| 69,74 | 50,09 | 50,88 | 50,52 | 51,19 | 0,00772 | 0,00464 | 0,00425 | 0,00224 |
| 70,01 | 50,11 | 50,87 | 50,69 | 51,40 | 0,00766 | 0,00458 | 0,00428 | 0,00211 |
| 70,27 | 50,14 | 50,82 | 50,86 | 51,48 | 0,00766 | 0,00464 | 0,00431 | 0,00213 |
| 70,53 | 50,19 | 50,73 | 50,99 | 51,43 | 0,00762 | 0,00480 | 0,00423 | 0,00198 |
| 70,80 | 50,26 | 50,64 | 51,09 | 51,28 | 0,00764 | 0,00478 | 0,00428 | 0,00195 |
| 71,06 | 50,34 | 50,56 | 51,13 | 51,11 | 0,00762 | 0,00476 | 0,00426 | 0,00178 |
| 71,32 | 50,43 | 50,51 | 51,14 | 50,99 | 0,00761 | 0,00469 | 0,00423 | 0,00173 |
| 71,59 | 50,55 | 50,46 | 51,11 | 50,92 | 0,00760 | 0,00464 | 0,00427 | 0,00163 |
| 71,85 | 50,68 | 50,44 | 51,05 | 50,92 | 0,00759 | 0,00464 | 0,00418 | 0,00165 |
| 72,11 | 50,81 | 50,43 | 50,97 | 50,97 | 0,00756 | 0,00455 | 0,00417 | 0,00150 |
| 72,38 | 50,95 | 50,44 | 50,89 | 51,06 | 0,00752 | 0,00450 | 0,00414 | 0,00146 |
| 72,64 | 51,06 | 50,47 | 50,82 | 51,21 | 0,00754 | 0,00447 | 0,00409 | 0,00153 |
| 72,90 | 51,16 | 50,50 | 50,77 | 51,39 | 0,00751 | 0,00446 | 0,00413 | 0,00148 |
| 73,17 | 51,22 | 50,56 | 50,72 | 51,60 | 0,00747 | 0,00442 | 0,00404 | 0,00147 |
| 73,43 | 51,25 | 50,61 | 50,68 | 51,80 | 0,00738 | 0,00443 | 0,00403 | 0,00141 |
| 73,69 | 51,25 | 50,69 | 50,65 | 51,93 | 0,00738 | 0,00443 | 0,00404 | 0,00146 |
| 73,96 | 51,23 | 50,78 | 50,63 | 51,98 | 0,00738 | 0,00441 | 0,00414 | 0,00132 |
| 74,22 | 51,18 | 50,87 | 50,63 | 51,94 | 0,00740 | 0,00446 | 0,00402 | 0,00136 |
| 74,48 | 51,12 | 50,99 | 50,63 | 51,86 | 0,00736 | 0,00446 | 0,00395 | 0,00128 |
| 74,74 | 51,05 | 51,10 | 50,65 | 51,74 | 0,00734 | 0,00456 | 0,00392 | 0,00129 |
| 75,01 | 50,97 | 51,22 | 50,68 | 51,64 | 0,00734 | 0,00454 | 0,00386 | 0,00121 |
| 75,27 | 50,91 | 51,32 | 50,71 | 51,56 | 0,00724 | 0,00465 | 0,00374 | 0,00126 |
| 75,53 | 50,85 | 51,41 | 50,76 | 51,51 | 0,00726 | 0,00461 | 0,00383 | 0,00118 |
| 75,80 | 50,80 | 51,47 | 50,81 | 51,48 | 0,00727 | 0,00466 | 0,00415 | 0,00116 |
| 76,06 | 50,76 | 51,51 | 50,87 | 51,47 | 0,00726 | 0,00466 | 0,00386 | 0,00111 |
| 76,32 | 50,72 | 51,52 | 50,94 | 51,49 | 0,00719 | 0,00468 | 0,00386 | 0,00110 |
| 76,59 | 50,69 | 51,52 | 51,02 | 51,54 | 0,00718 | 0,00460 | 0,00382 | 0,00109 |
| 76,85 | 50,67 | 51,49 | 51,10 | 51,59 | 0,00718 | 0,00459 | 0,00386 | 0,00113 |
| 77,11 | 50,65 | 51,45 | 51,18 | 51,67 | 0,00716 | 0,00458 | 0,00374 | 0,00119 |
| 77,38 | 50,65 | 51,40 | 51,27 | 51,77 | 0,00718 | 0,00451 | 0,00377 | 0,00114 |
| 77,64 | 50,65 | 51,33 | 51,35 | 51,88 | 0,00713 | 0,00451 | 0,00372 | 0,00112 |
| 77,90 | 50,66 | 51,27 | 51,43 | 52,01 | 0,00717 | 0,00445 | 0,00358 | 0,00108 |
| 78,17 | 50,67 | 51,20 | 51,48 | 52,14 | 0,00711 | 0,00438 | 0,00357 | 0,00113 |
| 78,43 | 50,69 | 51,14 | 51,53 | 52,28 | 0,00713 | 0,00433 | 0,00353 | 0,00110 |
| 78,69 | 50,72 | 51,08 | 51,55 | 52,39 | 0,00711 | 0,00424 | 0,00353 | 0,00115 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 78,96 | 50,75 | 51,03 | 51,56 | 52,49 | 0,00711 | 0,00420 | 0,00353 | 0,00113 |
| 79,22 | 50,78 | 50,98 | 51,54 | 52,55 | 0,00702 | 0,00415 | 0,00362 | 0,00112 |
| 79,48 | 50,82 | 50,94 | 51,53 | 52,59 | 0,00704 | 0,00409 | 0,00342 | 0,00115 |
| 79,75 | 50,86 | 50,90 | 51,49 | 52,59 | 0,00695 | 0,00399 | 0,00353 | 0,00109 |
| 80,01 | 50,92 | 50,87 | 51,44 | 52,57 | 0,00689 | 0,00389 | 0,00292 | 0,00110 |
| 80,27 | 50,98 | 50,85 | 51,39 | 52,53 | 0,00690 | 0,00383 | 0,00337 | 0,00106 |
| 80,54 | 51,05 | 50,83 | 51,33 | 52,48 | 0,00682 | 0,00376 | 0,00376 | 0,00106 |
| 80,80 | 51,12 | 50,82 | 51,27 | 52,41 | 0,00680 | 0,00372 | 0,00320 | 0,00105 |
| 81,06 | 51,19 | 50,82 | 51,21 | 52,35 | 0,00672 | 0,00363 | 0,00329 | 0,00104 |
| 81,32 | 51,26 | 50,82 | 51,15 | 52,29 | 0,00670 | 0,00366 | 0,00318 | 0,00108 |
| 81,59 | 51,34 | 50,83 | 51,10 | 52,24 | 0,00658 | 0,00359 | 0,00305 | 0,00104 |
| 81,85 | 51,40 | 50,84 | 51,06 | 52,19 | 0,00663 | 0,00357 | 0,00307 | 0,00100 |
| 82,11 | 51,46 | 50,86 | 51,01 | 52,16 | 0,00651 | 0,00358 | 0,00309 | 0,00110 |
| 82,38 | 51,51 | 50,88 | 50,97 | 52,13 | 0,00651 | 0,00356 | 0,00300 | 0,00102 |
| 82,64 | 51,54 | 50,90 | 50,95 | 52,11 | 0,00645 | 0,00355 | 0,00302 | 0,00106 |
| 82,90 | 51,57 | 50,94 | 50,92 | 52,09 | 0,00640 | 0,00351 | 0,00292 | 0,00103 |
| 83,17 | 51,58 | 50,98 | 50,90 | 52,08 | 0,00639 | 0,00358 | 0,00302 | 0,00100 |
| 83,43 | 51,58 | 51,02 | 50,88 | 52,09 | 0,00632 | 0,00361 | 0,00276 | 0,00102 |
| 83,69 | 51,57 | 51,07 | 50,87 | 52,09 | 0,00629 | 0,00355 | 0,00282 | 0,00095 |
| 83,96 | 51,56 | 51,11 | 50,86 | 52,10 | 0,00615 | 0,00352 | 0,00271 | 0,00100 |
| 84,22 | 51,52 | 51,17 | 50,87 | 52,12 | 0,00621 | 0,00349 | 0,00272 | 0,00098 |
| 84,48 | 51,49 | 51,22 | 50,88 | 52,15 | 0,00612 | 0,00348 | 0,00273 | 0,00103 |
| 84,75 | 51,45 | 51,29 | 50,89 | 52,17 | 0,00602 | 0,00339 | 0,00263 | 0,00097 |
| 85,01 | 51,40 | 51,35 | 50,90 | 52,21 | 0,00600 | 0,00332 | 0,00264 | 0,00099 |
| 85,27 | 51,34 | 51,41 | 50,92 | 52,25 | 0,00589 | 0,00330 | 0,00259 | 0,00097 |
| 85,54 | 51,29 | 51,47 | 50,95 | 52,29 | 0,00588 | 0,00328 | 0,00260 | 0,00100 |
| 85,80 | 51,24 | 51,52 | 50,97 | 52,33 | 0,00579 | 0,00324 | 0,00253 | 0,00100 |
| 86,06 | 51,19 | 51,58 | 51,00 | 52,38 | 0,00568 | 0,00326 | 0,00253 | 0,00103 |
| 86,33 | 51,14 | 51,63 | 51,04 | 52,44 | 0,00569 | 0,00317 | 0,00251 | 0,00105 |
| 86,59 | 51,10 | 51,67 | 51,08 | 52,50 | 0,00557 | 0,00316 | 0,00254 | 0,00099 |
| 86,85 | 51,05 | 51,70 | 51,12 | 52,56 | 0,00561 | 0,00311 | 0,00256 | 0,00104 |
| 87,12 | 51,01 | 51,72 | 51,18 | 52,63 | 0,00555 | 0,00311 | 0,00256 | 0,00099 |
| 87,38 | 50,98 | 51,74 | 51,23 | 52,69 | 0,00559 | 0,00307 | 0,00249 | 0,00102 |
| 87,64 | 50,94 | 51,74 | 51,30 | 52,77 | 0,00554 | 0,00311 | 0,00245 | 0,00100 |
| 87,90 | 50,92 | 51,74 | 51,37 | 52,83 | 0,00549 | 0,00308 | 0,00244 | 0,00103 |
| 88,17 | 50,89 | 51,73 | 51,43 | 52,90 | 0,00555 | 0,00307 | 0,00243 | 0,00104 |
| 88,43 | 50,88 | 51,71 | 51,51 | 52,96 | 0,00544 | 0,00302 | 0,00243 | 0,00099 |
| 88,69 | 50,87 | 51,68 | 51,58 | 53,02 | 0,00549 | 0,00305 | 0,00251 | 0,00109 |
| 88,96 | 50,86 | 51,66 | 51,65 | 53,08 | 0,00546 | 0,00307 | 0,00247 | 0,00107 |
| 89,22 | 50,87 | 51,62 | 51,71 | 53,12 | 0,00550 | 0,00304 | 0,00249 | 0,00100 |
| 89,48 | 50,87 | 51,58 | 51,78 | 53,17 | 0,00552 | 0,00304 | 0,00246 | 0,00104 |
| 89,75 | 50,88 | 51,55 | 51,83 | 53,20 | 0,00547 | 0,00303 | 0,00251 | 0,00096 |

| Temperatura (°C) | Módulo Elástico (GPa) | | | | Tan δ | | | |
|---------------------|-----------------------|-------|-------|-------|--------------|---------|---------|---------|
| | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz | 1 Hz | 5 Hz | 10 Hz | 12 Hz |
| 90,01 | 50,90 | 51,51 | 51,88 | 53,22 | 0,00549 | 0,00304 | 0,00251 | 0,00098 |
| 90,27 | 50,92 | 51,47 | 51,92 | 53,24 | 0,00549 | 0,00303 | 0,00246 | 0,00104 |
| 90,54 | 50,94 | 51,44 | 51,95 | 53,25 | 0,00547 | 0,00304 | 0,00250 | 0,00103 |
| 90,80 | 50,97 | 51,40 | 51,97 | 53,26 | 0,00553 | 0,00303 | 0,00247 | 0,00099 |
| 91,06 | 51,00 | 51,38 | 51,99 | 53,26 | 0,00547 | 0,00302 | 0,00247 | 0,00095 |
| 91,33 | 51,03 | 51,34 | 51,99 | 53,25 | 0,00552 | 0,00306 | 0,00246 | 0,00097 |
| 91,59 | 51,07 | 51,33 | 51,99 | 53,23 | 0,00550 | 0,00303 | 0,00246 | 0,00092 |
| 91,85 | 51,11 | 51,30 | 51,98 | 53,21 | 0,00546 | 0,00302 | 0,00253 | 0,00102 |
| 92,12 | 51,15 | 51,29 | 51,97 | 53,18 | 0,00548 | 0,00298 | 0,00263 | 0,00096 |
| 92,38 | 51,20 | 51,27 | 51,94 | 53,16 | 0,00544 | 0,00301 | 0,00254 | 0,00098 |
| 92,64 | 51,26 | 51,26 | 51,91 | 53,12 | 0,00547 | 0,00299 | 0,00253 | 0,00090 |
| 92,91 | 51,31 | 51,25 | 51,88 | 53,09 | 0,00549 | 0,00306 | 0,00247 | 0,00093 |
| 93,17 | 51,38 | 51,24 | 51,85 | 53,06 | 0,00549 | 0,00306 | 0,00253 | 0,00087 |
| 93,43 | 51,44 | 51,24 | 51,81 | 53,02 | 0,00542 | 0,00302 | 0,00247 | 0,00095 |
| 93,70 | 51,51 | 51,24 | 51,77 | 52,99 | 0,00548 | 0,00304 | 0,00238 | 0,00094 |
| 93,96 | 51,58 | 51,25 | 51,73 | 52,97 | 0,00540 | 0,00302 | 0,00241 | 0,00096 |
| 94,22 | 51,65 | 51,26 | 51,70 | 52,94 | 0,00548 | 0,00302 | 0,00229 | 0,00090 |
| 94,48 | 51,71 | 51,28 | 51,66 | 52,91 | 0,00547 | 0,00303 | 0,00232 | 0,00093 |
| 94,75 | 51,78 | 51,29 | 51,63 | 52,89 | 0,00542 | 0,00297 | 0,00233 | 0,00092 |
| 95,01 | 51,85 | 51,31 | 51,61 | 52,88 | 0,00533 | 0,00305 | 0,00234 | 0,00094 |
| 95,27 | 51,89 | 51,33 | 51,58 | 52,85 | 0,00548 | 0,00302 | 0,00226 | 0,00086 |
| 95,54 | 51,94 | 51,35 | 51,56 | 52,84 | 0,00539 | 0,00297 | 0,00224 | 0,00091 |
| 95,80 | 51,98 | 51,38 | 51,54 | 52,83 | 0,00541 | 0,00299 | 0,00223 | 0,00093 |
| 96,06 | 52,02 | 51,40 | 51,53 | 52,82 | 0,00534 | 0,00304 | 0,00225 | 0,00091 |
| 96,33 | 52,03 | 51,44 | 51,51 | 52,80 | 0,00543 | 0,00302 | 0,00214 | 0,00092 |
| 96,59 | 52,05 | 51,48 | 51,50 | 52,79 | 0,00534 | 0,00299 | 0,00220 | 0,00089 |
| 96,85 | 52,06 | 51,51 | 51,49 | 52,79 | 0,00531 | 0,00300 | 0,00214 | 0,00084 |
| 97,12 | 52,06 | 51,56 | 51,49 | 52,79 | 0,00537 | 0,00306 | 0,00209 | 0,00092 |
| 97,38 | 52,04 | 51,61 | 51,49 | 52,79 | 0,00537 | 0,00301 | 0,00213 | 0,00089 |
| 97,64 | 52,03 | 51,66 | 51,50 | 52,79 | 0,00527 | 0,00299 | 0,00222 | 0,00090 |
| 97,91 | 52,01 | 51,71 | 51,50 | 52,80 | 0,00521 | 0,00308 | 0,00216 | 0,00087 |
| 98,17 | 51,97 | 51,77 | 51,51 | 52,80 | 0,00540 | 0,00301 | 0,00217 | 0,00085 |
| 98,43 | 51,94 | 51,83 | 51,52 | 52,81 | 0,00525 | 0,00307 | 0,00218 | 0,00081 |
| 98,70 | 51,91 | 51,90 | 51,54 | 52,82 | 0,00525 | 0,00299 | 0,00217 | 0,00085 |
| 98,96 | 51,88 | 51,96 | 51,55 | 52,84 | 0,00520 | 0,00305 | 0,00226 | 0,00093 |
| 99,22 | 51,83 | 52,02 | 51,58 | 52,86 | 0,00533 | 0,00304 | 0,00223 | 0,00090 |
| 99,49 | 51,80 | 52,09 | 51,60 | 52,87 | 0,00519 | 0,00307 | 0,00220 | 0,00085 |
| 99,75 | 51,76 | 52,15 | 51,63 | 52,89 | 0,00528 | 0,00303 | 0,00222 | 0,00084 |
| 100,01 | 51,72 | 52,21 | 51,65 | 52,91 | 0,00520 | 0,00303 | 0,00224 | 0,00083 |