



PROJETO DE GRADUAÇÃO

EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS EM MOLAS PSEUDOELÁSTICAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Sérgio Alves Bandeira

Brasília, 24 de Novembro de 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

EFEITOS DE TRATAMENTOS TÉRMICOS EM MOLAS PSEUDOELÁSTICAS DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Sérgio Alves Bandeira

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

Banca Examinadora

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

Prof. Edson Paulo da Silva, UnB/ ENM _____

Prof. Palloma Muterlle, UnB/ ENM _____

Brasília, 24 de Novembro de 2017

Dedicatória

Aos meus pais, que tornaram meu sonho possível.

Sérgio Alves Bandeira

Agradecimentos

Agradeço a Deus, que todos os dias se mostra parceiro, e tornou tudo possível. Agradeço também aos meus pais, José e Janete, pelo apoio incondicional. Aos meus irmãos, Rodrigo e Henrique, pela parceria e irmandade de longa data. À minha linda namorada Thaís, que esteve presente do início ao fim da minha graduação. Aos amigos que fizeram Brasília se tornar minha casa. Um especial muito obrigado à minha orientadora, Aline Souza de Paula, pela constante disponibilidade e atenção, além da maestria com que exerce a profissão de professora. Não posso deixar de agradecer também ao Hugo Oliveira, que com paciência e disposição teve papel indispensável na realização desse trabalho, e ao Arthur Barcelos, pela disponibilidade constante.

Sérgio Alves Bandeira

RESUMO

Sistemas mecânicos de diversos tipos sofrem com problemas relacionados a vibrações indesejáveis. Uma técnica desenvolvida para controlar, reduzir ou até eliminar vibrações indesejadas é a utilização de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADV), que possuem parâmetros concentrados de massa, rigidez e amortecimento adequadamente projetados para reduzir as oscilações de um sistema primário quando acoplado a ele. As Ligas de Memória de Forma e suas características dissipativas quando em regime pseudoelástico se tornam grande atrativo para desenvolvimento de dispositivos absorvedores. Esse trabalho apresenta uma análise de molas pseudoelásticas submetidas a diferentes tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento, buscando-se avaliar os efeitos no que diz respeito à dissipação de energia. Após os tratamentos, a caracterização do material é conduzida através de análises diferenciais calorimétricas (DSC) e ensaios quase-estáticos de tração. Ao estabelecer a curva histerese, através de ensaio quase-estático, de cada uma das molas num diagrama carga x deslocamento é possível identificar o tratamento térmico mais adequado à absorção de vibrações, já que a maior dissipação de energia acontece na mola que apresenta maior área histerética.

ABSTRACT

Mechanical systems of various types suffer from problems related to undesirable vibrations. A technique developed to control, reduce or even eliminate unwanted vibrations is the use of Dynamic Vibration Absorbers (ADV), which have mass parameters, stiffness and damping adequately designed to reduce the oscillations of a primary system. The Shape Memory Alloys, due to their dissipative characteristics when presenting pseudoelastic behavior, show great potential for development of absorber devices. This work presents an analysis of pseudoelastic springs submitted to different thermal treatments of solubilization and aging by performing characterization of the material through differential calorimetric analyzes (DSC) and quasi-static traction tests. The objective is to ascertain the effects caused by the heat treatments on the material with regard to energy dissipation. Establishing the hysteresis curve of each of the springs in a load-displacement diagram it is possible to identify which is the most appropriate heat treatment for the vibration absorption, since the greatest energy dissipation occurs in the spring that presents greater hysteretic area.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Metodologia	2
1.4 Organização do Trabalho.....	2
2 CONCEITOS TEÓRICOS	4
2.1 Ligas com memória de forma	4
2.1.1 O fenômeno quasiplástico e o Efeito Memória de Forma	5
2.1.2 O fenômeno pseudoelástico	7
2.1.3 Contexto histórico	8
2.1.4 Características das Ligas com Memória de Forma.....	9
2.1.5 Aplicações das Ligas com Memória de Forma	10
2.2 Amortecedores Dinâmicos de Vibrações - ADV.....	12
2.2.1 Aplicações das Ligas com Memória de Forma em ADVs.....	16
2.3 Tratamentos Térmicos em Ligas com Memória de Forma	17
2.3.1 Transformações de Fase em Ligas com Memória de Forma.....	17
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 Tratamentos Térmicos	22
3.2 Análise Diferencial Calorimétrica (DSC).....	24
3.3 Ensaios quase-estáticos	25
4 RESULTADOS	28
4.1 Temperaturas características	28
4.2 Caracterização estática.....	32
5 CONCLUSÕES.....	39
5.1 Sugestões para trabalhos futuros	39
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Temperaturas M_s , M_f , A_s e A_f	5
Figura 2: Efeito memória de forma de uma via	6
Figura 3: Efeito memória de forma de duas via	7
Figura 4: Comportamento tensão x temperatura em regime pseudoelástico	8
Figura 5: Diagrama tensão x deformação em regime pseudoelástico.....	8
Figura 6: Características de Tensão e Energia de Materiais Inteligentes	9
Figura 7: SMA em aplicação biomédica: Stent	10
Figura 8: Aplicação ortodôntica de fios Ni-Ti.....	10
Figura 9: SMA nos chevrons de aeronaves.....	11
Figura 10: Fios SMA usados nas asas de aeronaves.....	11
Figura 11: Robótica e Protética associada a ligas SMA	12
Figura 12: Sistema de 1 Grau de Liberdade com absorvedor dinâmico passivo	13
Figura 13: Amplitude do sistema primário segundo frequências de oscilação	15
Figura 14: Amplitude do absorvedor dinâmico segundo frequências de excitação.....	15
Figura 15: Absorvedor Dinâmico de Vibrações Adaptativo.....	16
Figura 16: Cristalografia. a) austenítica b) martensítica	18
Figura 17: Carregamento na fase Martensítica	19
Figura 18: Treinamento de fio Ni-Ti a partir de 50 ciclos de deformação	20
Figura 19: Molas Ni-Ti. a) mola B original b) mola B ensaiada	21
Figura 20: Forno Jung FO8080.....	22
Figura 21: Características do Forno Jung FO8080	22
Figura 22: Aparelho DSC-8000 Perkin Elmer.....	24
Figura 23: Aparato experimental de ensaio quase-estático.....	25
Figura 24: Detalhe da fixação da mola e célula de carga.....	26
Figura 25: Fluxo dos procedimentos experimentais	27
Figura 26: Temperaturas características e picos obtidos por DSC para amostra A0.....	28
Figura 27: Temperaturas características e picos obtidos por DSC para amostra A1	29
Figura 28: Temperaturas características e picos obtidos por DSC para amostra A2.....	30
Figura 29: Temperaturas características e picos obtidos por DSC para amostra A3	30
Figura 30: Temperaturas características e picos obtidos por DSC para amostra A4.....	31
Figura 31: Dispersão das Temperaturas A_f	31
Figura 32: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas A	33
Figura 33: Dissipação de energia por ciclo para molas A.....	33
Figura 34: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B	34
Figura 35: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4.....	34
Figura 36: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B	35
Figura 37: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4.....	35
Figura 38: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B	36
Figura 39: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4.....	36
Figura 40: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B	37
Figura 41: Dissipação de energia por ciclo para as molas B13, B14, B15 e B16.....	37
Figura 42: Comparação da energia dissipada por amostra	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades Mecânicas de Liga Ni-Ti Equiatômica padrão.....	18
Tabela 2: Características das Molas	21
Tabela 3: Tratamentos térmicos realizados	23
Tabela 4: Temperatura de austenitização final segundo tratamento térmico	32
Tabela 5: Configuração para ensaios quase-estáticos	33

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolos Latinos

A	Área	[m ²]
C_p	Calor específico a pressão constante	[kJ/kg.K]
h	Entalpia específica	[kJ/kg]
\dot{m}	Vazão mássica	[kg/s]
T	Temperatura	[°C]
U	Coefficiente global de transferência de calor	[W/m ² .K]

Símbolos Gregos

ω	Frequência Natural	[rad/s]
Δ	Varição entre duas grandezas similares	
ρ	Densidade	[m ³ /kg]

Grupos Adimensionais

μ	Razão mássica
-------	---------------

Subscritos

s	start
f	finish
est	estático

Sobrescritos

•	Varição temporal
••	Segunda derivada
-	Valor médio

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ADV	Absorvedor Dinâmico de Vibrações
ADVA	Absorvedor Dinâmico de Vibrações Adaptativo
ASTM	American Society for Testing and Materials
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i> ou Calorimetria Diferencial de Varredura
EMF	Efeito Memória de Forma
LMF	Liga com Memória de Forma
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta um panorama geral sobre o trabalho desenvolvido. Objetivos e motivações do estudo são apresentados.

1.1 Motivação

A presença de vibrações indesejáveis é recorrente em diversos sistemas mecânicos, o que se torna um problema a ser resolvido, já que vibrações desse tipo comprometem a eficiência, operacionalidade e integridade física dos equipamentos sujeitos. Quando as vibrações ocorrem numa frequência que maximiza as amplitudes de resposta, ocorre o fenômeno conhecido como ressonância. O descontrole desse tipo de comportamento dinâmico pode causar graves danos estruturais no sistema devido a falhas por fadiga ou deformações plásticas causadas pelas grandes amplitudes alcançadas.

É necessário, portanto, reduzir - ou se possível eliminar - as vibrações indesejadas de um sistema. Para isso, uma técnica disponível e amplamente utilizada é o uso de Absorvedores Dinâmicos de Vibrações (ADV). Esse dispositivo é um controlador passivo de vibrações, de maneira que, quando corretamente projetado, é acoplado a um sistema primário de forma que sejam alterados os parâmetros de massa, rigidez e amortecimento. Assim, o ADV absorve e dissipa parte da energia que antes causava grandes oscilações do sistema primário. Soluções como essa possuem a grande vantagem de não exigir energia ou ação externa para atuar, mas apenas funcionam efetivamente numa estreita e específica faixa de frequência (Machado & Lagoudas, 2008). A indústria tem manifestado interesse em absorvedores que operem numa faixa maior.

Nesse contexto, surge a utilização das Ligas com Memória de Forma (Shape Memory Alloys, SMA), cujas principais características são a capacidade de recuperar sua geometria original ao ser exposta a campos de temperatura ou tensão, e a grande capacidade dissipativa. As grandes energias dissipadas nas deformações de ligas dessa natureza levantam a possibilidade de uso do material para o desenvolvimento de um ADV composto por SMA. Espera-se que suas características permitam um amortecimento mais efetivo, se comparado aos dispositivos clássicos.

1.2 Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo geral analisar molas pseudoelásticas de ligas com memória de forma (SMA) visando sua utilização em dispositivos de amortecimento passivo de vibrações. Como objetivos específicos busca-se avaliar a influência de tratamentos térmicos nas temperaturas de transformação e nos laços de histerese obtidos a partir do comportamento força-deslocamento.

1.3 Metodologia

Inicialmente realiza-se uma revisão bibliográfica acerca das características apresentadas por ligas com memória de forma, em especial das ligas Ni-Ti, buscando o correto entendimento do potencial que ligas desse tipo apresentam para o controle passivo de vibrações.

Em seguida, são realizados diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento em molas de SMA a fim de identificar o processo mais adequado. Após a realização dos tratamentos térmicos, as molas são caracterizadas através das temperaturas de transformações e do laço de histerese. As temperaturas são identificadas utilizando calorimetria diferencial de varredura (DSC). Para o levantamento do laço de histerese utiliza-se um aparato experimental de ensaios quase-estáticos desenvolvido no Laboratório de Vibrações do Grupo de Dinâmica de Sistemas (GDS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). Nesse aparato são realizados 200 ciclos de carregamento e descarregamento de cada mola para obtenção do laço estabilizado. As informações provenientes desses ensaios permitem comparar os resultados de acordo com o tratamento térmico realizado, de maneira a buscar a maior dissipação de energia. Quanto maior a área da curva de histerese, maior será o potencial do material para o controle passivo de vibrações.

1.4 Organização do Trabalho

Este documento está dividido em 5 capítulos: Introdução, Conceitos Teóricos, Ensaios para Caracterização, Resultados e Conclusões. O presente capítulo, Introdução, apresenta os principais aspectos que motivaram a realização do trabalho, e quais objetivos pretende-se alcançar e a metodologia adotada. O capítulo 2, Conceitos Teóricos, aborda de maneira sucinta os principais conceitos acerca das ligas com memória de forma. Aspectos fenomenológicos que chamam atenção nesse tipo de material inteligente, quasiplasticidade e pseudoelasticidade, são apresentados de maneira a mostrar também as diversas aplicações desses materiais nos variados

campos da engenharia. O capítulo 2 versa ainda sobre a ação dos tratamentos térmicos na microestrutura do material e seus efeitos macroscópicos na liga, além de estabelecer método de estabilização e caracterização do material. O capítulo 3, Ensaio para Caracterização, expõe os métodos utilizados para caracterizar as molas de níquel-titânio estudadas: Análise Diferencial Calorimétrica (DSC) e ensaios quase-estáticos de tração. Nessa capítulo o aparato experimental utilizado é brevemente descrito. O capítulo 4, Resultados, apresenta os resultados obtidos com o auxílio do aparato instrumental e equipamento DSC para que seja feita uma comparação de comportamento mecânico entre molas que passaram por diferentes tratamentos térmicos. Busca-se estabelecer o tratamento mais adequado ao desenvolvimento de absorvedores dinâmicos de vibrações passivos. No capítulo 5, Conclusões, apresenta uma síntese das análises realizadas acerca dos resultados experimentais obtidos. Nesse mesmo capítulo são feitas algumas sugestões para trabalhos futuros

2 CONCEITOS TEÓRICOS

Ligas com memória de forma apresentam características intensamente estudadas desde sua descoberta. Comportamentos, características e aplicações dos materiais inteligentes são aqui expostos.

2.1 Ligas com memória de forma

A importância dos metais para o avanço da Engenharia Mecânica é indiscutível. As constantes melhorias na área de ciência dos materiais, com aprofundamento dos conhecimentos acerca dos efeitos da microestrutura e suas modificações no comportamento das ligas de trabalho também desempenharam papel fundamental para o advento dos materiais inteligentes.

Os materiais inteligentes podem ser subdivididos em diversas categorias, como por exemplo piezo-cerâmicos, polímeros piezelétricos, cerâmicos magneto restritivos e Ligas com Memória de Forma (Shape Memory Alloys, SMA). Estas últimas caracterizam-se pela capacidade de sofrer grandes deformações elásticas, com simples recuperação à forma original quando expostas a processos termomecânicos adequados. Essa capacidade faz com que materiais desse tipo possam apresentar fenômenos de quasiplasticidade, efeito memória de forma ou pseudoelasticidade (também chamado superelasticidade), a depender das condições de temperatura.

Ligas com Memória de forma possuem duas fases com distintas estruturas cristalográficas e conseqüentemente diferentes propriedades (Kumar & Lagoudas, 2011). Essas fases, martensita e austenita, dependem da temperatura. A fase austenítica apresenta geralmente cristais cúbicos, enquanto a martensítica pode apresentar microestruturas tetragonais, ortorrômbicas ou monocíclicas (Stoeckel, 1995). A transição entre essas duas fases não ocorre por difusão atômica, mas através da transformação martensítica¹: mudança de fase baseada em distorção da rede cristalina por cisalhamento. Cada cristal martensítico pode se alinhar numa direção diferente, e a combinação desses cristais permite identificar dois tipos de organização cristalina: martensita maclada e não-maclada, em que os cristais acomodam entre si ou

¹ “A transformação martensítica pode ser definida como uma transformação de fase no estado sólido com ausência de difusão, resultante de um movimento coordenado e/ou cooperativo entre os átomos da fase matriz, inferior ao parâmetro da célula e que mantém uma estreita correspondência de reticulado entre a fase matriz e a fase produto porém, com mudança da estrutura cristalina.” (Ducos, 2006)

apresentam uma direção dominante, respectivamente. É a transformação reversível entre essas duas fases que permite que ligas com memória de forma apresentem um comportamento único, em que é possível recuperar sua geometria original após grande deformação (Kumar & Lagoudas, 2011).

Para a tipificação dessas ligas, definem-se quatro temperaturas que as caracterizam: M_f , M_s , A_s e A_f . Abaixo da temperatura M_f existe apenas a fase martensítica, enquanto que acima da temperatura A_f existe apenas austenita. É possível estabelecer 2 padrões de transformação em relação a essas temperaturas: no Tipo I observa-se $A_f > A_s > M_s > M_f$, enquanto no Tipo II tem-se $A_f > M_s > A_s > M_f$ (Funakubo, 1987). Para o material em estudo nesse trabalho ocorre o Tipo I (**Figura 1**).

As temperaturas M_s e A_s demarcam a temperatura na qual inicia-se a formação de martensita e austenita, respectivamente. O comportamento de uma SMA – se quasiplástico ou pseudoelástico – depende do ponto em que se encontra a liga no que refere à estrutura cristalográfica (Souza, 2014).

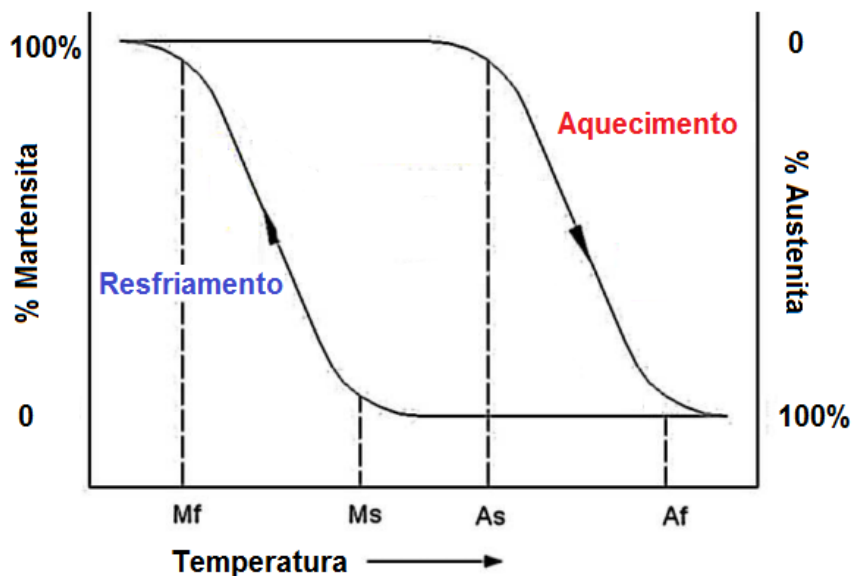


Figura 1: Temperaturas M_s , M_f , A_s e A_f
(Adaptado de Zanaboni, 2008)

2.1.1 O fenômeno quasiplástico e o efeito memória de forma

A quasiplasticidade caracteriza-se por grande deformação residual devido à reorientação martensítica induzida mecanicamente (Krishnan, Delaey, & Warlimont, 1974). Quando o material aparentemente deformado plasticamente recupera seu aspecto original a partir de mudanças de temperatura ocorre o efeito memória de forma (Stoekel, 1995). Esse fenômeno é possível graças à transformação martensítica. Em temperaturas abaixo de M_f (baixa

temperatura) a liga apresenta apenas martensita: macia, facilmente deformável. Após deformar o material, basta aquecê-lo até uma temperatura superior à A_f para recuperar a geometria original da liga. Nesse caso, a transformação martensítica é induzida por mudanças na temperatura, não por tensões de carregamentos. Nesse contexto, o fenômeno de recuperação de forma no regime quasiplástico dos materiais inteligentes pode ser classificado em duas categorias: efeito de memória de forma de uma via (*one-way shape memory effect*) ou efeito de memória de forma de duas vias (*two-way shape memory effect*) (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016).

2.1.1.1 Efeito memória de forma de uma via

O efeito de memória de forma de uma via é a recuperação de um formato original apresentado por uma peça mesmo depois de grandes deformações quasiplásticas a partir do aquecimento até temperatura adequada (tipicamente acima de A_f), que garanta a fase austenítica. Existem muitas variantes em que a austenita pode transformar em martensita, mas há apenas um arranjo possível para que a austenita seja formada (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016). Com isso, o formato original é recuperado, como ilustra a **Figura 2**.

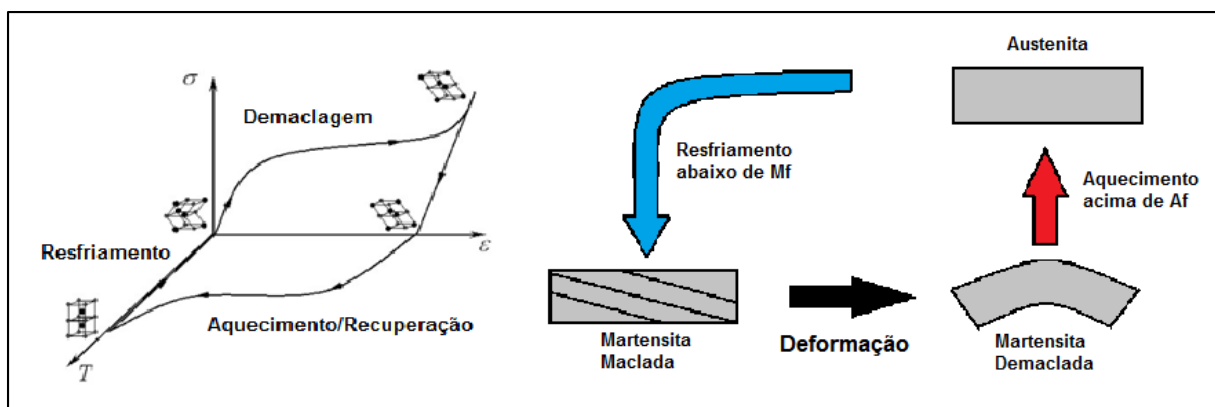


Figura 2: Efeito memória de forma de uma via
(Adaptado de Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016)

2.1.1.1 Efeito memória de forma de duas vias

O efeito de memória de forma de duas vias possibilita a mudança de forma não só pelo aquecimento, mas também pelo resfriamento da liga: duas geometrias podem ser obtidas. Diz-se “obtidas” pois tal efeito exige que haja “treinamento” da liga. Isso envolve processos termomecânicos complexos, com repetições de deformações cíclicas além de transformações adequadas entre as fases austenítica e martensítica da liga. Uma grande diferença entre o efeito de uma via e o efeito de duas vias é a mudança geométrica mesmo na ausência de tensões externas para o segundo caso. Aqui, introduz-se no material uma deformação acima do seu ponto de escoamento, de maneira que mesmo após o aquecimento da peça existam deformações

residuais. Durante o resfriamento, forma-se então uma forma específica de martensita (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016). Esse fenômeno reflete macroscopicamente, e a peça passa a apresentar uma forma para fase de baixa temperatura e outra forma para a alta temperatura. Transformações entre os 2 formatos podem então ser controladas a partir do aquecimento ou resfriamento do material (**Figura 3**)

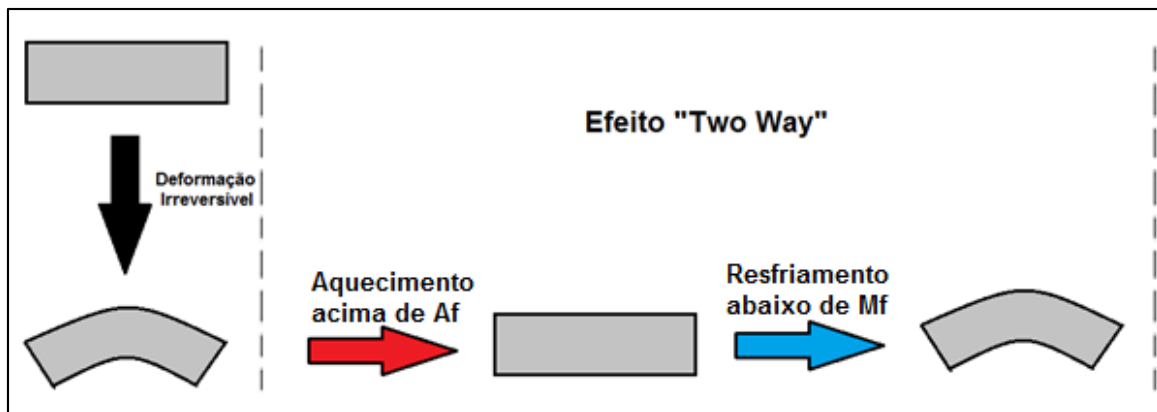


Figura 3: Efeito memória de forma de duas via
(Adaptado de Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016)

2.1.2 O fenômeno pseudoelástico

Quando transformações de fase são induzidas não por temperatura, mas por aplicação de cargas mecânicas suficientes a um material em sua fase austenítica, pode-se observar um fenômeno chamado pseudoelasticidade ou superelasticidade. O resultado de tal carregamento é uma fase totalmente martensítica não-maclada, gerada a partir de austenita, em que grandes deformações do material podem ser observadas. Caso essas deformações ocorram numa temperatura característica acima de A_f , a simples retirada do carregamento mecânico fará com que a liga metálica recupere seu formato original (Kumar & Lagoudas, 2011).

O aumento no nível de tensão aplicada a um material com características de pseudoelasticidade altera também os valores das temperaturas de transformação de fases (**Figura 4**). Um carregamento mecânico suficientemente grande, portanto, faz iniciar a transformação martensítica na qual uma liga, inicialmente na fase com apenas austenita, começa a gerar martensita (σ^{Ms}). A partir daí, grandes deformações podem ser percebidas, até que atinge-se um ponto de carregamento onde existe apenas a fase martensítica (σ^{Mf}). Aumentar as cargas aplicadas acima do limite de escoamento acarretam tensões crescentes, enquanto que diminuí-las faz com que se inicie a formação de austenita (σ^{As}), com fenômeno elástico de recuperação de forma até o ponto σ^{Af} , onde existe apenas a fase austenítica (**Figura 5**)

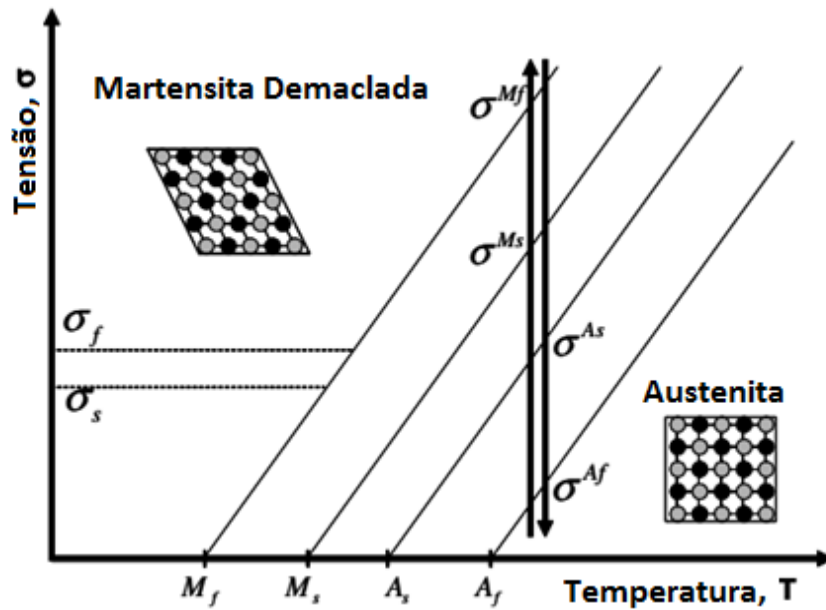


Figura 4: Comportamento tensão x temperatura em regime pseudoelástico (Adaptado de Kumar & Lagoudas, 2011)

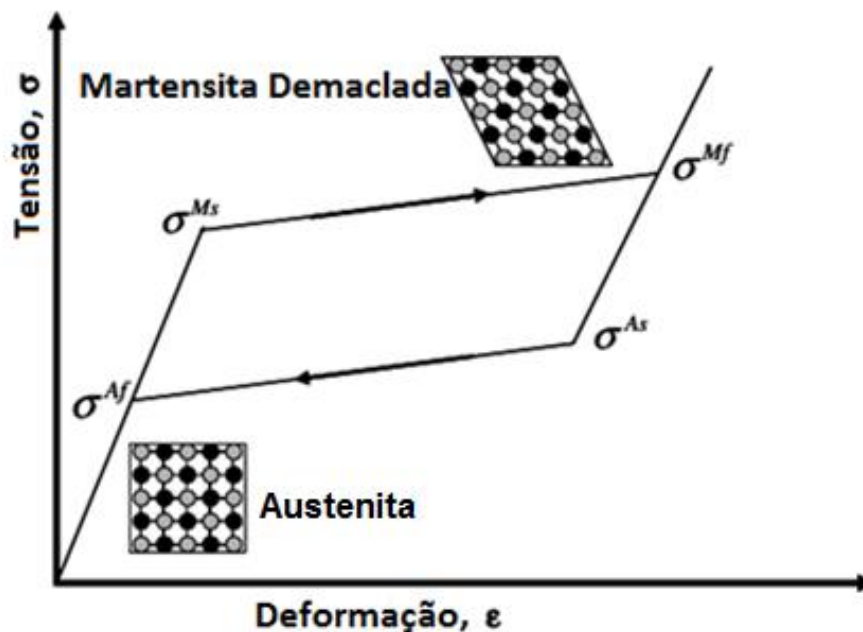


Figura 5: Diagrama tensão x deformação em regime pseudoelástico (Adaptado de Kumar & Lagoudas, 2011)

2.1.3 Contexto histórico

A descoberta da martensita em aços, ocorrida em 1890 graças ao trabalho de Adolf Martens, tornou a transformação martensítica um fenômeno amplamente analisado no início do século XX. Com isso, A. Olander descobriu o comportamento pseudoelástico (explicado nas seções seguintes) em 1932 em ligas Au-Cd e o cerne do efeito de memória como função do comportamento termoelástico foi amplamente relatado por Kurdjumov e Khandros em 1949 (Zanaboni, 2008). Inicialmente vista como um processo irreversível, a transformação

martensítica ganhou diversas aplicações na engenharia na segunda metade dos anos 60, quando Buehler descobriu em ligas NiTi uma capacidade de recuperação da forma geométrica, enquanto investigava materiais úteis para proteção térmica. As grandes deformações que ligas desse tipo conseguem recuperar, com retorno elástico ao formato original, fez aumentar o número de aplicações interessantes para a engenharia. As ligas Ni-Ti tornaram-se as ligas mais utilizadas comercialmente no contexto de materiais com memória de forma tendo em vista aspectos como baixo custo, se comparado a outras ligas com memória de forma, e outros citados no próximo subitem.

2.1.4 Características das Ligas com Memória de Forma

Dentre os diversos materiais inteligentes, as ligas com memória de forma vêm atraindo grande interesse devido à sua capacidade de suportar altas tensões e fornecer grande densidade de energia, com altas taxas de trabalho realizado por volume de liga. Como pode ser visto na **Figura 6**, as ligas com memória de forma apresentam 10 MJ/m^3 , sob tensões da ordem de 100 MPa.

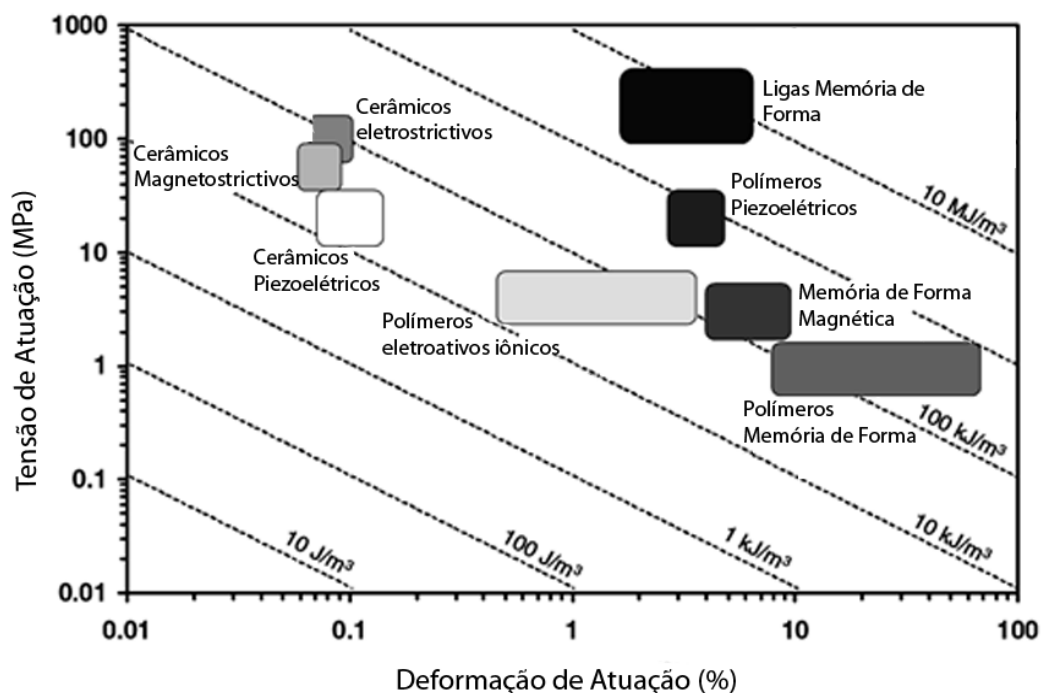


Figura 6: Características de Tensão e Energia de Materiais Inteligentes
(Adaptado de Kumar e Lagoudas, 2011)

Além dessas importantes características de densidade de energia, as ligas com memória de forma, em especial as ligas Ni-Ti, apresentam propriedades físicas atrativas à indústria, tais como: alta resistência à corrosão, baixo peso específico, grande resistência ao escoamento e biocompatibilidade.

2.1.5 Aplicações das Ligas com Memória de Forma

As propriedades singulares das SMAs fazem com que essas ligas sejam utilizadas em aplicações em diversos campos da engenharia, como o mecânica, mecatrônica, aeroespacial e biomédica.

Dispositivos conhecidos como “*stents*”, por exemplo, são uma importante aplicação cardiovascular, utilizados para sustentar o diâmetro interno de vasos tubulares como vasos sanguíneos, duto biliar e esôfago. Nesse caso, malhas cilíndricas feitas com material inteligente são inseridas no interior do vaso com auxílio de um cateter. Ao ficar exposta à temperatura corporal humana, a malha passa por uma expansão, de maneira a apoiar as paredes do vaso enfraquecido (**Figura 7**).

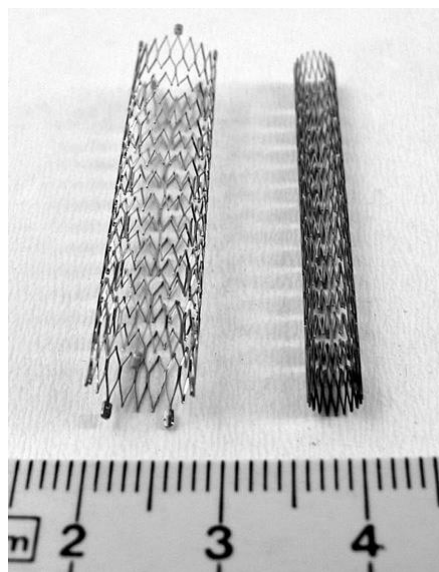


Figura 7: SMA em aplicação biomédica: Stent
(Stoeckel, 1995)

Tratamentos ortodônticos também vêm apresentando sucesso quando SMAs são utilizadas. Arcos pseudoelásticos possuem boa resiliência e permitem uma movimentação dos dentes durante longos períodos de tempo, com forças transmitidas consideravelmente mais leves e contínuas, se comparadas às do aço (Quintão & Brunharo, 2009).

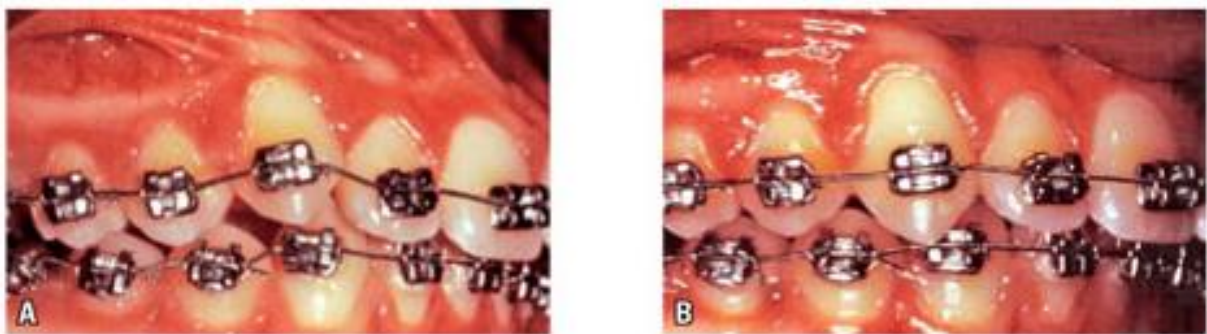
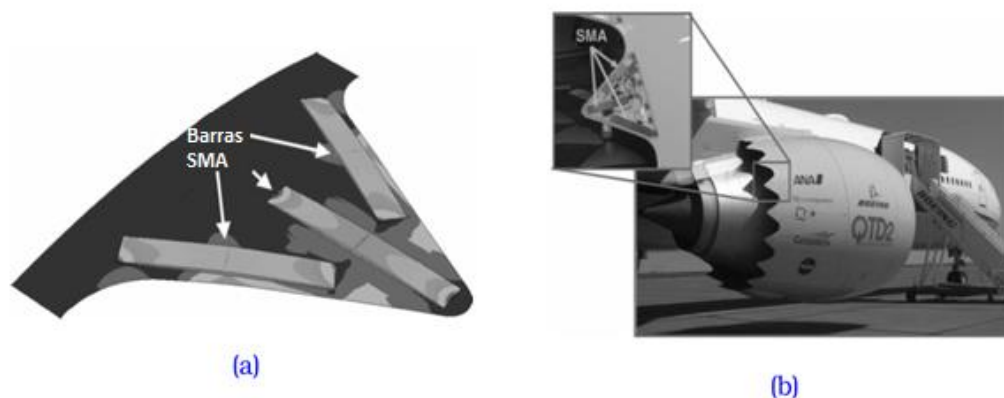


Figura 8: Aplicação ortodôntica de fios Ni-Ti

A indústria aeronáutica também faz diversos usos das propriedades inteligentes desses tipos de materiais. Barras de SMA são utilizadas por exemplo nas extremidades das turbinas de aviões (**Figura 9**). Durante o início da decolagem o aquecimento provocado pelo funcionamento do motor faz com que o efeito da memória de forma seja acionado, e as barras SMA forçam os *chevrons* numa direção conveniente para a redução do barulho causado pela aeronave. Ao alcançar grandes altitudes de voo, onde a temperatura é baixa, as barras SMA fazem com que os *chevrons* retornem à posição de eficiência máxima do combustível (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016).



a) Representação esquemática de barras SMA b) Barras SMA posicionadas numa turbina aeronáutica

Figura 9: SMA nos chevrons de aeronaves
(Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016)

As asas de algumas aeronaves também podem aproveitar as vantagens de ligas com memória de forma. Embutir fios SMA nas asas pode contribuir para a redução de turbulências e melhorar a precisão do controle de voo. A passagem de corrente elétrica através desses fios permitem acomodar o formato da asa conforme conveniência (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016).

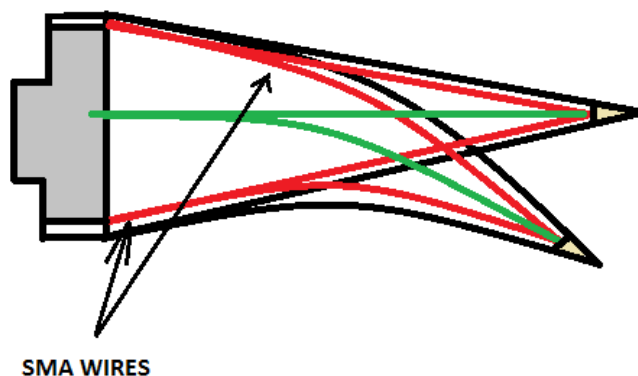


Figura 10: Fios SMA usados nas asas de aeronaves
(Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016)

O campo da robótica e próteses têm apresentado importantes avanços a partir de usos de ligas Nitinol. Músculos artificiais – robóticos ou para próteses médicas – podem alcançar melhores resultados ao utilizar efeitos de memória de forma (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016).



Figura 11: Robótica e Protética associada a ligas SMA
(Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016)

As aplicações promissoras de ligas com memória de forma não se restringem às áreas apresentadas, mas incluem diversas outras, como acoplamento de tubos, manufatura de óculos deformáveis, instrumentos de alta precisão médica, implantes ortopédicos, entre outros (Xenos-Despina & Karamichailidou, 2016). Absorvedores dinâmicos de vibrações que explorem as vantagens de ligas de materiais inteligentes através da dissipação passiva da energia proveniente de oscilações indesejadas é uma aplicação que também vem sendo investigada com grande interesse. Diferentes condições termomecânicas acarretam diferentes aplicações, e as modificações causadas na liga e sua estrutura através de tratamentos térmicos é o foco desse estudo.

2.2 Amortecedores Dinâmicos de Vibrações - ADV

Todos os corpos que possuem massa e elementos capazes de desenvolver movimento relativo estão sujeitos a vibrações mecânicas. Quando um sistema está exposto a vibrações indesejadas pode haver queda do seu rendimento, desgaste excessivo de componentes ou até mesmo a falha por fadiga ou escoamento (Souza, 2014). A exposição a uma excitação externa numa frequência próxima a de ressonância torna necessária uma maneira de controle ou atenuação dos efeitos vibratórios. Para isso, é possível utilizar absorvedores dinâmicos de vibração (ADV) ativos – quando há realização direta de trabalho – ou passivos, que funcionam baseados em suas características físicas e dispensam gastos adicionais de energia elétrica, por exemplo. Nesse último caso, acrescenta-se pontualmente ao sistema elementos de massa, rigidez e/ou amortecimento (**Figura 12**).

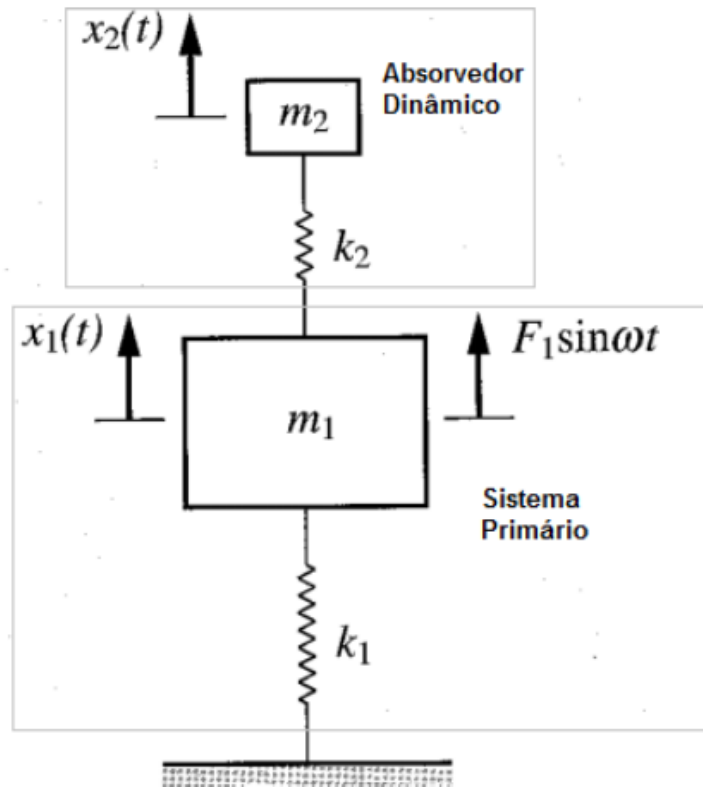


Figura 12: Sistema de 1 Grau de Liberdade com absorvedor dinâmico passivo
(Oliveira, 2014)

A partir do momento que é conectado a um sistema primário, onde existe excitação harmônica externa, um ADV é capaz de absorver a energia de vibração presente de modo a atenuar os níveis oscilatórios do sistema primário. Esse mecanismo permite evitar amplitudes de oscilações indesejadas através da redistribuição da energia vibratória, em que reduzem-se as vibrações do sistema primário a partir do aumento daquelas presentes no sistema secundário absorvedor (Oliveira, 2014).

Normalmente os ADVs são projetados em função da frequência de ressonância do sistema primário. Tomando o sistema apresentado pela **Figura 12** como exemplo, em que existe um sistema primário de massa m_1 , rigidez k_1 , sem amortecimento e sujeito a excitação harmônica, pode-se acoplar um ADV de massa m_2 e rigidez k_2 , de maneira que as equações que governariam tal dinâmica são apresentadas abaixo:

$$m_1 \ddot{x}_1 + (k_1 + k_2)x_1 - k_2 x_2 = F_1 \sin(\omega t) \quad \text{Equação 1}$$

$$m_2 \ddot{x}_2 - k_2 x_1 + k_2 x_2 = 0 \quad \text{Equação 2}$$

Como não existe amortecimento é possível estabelecer a resposta do sistema em função do tempo utilizando as amplitudes harmônicas X_1 e X_2 (Meirovitch, 2001), conforme mostram a **Equação 3** e a **Equação 4**.

$$x_1(t) = X_1 \text{sen}(\omega t) \quad \text{Equação 3}$$

$$x_2(t) = X_2 \text{sen}(\omega t) \quad \text{Equação 4}$$

A partir da utilização da **Equação 3** e da **Equação 4** respectivamente na Equação 1 e na Equação 2 pode-se estabelecer o comportamento do sistema:

$$-m_1 X_1 \omega^2 + (k_1 + k_2) X_1 - k_2 X_2 = F_1 \quad \text{Equação 5}$$

$$-m_2 X_2 \omega^2 - k_2 X_1 + k_2 X_2 = 0 \quad \text{Equação 6}$$

Resolvendo para X_1 e X_2 tem-se:

$$X_1 = \frac{(k_2 - \omega^2 m_2) F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \quad \text{Equação 7}$$

$$X_2 = \frac{k_2 F_1}{(k_1 + k_2 - \omega^2 m_1)(k_2 - \omega^2 m_2) - k_2^2} \quad \text{Equação 8}$$

Além disso, tomando as substituições:

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1}} \rightarrow \text{Frequência natural do sistema primário,}$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \rightarrow \text{Frequência natural do absorvedor dinâmico,}$$

$$x_{est} = \frac{F_1}{k_1} \rightarrow \text{Deflexão estática do sistema primário,}$$

$$\mu = \frac{m_2}{m_1} \rightarrow \text{Razão entre as massas do absorvedor e do sistema primário.}$$

Pode-se reescrever a **Equação 7** e a **Equação 8** como mostram a **Equação 9** e a **Equação 10** apresentadas abaixo:

$$X_1 = \frac{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)\right] x_{est}}{\left[1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad \text{Equação 9}$$

$$X_2 = \frac{x_{est}}{\left[1 + \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right] \left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right] - \mu \left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2} \quad \text{Equação 10}$$

Nota-se, através das equações 9 e 10, que a amplitude do sistema primário X_1 pode ser anulada quando o valor ω_2 da frequência natural do absorvedor dinâmico for o mesmo da frequência de excitação, de modo que o numerador da **Equação 9** seja igual a zero. Para que

isso acontece, é necessário especificar corretamente os parâmetros de massa e rigidez de tal dispositivo. A **Figura 13** e a **Figura 14** apresentam o comportamento oscilatório de sistemas desse tipo: a inserção do ADV ao sistema faz com que um pico de ressonância em determinada frequência seja anulado a partir do aumento da amplitude de vibração do ADV, com surgimento de 2 picos intermediários em valores de frequência adjacentes.

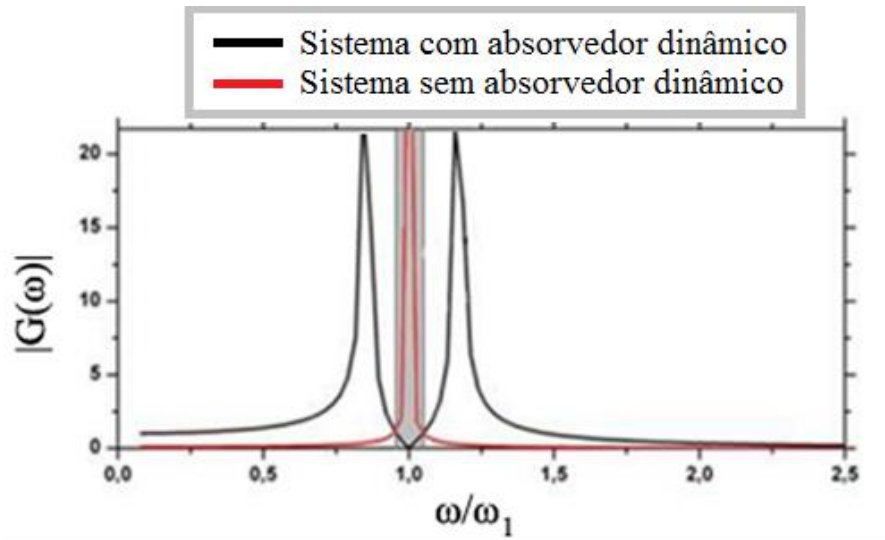


Figura 13: Amplitude do sistema primário segundo frequências de oscilação (Adaptado de Oliveira, 2011)

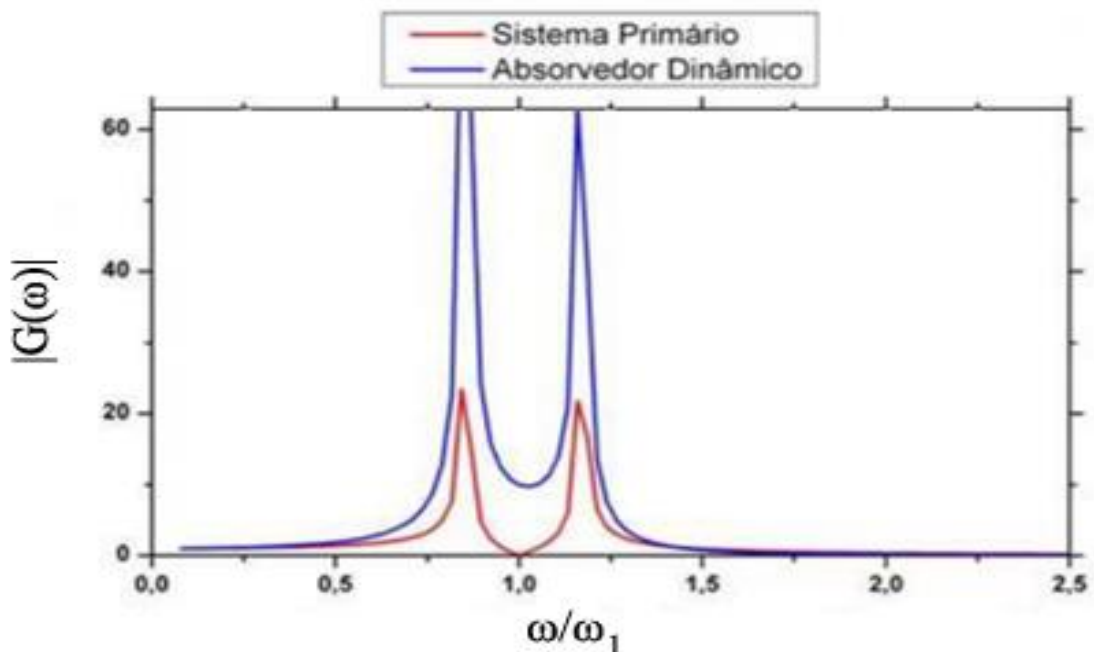


Figura 14: Amplitude do absorvedor dinâmico segundo frequências de excitação (Adaptado de Oliveira, 2011)

As propriedades dissipativas apresentadas por ADVs torna as ligas com memória de forma um material com grande potencial para aplicação nessa área, seja devido à capacidade dissipativa do comportamento histerético no regime pseudoelástico, seja por meio das mudanças das propriedades mecânicas decorrentes das transformações de fase. Sabe-se que a temperatura exerce grande papel na atuação das ligas de memória de forma, e por isso os tratamentos térmicos podem ser utilizados para potenciar ou abrandar seus resultados na aplicação de controle de vibrações.

2.2.1 Aplicações das Ligas com Memória de Forma em ADVs

Absorvedores dinâmicos de vibrações tradicionais são projetados para funcionar numa faixa estreita de frequência de excitação. (Oliveira, 2014). A limitada banda de atuação dos materiais tradicionais favorecem o desenvolvimento de aplicações que aproveitem do potencial dissipativo das ligas com memória de forma.

Tiseo et al. (2006) aplicam um fio de SMA fixado ao longo do diâmetro de uma estrutura cilíndrica no estudo de um Absorvedor Dinâmico de Vibrações Adaptativo (ADVA). Possuindo uma massa concentrada no centro, o absorvedor é adaptado para atuar na frequência desejada através do aquecimento do fio por passagem de corrente elétrica (**Figura 15**).



Figura 15: Absorvedor Dinâmico de Vibrações Adaptativo
(Tiseo, et al. 2006)

Com a fixação do dispositivo mostrado na **Figura 15** numa placa de alumínio aeronáutico excitada por um *shaker* de frequência variável e aquecendo o fio de SMA para ajustar sua frequência natural, Tiseo, et al. (2006) chegam a uma atenuação da ordem de 20 dB para valores de excitação entre 0 e 100 Hz.

Dhar, et al. (2015) apresenta diversas aplicações de ligas com memória de forma na absorção de vibrações em pontes: o uso de cabos de compressão de Níquel-Titânio como absorvedores numa modelagem de ponte exposta a oscilação sísmica, por exemplo, permitem reduzir as amplitudes de deslocamento da base da ponte em 65%, quando comparado com o comportamento do mesmo modelo sem os absorvedores SMA. Esse princípio foi utilizado na restauração da torre do sino da igreja *S. Giorgio*, afetada por um terremoto em 1996. Nesse caso, barras de ligas com memória de forma foram posicionadas ao longo da torre e fixadas em sua fundação para fortalecer a estrutura e aumentar as frequências de excitação suportadas pela edificação.

2.3 Tratamentos Térmicos em Ligas com Memória de Forma

O comportamento apresentado pelas ligas com memória de forma – destaque para ligas Nitinol – é extremamente influenciado pela temperatura de utilização do material, como mostram as seções anteriores desse documento. As temperaturas características e conseqüentemente as estruturas cristalográficas do material analisado influenciam diretamente nas suas propriedades mecânicas, que podem ser também alteradas através de tratamentos térmicos impostos ao material inteligente (Ten QEM REIS, 2001)

2.3.1 Transformações de Fase em Ligas com Memória de Forma

Tipicamente, as propriedades da uma liga Ni-Ti austenítica são consideravelmente distintas das propriedades da mesma liga na fase martensítica. A primeira, referente a uma maior temperatura, apresenta maior dureza, enquanto a segunda é maleável e facilmente deformável. Algumas das propriedades mecânicas de cada fase podem ser vistas na **Tabela 1**.

Tabela 1: Propriedades Mecânicas de Liga Ni-Ti Equiatômica padrão

	Austenita	Martensita
Módulo Young	30 – 83 GPa	20-45 GPa
Resistência à tração	800-1900 MPa	800-1900 MPa
Alongamento até falha	20-25%	20-25%
Coefficiente de Poisson	0,33	0,33

(Zanaboni, 2008)

A fase austenítica das ligas Ni-Ti é caracterizada por uma estrutura B2: cúbica de corpo centrado. Nesse arranjo um átomo de Níquel fica no centro de um cubo cristalográfico de átomos de Titânio em cada vértice. A fase martensítica é menos simétrica, com uma rede alinhada num formato próximo ao de um losango (Zanaboni, 2008). Essas diferenças são ilustradas pela **Figura 16**.

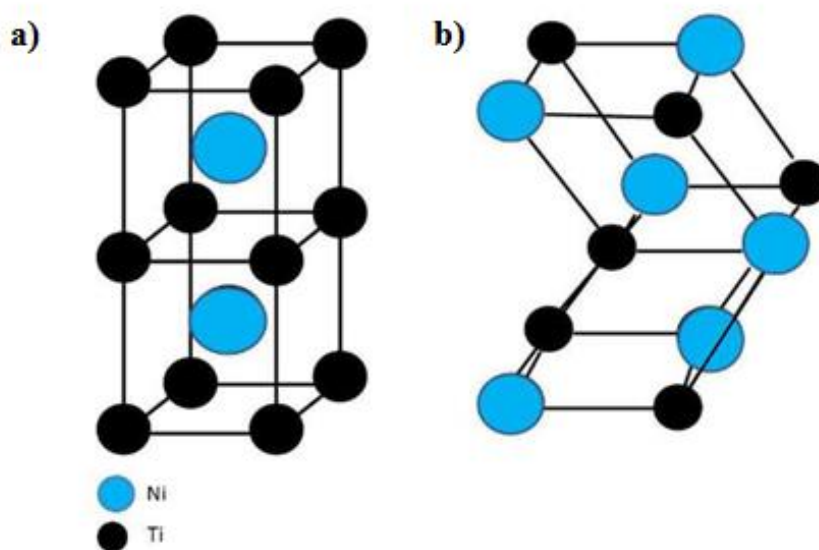


Figura 16: Cristalografia. a) austenítica b) martensítica
(Zanaboni, 2008)

Apesar do caráter difásico já citado como característica das ligas com memória de forma, em algumas circunstâncias – trabalho frio, ciclos ou tratamentos térmicos, por exemplo – é possível presenciar uma fase intermediária que se diferencia dos dois arranjos mostrados na **Figura 16**. É conhecida como fase romboédrica ou fase-R.

O resfriamento do material sem carga aplicada permite que a fase austenítica seja transformada em martensítica, numa transformação direta. Essa mudança pode gerar até 24 variantes martensíticas no caso de uma Liga Ni-Ti, por exemplo (Kumar & Lagoudas, 2011). A mudança macroscópica de forma é no entanto desprezível, e por isso trata-se de martensita maclada. A transformação reversa ocorre quando, a partir de um aquecimento, a estrutura cristalográfica retorna à fase austenítica.

Ao aplicar carregamento num material a baixa temperatura (fase de martensita maclada), pode-se reorientar os cristais microscópicos e demaclar a estrutura, de maneira que ocorra mudança na forma macroscópica da peça, mesmo após a retirada do carregamento (Kumar & Lagoudas, 2011).

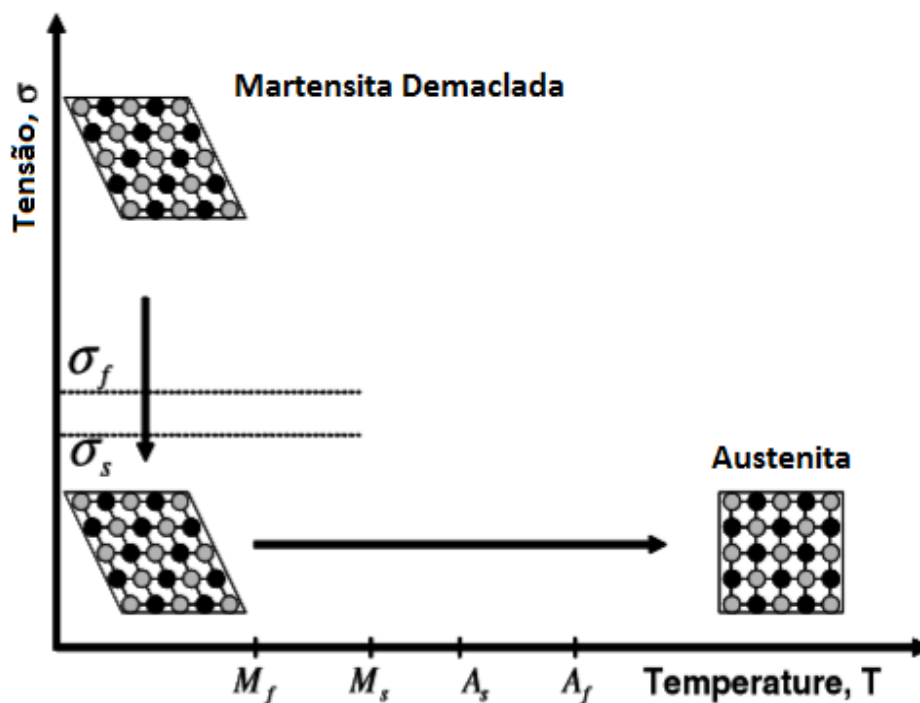


Figura 17: Carregamento na fase Martensítica
(Adaptado de Kumar & Lagoudas, 2011)

Quando o carregamento ocorre acima da temperatura A_s o material apresenta comportamento pseudoelástico, como já citado em seção anterior. Realizar ciclos de carregamento numa liga com memória de forma a temperatura constante acima da temperatura austenítica torna possível presenciar o efeito do treinamento. Machado & Lagoudas (2008) defendem que o treinamento ocorre através da realização de grande número de ciclos de carregamento mecânico. As repetidas mudanças na microestrutura são refletidas macroscopicamente no comportamento do metal, de maneira que é necessário repetir os ciclos sobre a liga de memória de forma até que a resposta histerética se estabilize, com a curva

inelástica. Aplicar tensões de até 800 Mpa repetidamente num fio de Ni-Ti numa temperatura $T = 70^{\circ}\text{C}$ ($A_f = 65^{\circ}$) torna possível estabilizar a curva num ciclo final, treinado, conforme mostra a **Figura 18**.

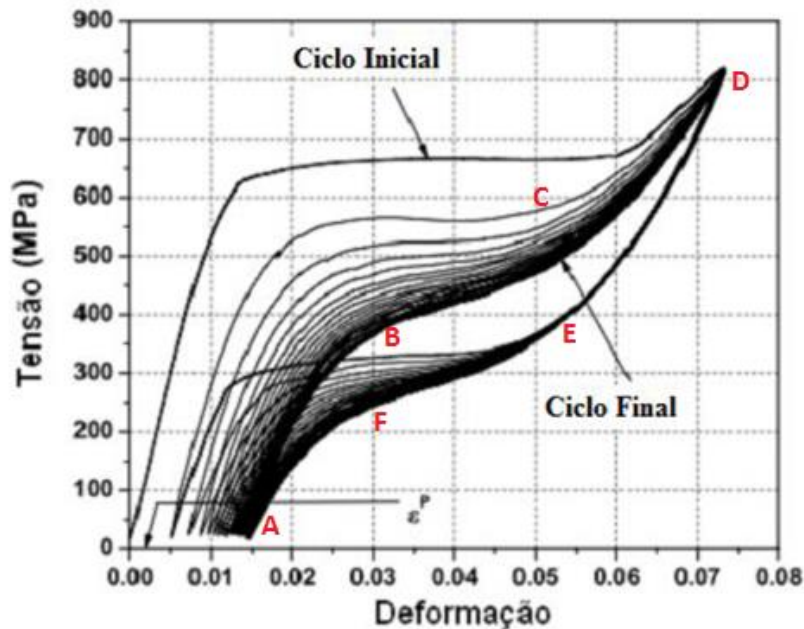


Figura 18: *Treinamento de fio Ni-Ti a partir de 50 ciclos de deformação*
(Adaptado de Lagoudas, 2008)

O ciclo completo apresentado pela **Figura 18** resulta em uma curva de histerese em que há dissipação de energia, representada pela área entre os pontos ABCD e AFED. Segundo Lagoudas (2008), as tensões mínimas para transformação de fase e a caracterização da curva de histerese ‘tensão x deformação’ variam bastante de acordo com o tipo de liga utilizada e com as condições de ensaio. Diferentes tratamentos térmicos acarretam diferentes curvas de histerese para uma determinada liga. No controle de vibrações, em que se busca uma maior dissipação de energia, o tratamento térmico da liga é efetuado de maneira a potencializar a área entre ABCD e AFED da curva de uma liga após treinamento e estabilização (representados na **Figura 18**). O foco desse trabalho será a caracterização e análise do laço de histerese desenvolvido por ligas Ni-Ti expostas a diferentes tratamentos térmicos.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No contexto deste trabalho, as ligas com memória de forma são caracterizados segundo suas temperaturas de transformação e laço de histerese em regime pseudoelástico.

Para a investigação dos efeitos causados por diferentes tratamentos térmicos em ligas nitinol 21 molas (**Figura 19**) com as características apresentadas pela **Tabela 2** são tratadas termicamente em processos de solubilização – elevação da temperatura até o ponto em que os átomos da amostra se dissolvem em uma matriz homogênea (Fuentes & Gumpel, 2002) – e envelhecimento.

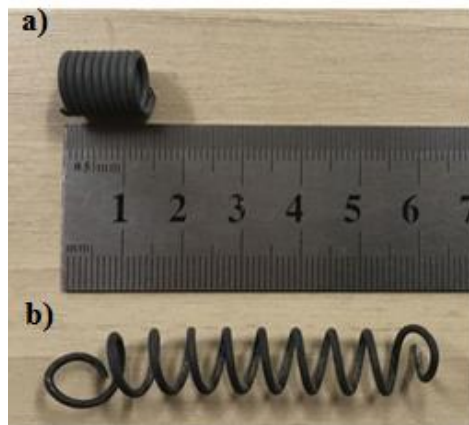


Figura 19: Molas Ni-Ti. a) mola B original b) mola B ensaiada

Tabela 2: Características das Molas

	Mola A	Mola B
Nº de amostras	5	16
Composição	Ni50,7-Ti	Ni50,7-Ti
Diâmetro do fio	1,25 mm	1,25 mm
Diâmetro da espira	9,7 mm	9 mm
Passo	1,22 mm	1,25 mm
Comprimento	12,7 mm	12 mm

Após a realização dos diferentes tratamentos térmicos (detalhados no subitem seguinte), a primeira etapa da caracterização consiste em determinar as temperaturas de transformação (M_s , M_f , A_s e A_f) e da fase R (romboédrica), caso ocorra (Ten QEM REIS, 2001), das molas de SMA sujeitas aos tratamentos térmicos. A calorimetria diferencial por varredura (DSC) é utilizada para atender tal finalidade. Nesse método quantifica-se a quantidade de calor emitida ou absorvida pela amostra durante a mudança de fase. No caso das ligas Ni-Ti ocorre uma

reação endotérmica na formação da fase austenítica, ao aquecer o material. No resfriamento, em que ocorre a mudança de fase com formação de martensita, observa-se reação exotérmica.

Para análise do comportamento histerético das ligas estudadas em regime pseudoelástico aplicam-se ensaios quase-estáticos. Como as temperaturas A_f das ligas estudadas já foram determinadas previamente pelos ensaios por DSC, é possível garantir que os ensaios sejam conduzidos dentro da fase austenítica do material, em que o fenômeno da pseudoelasticidade se faz presente. Em uma temperatura constante acima de A_f aplicam-se 200 ciclos idênticos de carregamento e descarregamento nas molas Ni-Ti de maneira a estabilizar o laço de histerese através do treinamento da liga. O potencial dissipativo do material, obtido através da área do laço de histerese, pode ser analisado segundo o tratamento térmico realizado.

3.1 Tratamentos Térmicos

Para realização dos tratamentos utiliza-se o forno elétrico (**Figura 20**) disponível no Laboratório de Vibrações do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília, cujas características são apresentadas na **Figura 21**.



Figura 20: Forno Jung FO8080

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

Figura 21: Características do Forno Jung FO8080

Conduzem-se 21 tratamentos térmicos tipificados pela solubilização a 700 °C seguida de têmpera em água a temperatura ambiente. Após a realização da têmpera, 20 amostras são expostas a diferentes tratamentos térmicos de envelhecimento seguido de têmpera em água a temperatura ambiente, conforme mostra a **Tabela 3**.

Tabela 3: Tratamentos térmicos realizados

Amostra	Temperatura de Solubilização	Temperatura de Envelhecimento	Tempo de Envelhecimento
A0	700°C	-	-
B1	700 °C	300 °C	30 minutos
B2	700 °C	300 °C	60 minutos
B3	700 °C	300 °C	90 minutos
B4	700 °C	300 °C	120 minutos
A1 e B5	700 °C	400 °C	30 minutos
A2 e B6	700 °C	400 °C	60 minutos
A3 e B7	700 °C	400 °C	90 minutos
A4 e B8	700 °C	400 °C	120 minutos
B9	700 °C	500 °C	30 minutos
B10	700 °C	500 °C	60 minutos
B11	700 °C	500 °C	90 minutos
B12	700 °C	500 °C	120 minutos
B13	700 °C	600 °C	30 minutos
B14	700 °C	600 °C	60 minutos
B15	700 °C	600 °C	90 minutos
B16	700 °C	600 °C	120 minutos

Na codificação apresentada na **Tabela 3**, a letra referente a cada amostra remete às características da mola (conforme apresentado na **Tabela 2**). No caso dos tratamentos térmicos realizados a 400°C são usadas 2 amostras para cada tempo de envelhecimento, totalizando 8 molas. Em todos os tratamentos térmicos realizados houve a inserção, junto da mola, de pequena amostra do mesmo material, para que fossem conduzidos os ensaios DSC necessários à determinação das temperaturas de transformação das ligas com memória de forma.

3.2 Análise Diferencial Calorimétrica (DSC)

Para avaliar a influência dos tratamentos térmicos, apresentados na **Tabela 3**, nas temperaturas de transformação são conduzidas varreduras diferenciais calorimétricas. O aparelho utilizado para tais varreduras é semelhante ao mostrado na **Figura 22**.



Figura 22: Aparelho DSC-8000 Perkin Elmer

O núcleo térmico de um dispositivo DSC possui duas células, uma referencial e outra amostral, mantidas à mesma temperatura. Segundo a orientação da ASTM (ASTM: F 2004 – 05) devem ser utilizadas amostras de aproximadamente 15 mg, com aquecimento da amostra até pelo menos $A_f + 30$ °C e resfriamento até $M_f - 30$ °C. Deve-se esperar que ocorra o equilíbrio entre o material analisado e o equipamento. Após tal resfriamento, deve-se aquecer novamente até pelo menos $A_f + 30$ °C registrando os resultados obtidos durante o aquecimento e resfriamento realizados. Nos ensaios realizados o intervalo de temperaturas na varredura é de -70 °C a 100 °C, com variação de 20 °C/min.

3.3 Ensaio quase-estáticos

Para a obtenção da curva de histerese do material são conduzidos ensaios quase-estáticos, conforme mencionado anteriormente. Para isso, utiliza-se um aparato experimental disponível no Laboratório do Grupo de Dinâmica de Sistemas (GDS) do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília. Esse aparato é constituído de estufa aquecida através de placas Peltier, célula de carga para medir o carregamento aplicado através do bombeamento de água ao sistema de tração da mola e dispositivo laser para medir a deformação da mola de acordo com o nível de carga aplicado. Uma representação esquemática da estufa pode ser vista na **Figura 23**.

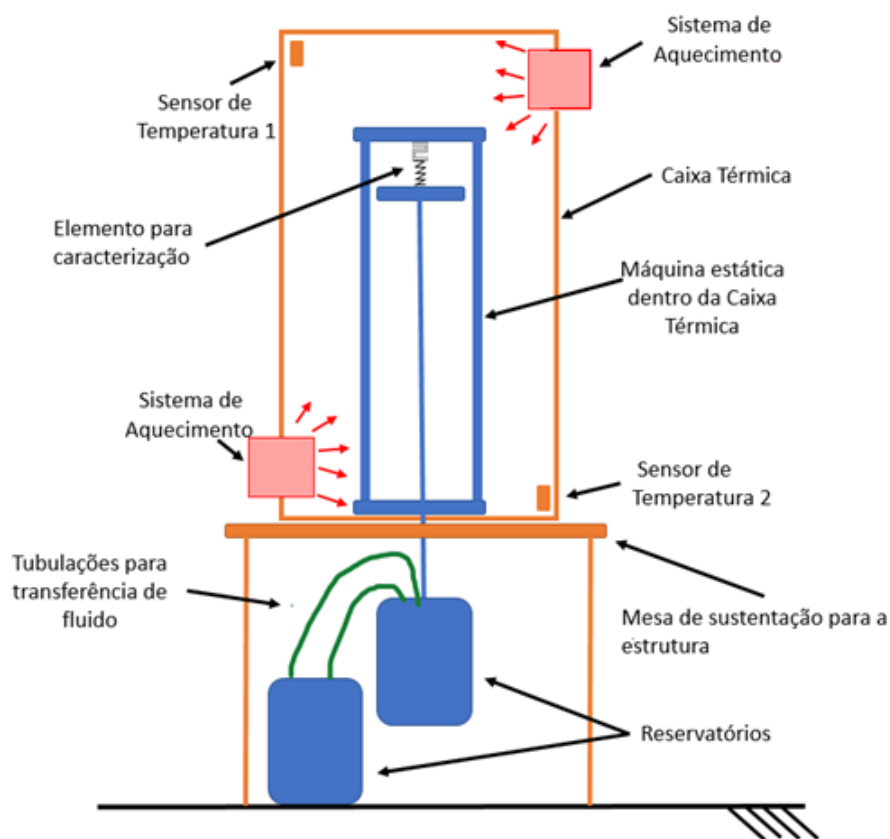


Figura 23: Aparato experimental de ensaio quase-estático.

A utilização dessa estufa e seus módulos Peltier permitem alcançar temperaturas de até 70 °C, de maneira a garantir que os carregamentos realizados ocorram dentro da fase austenítica da liga utilizada, previamente determinada através da análise DSC. No interior da estufa, então, encontra-se um eixo de carregamento com gancho para fixação da mola monitorada pela célula de carga e dispositivo óptico. A fixação da mola é feita conforme mostra a **Figura 24**.



Figura 24: Detalhe da fixação da mola e célula de carga.

Para controle desse experimento utiliza-se algoritmo específico e uma placa Arduino Mega. Essa placa controladora é responsável por monitorar a temperatura da estufa e mantê-la constante com auxílio dos módulos Peltier. Além disso, controla a aplicação da carga de tração na mola através de um sistema de bombeamento em vasos comunicantes. Nesse sistema, a carga aplicada é o peso da água bombeada continuamente de um vaso reservatório para um vaso de carga. Ao atingir a força de tração desejada (medida pela célula de carga), o vaso carga pode ser esvaziado automaticamente para iniciar um novo ciclo de carregamento. Durante todo o experimento o dispositivo óptico (laser) monitora o deslocamento apresentado pela mola. Os dados de temperatura, carga e deslocamento são registrados ao longo do tempo.

Os procedimentos adotados para a realização do experimento são descritos a seguir:

1. Fixação da mola tratada termicamente no aparato para ensaio de tração;
2. Isolamento térmico da estufa;
3. Configuração dos valores de temperatura na estufa para um valor superior a A_f ;
4. Definição da carga a ser aplicada;
5. Definição do número de ciclos de carga a ser realizado.

Nesse trabalho são realizados 200 ciclos de carregamento quase-estático para o treinamento das molas e consequente estabilização das curvas de histerese apresentadas regime pseudoelástico, ou seja, os ensaios são realizados a uma temperatura acima de A_f .

Em resumo, o fluxo de trabalho desenvolvido pode ser resumido pelo fluxograma da **Figura 25**.

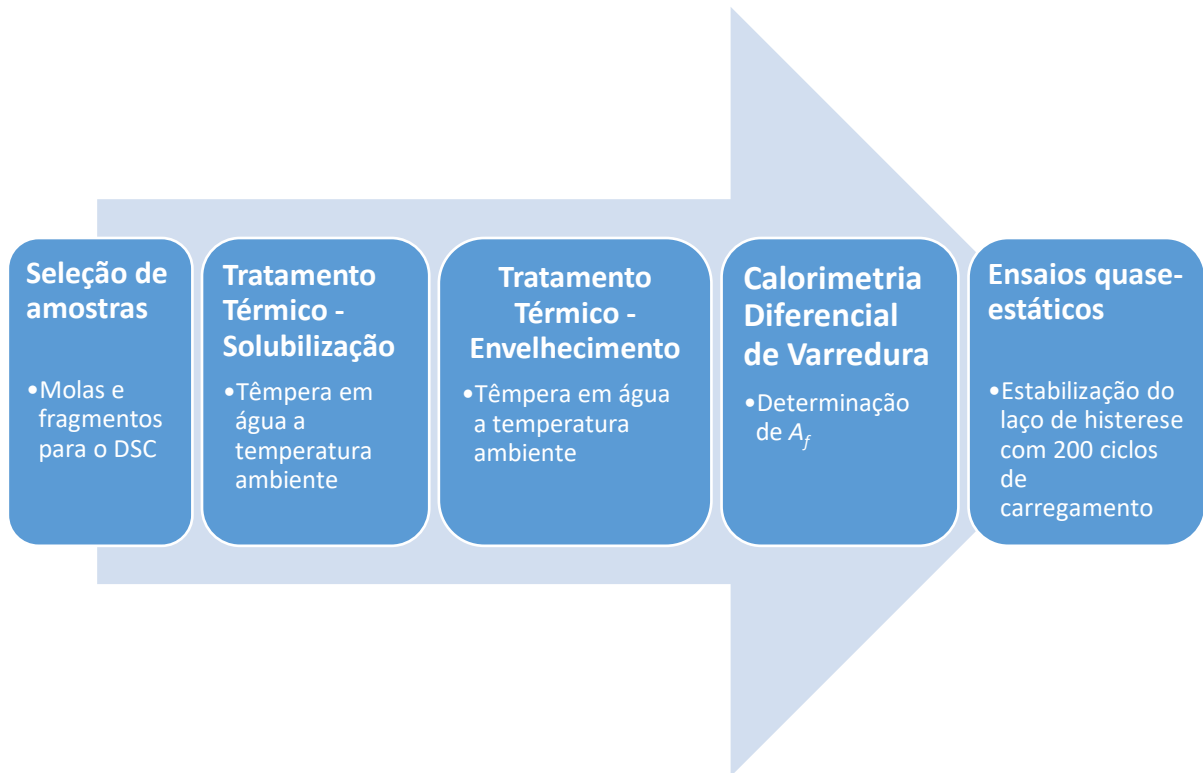


Figura 25: Fluxo dos procedimentos experimentais

4 RESULTADOS

Investiga-se o potencial dissipativo do material segundo seu tratamento térmico, de maneira que são apresentados os laços de histerese obtido no estudos.

4.1 Temperaturas características

Os tratamentos térmicos realizados estão descritos na **Tabela 3** com solubilização a 700 °C e diferentes tempos de envelhecimento. A subsequente análise DSC permite visualizar as temperaturas características para cada tratamento realizado. Como mencionado na seção anterior, a transformação de fase com formação de austenita absorve calor, de maneira que picos endotérmicos indicam a temperatura em que se inicia a formação de austenita (A_s) e que se completa a austenitização (A_f). A martensita, por sua vez, libera calor, de maneira que picos exotérmicos indicam as temperaturas de início (M_s) e final (M_f) da formação martensítica durante o resfriamento da amostra. Os resultados obtidos através da calorimetria diferencial por varredura para cada uma das molas do tipo A podem ser vistos nas Figuras 26, 27, 28 e 29.

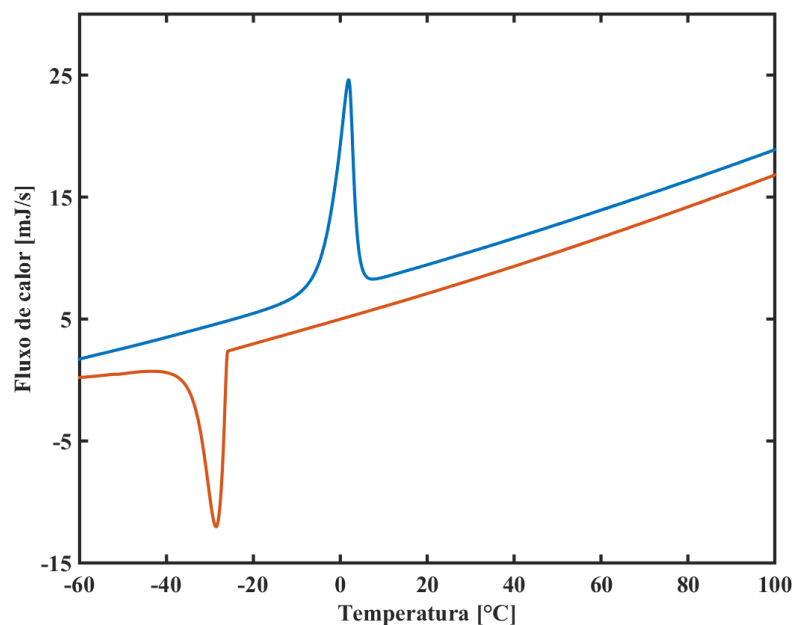


Figura 26: Temperaturas caraterísticas e picos obtidos por meio de calorimetria diferencial por varredura (DSC) para amostra A

Na Figura 26, que apresenta o resultado da mola apenas solubilizada, os picos exotérmicos e endotérmicos são bem definidos. Nesse caso, a austenita começa a ser formada no início do pico positivo de fluxo de calor. Ao fim desse pico em que calor é absorvido existe apenas a fase austenítica no material. Durante o resfriamento ocorre o pico negativo do fluxo de calor, em que, numa reação exotérmica, inicia-se a transformação martensítica. Em temperaturas inferiores a esse pico existe apenas fase martensítica.

Para as ligas envelhecidas considera-se a formação de precipitados Ti_3Ni_4 que favorecem a formação da fase de transição, romboédrica (fase R) (Lekston & Zubko, 2015). Por isso a **Figura 26** apresenta 3 picos exotérmicos (fluxo negativo de calor): o primeiro pico do resfriamento (próximo a 30 °C) representa a transformação de austenita para fase R. A transformação para fase martensítica ocorre abaixo de -40 °C, quando a fase -R se transforma em martensita (último pico exotérmico).

No caso específico da liga envelhecida por 30 minutos considera-se a existência de uma maior concentração de precipitados Ti_3Ni_4 nos contornos dos grãos do que em seu interior, o que faz com que apareça um pico intermediário de liberação de calor próximo ao valor apresentado pela liga solubilizada (Lekston & Zubko, 2015). Esse pico representa a transformação direta de austenita para martensita que ocorre no interior dos grãos, onde os precipitados não interferem.

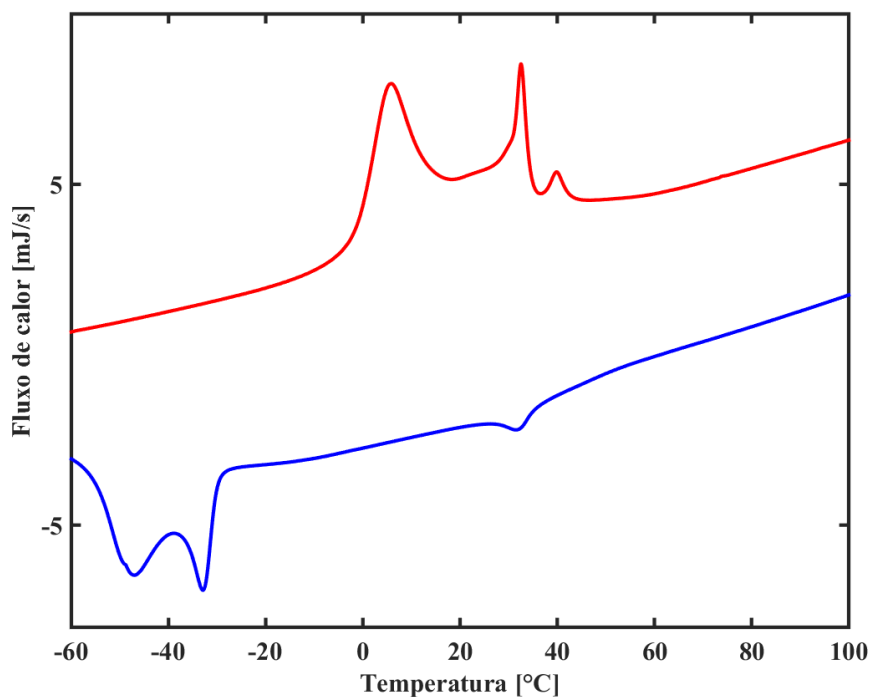


Figura 26: Temperaturas características e picos obtidos por meio de análise diferencial calorimétrica (DSC) para Al

Para as análises diferenciais calorimétricas realizadas para as ligas envelhecidas por tempo superior a 30 minutos nota-se a existência de apenas dois picos. Como dito anteriormente, representam a existência da fase R: O pico da temperatura mais baixa representa M_s e M_f , o pico da temperatura mais alta representa A_s e A_f e picos intermediários representam início e final da formação romboédrica (**Figura 27**, **Figura 28** e **Figura 29**).

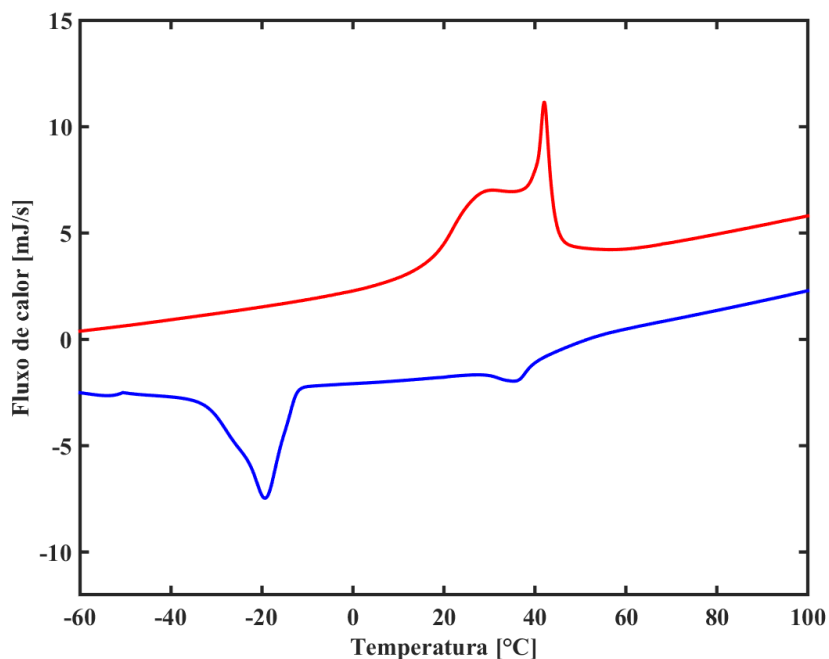


Figura 27: *Temperaturas caraterísticas e picos obtidos por meio de análise diferencial calorimétrica (DSC) para amostra A2*

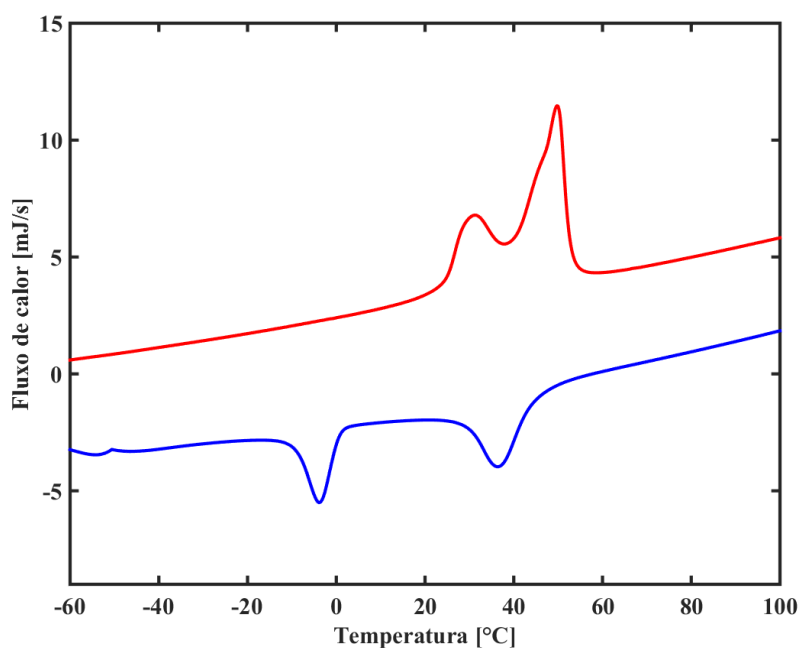


Figura 28: *Temperaturas caraterísticas e picos obtidos por meio de análise diferencial calorimétrica (DSC) para amostra A3*

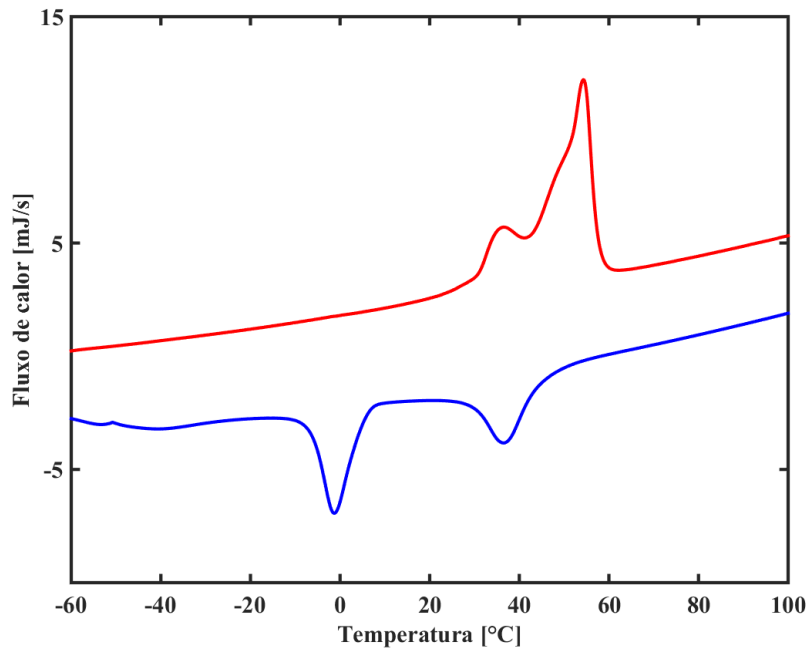


Figura 29: Temperaturas caraterísticas e picos obtidos por meio de análise diferencial calorimétrica (DSC) para amostra A4

O procedimento de análise apresentado acima para as 5 amostras da mola A foi realizado de maneira análoga também para as 16 amostras da mola B através dos gráficos obtidos com a realização do DSC, mas foram aqui omitidos devido à semelhança de análise. Para os objetivos do presente trabalho, a informação mais importante obtida através do DSC é a temperatura de austenitização final (A_f). Através de sua determinação garante-se, através da imposição de temperatura adequada, o regime pseudoelástico nos ensaios quase-estáticos, necessariamente conduzidos na fase austenítica das molas. Os valores obtidos para A_f de cada amostra estão ilustrados no gráfico de dispersão apresentado na **Figura 30** e explicitados na **Tabela 4**.

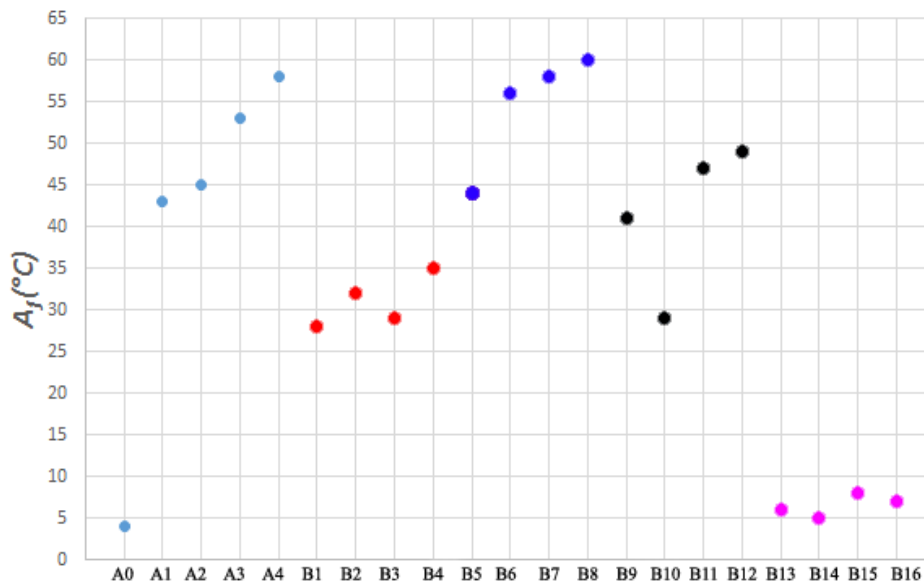


Figura 30: Dispersão das Temperaturas A_f

Tabela 4: Temperatura de austenitização final segundo tratamento térmico

Amostra	Temperatura de Envelhecimento	Tempo de envelhecimento	de A_f
A0	-	-	4°C
A1	400 °C	30 min	43 °C
A2	400 °C	60 min	45 °C
A3	400 °C	90 min	53 °C
A4	400 °C	120 min	58 °C
B1	300 °C	30 min	28 °C
B2	300 °C	60 min	32 °C
B3	300 °C	90 min	29 °C
B4	300 °C	120 min	35 °C
B5	400 °C	30 min	44 °C
B6	400 °C	60 min	56 °C
B7	400 °C	90 min	58 °C
B8	400 °C	120 min	60 °C
B9	500 °C	30 min	41 °C
B10	500 °C	60 min	29 °C
B11	500 °C	90 min	47 °C
B12	500 °C	120 min	49 °C
B13	600°C	30 min	6 °C
B14	600°C	60 min	5 °C
B15	600°C	90 min	8 °C
B16	600°C	120 min	7°C

4.2 Caracterização estática

Os ensaios quase-estáticos das molas tratadas são realizados segundo carga prescrita de 45 N utilizando o aparato ilustrado pela **Figura 23**. Aplicam-se 200 ciclos de carregamento para a estabilização da curva de histerese apresentada por cada uma das molas. A **Tabela 5** sumariza as configurações utilizadas nos ensaios. É válido destacar que os ensaios foram realizados numa temperatura cerca de 10 °C acima de A_f para todas as amostras, com exceção daquelas em que A_f foi definida abaixo da temperatura ambiente. Nesse caso os ensaios foram feitos a 30°C.

Tabela 5: Configuração para ensaios quase-estáticos

Número de Ciclos	205
Carga prescrita	45 N
Tempo por ciclo	8 min
Temperatura	Acima de A_f

A **Figura 32** apresenta as curvas de histerese obtidas para as amostras A0, A1, A2, A3 e A4 ao fim da estabilização (200 ciclos de carga). A dissipação de energia é obtida a partir da área do laço de histerese, calculada em rotina desenvolvida no Matlab para integração numérica. Dessa maneira a dissipação de energia devido à histerese pôde ser apresentada na **Figura 33**.

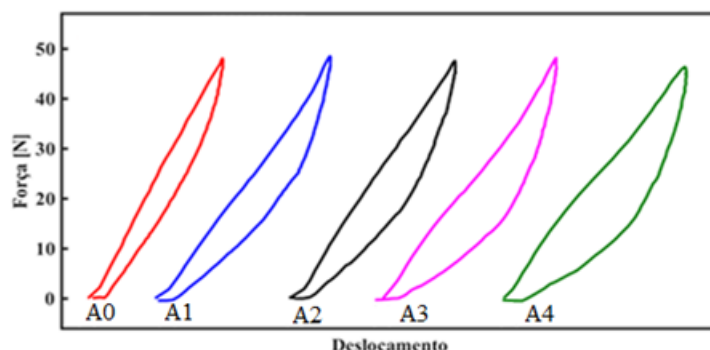


Figura 32: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45N

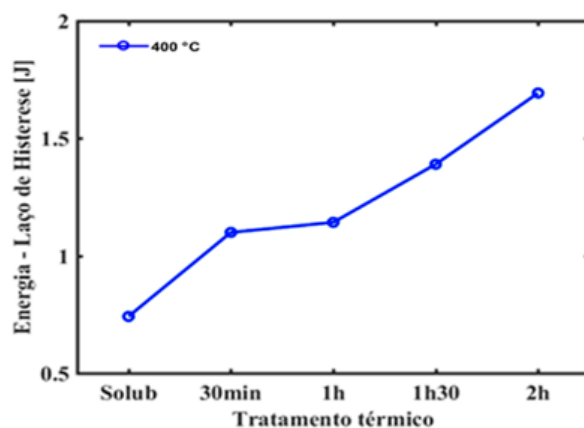


Figura 33: Dissipação de energia por ciclo para molas A

A **Figura 34** apresenta as curvas de histerese obtidas para as molas B1, B2, B3 e B4, e a **Figura 35** mostra a dissipação de energia obtida com cada uma.

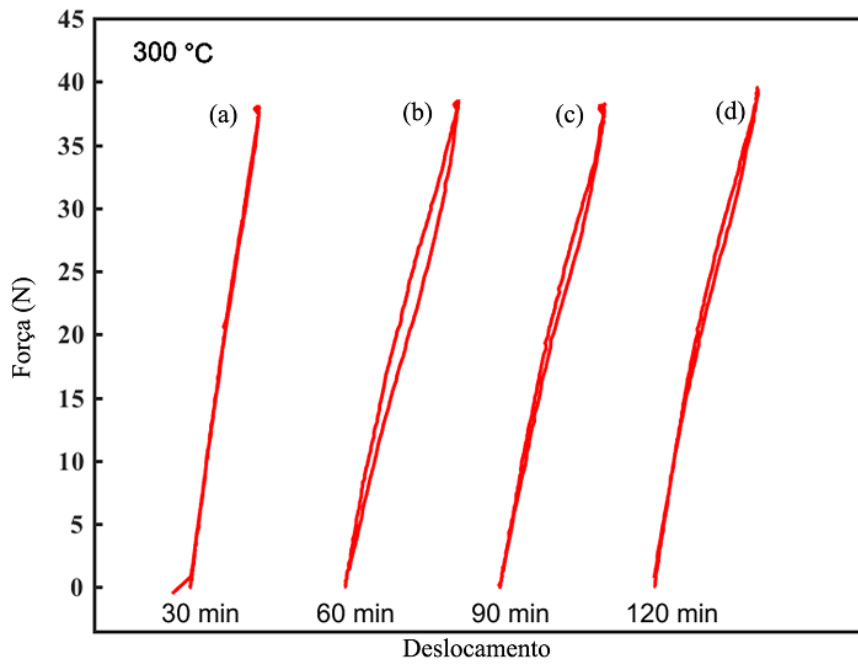


Figura 34: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B. (a) B1; (b) B2; (c) B3; (d) B4

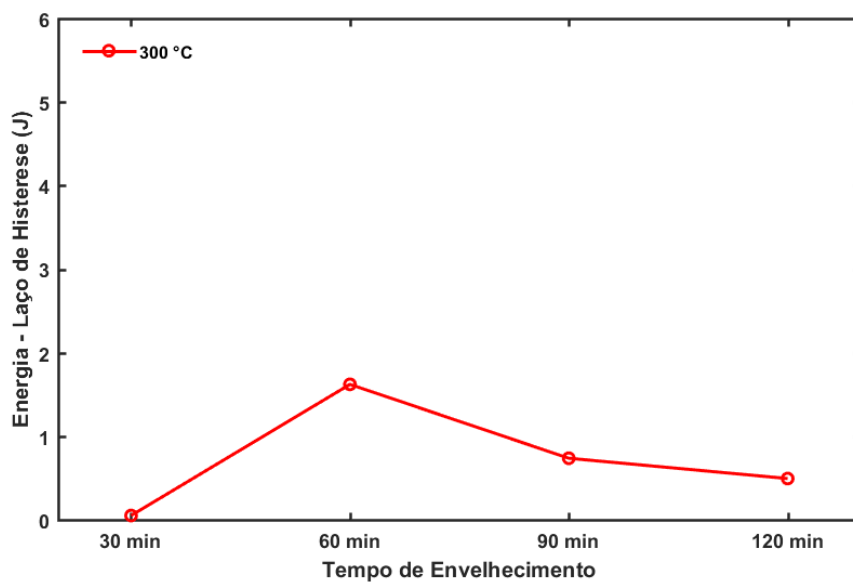


Figura 35: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4.

A **Figura 36** apresenta as curvas de histerese obtidas para as molas B5, B6, B7 e B8, enquanto a **Figura 37** mostra a dissipação de energia obtida com cada uma.

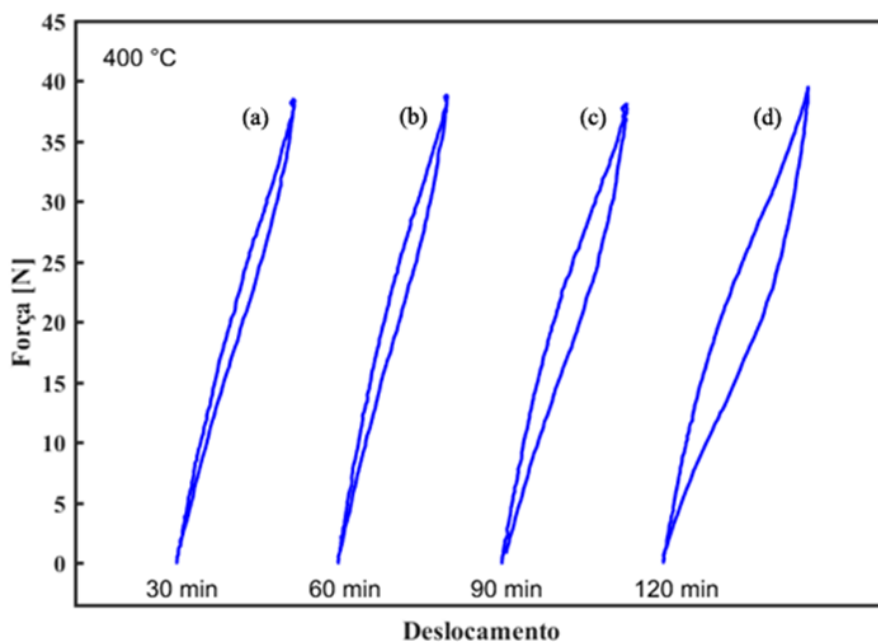


Figura 36: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B.

(a) B5; (b) B6; (c) B7; (d) B8

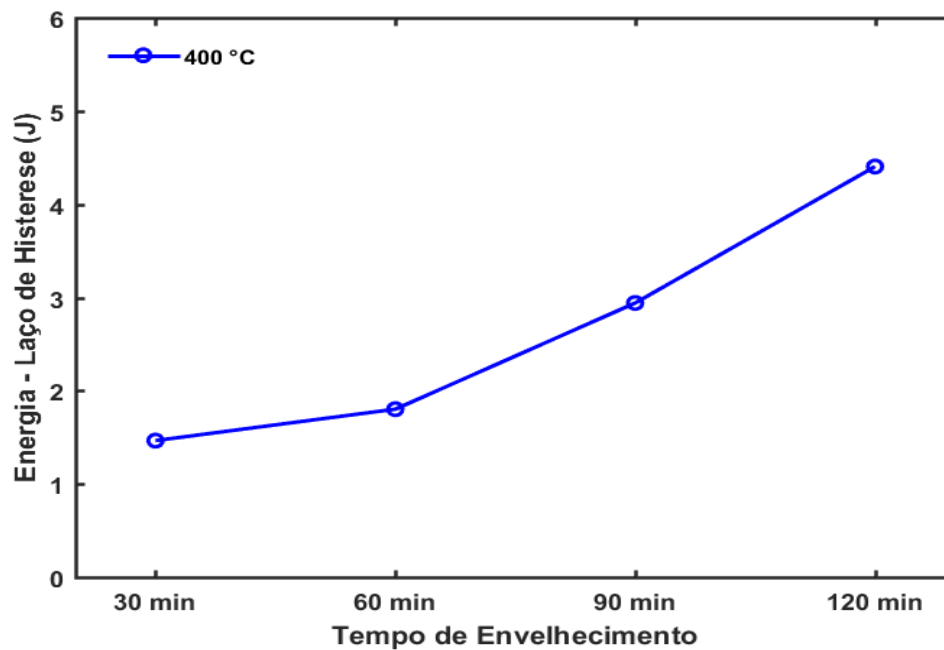


Figura 37: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4.

A **Figura 38** apresenta as curvas de histerese obtidas para as molas B9, B10, B11 e B12, e a **Figura 39** mostra a dissipação de energia obtida com cada uma.

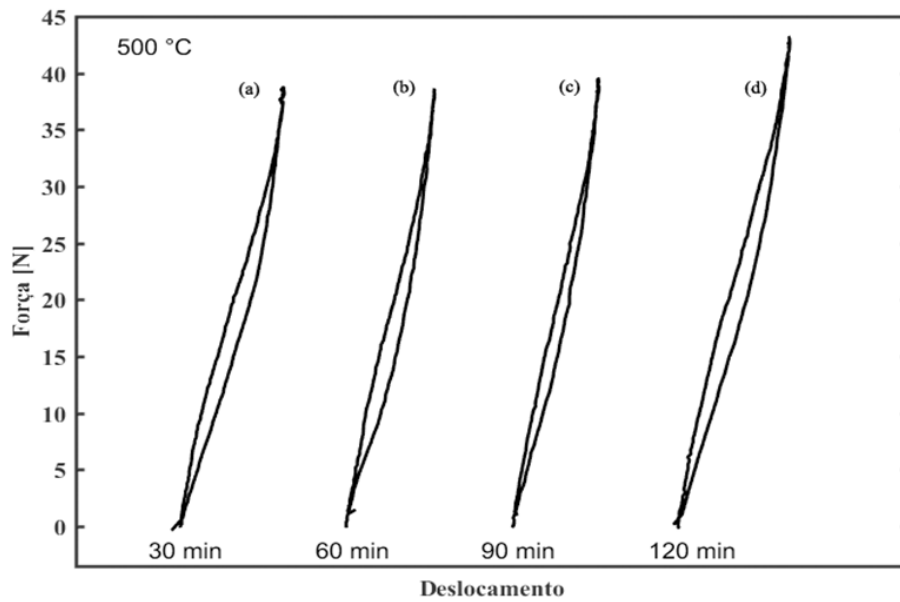


Figura 38: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B. (a) B9; (b) B10; (c) B11; (d) B12

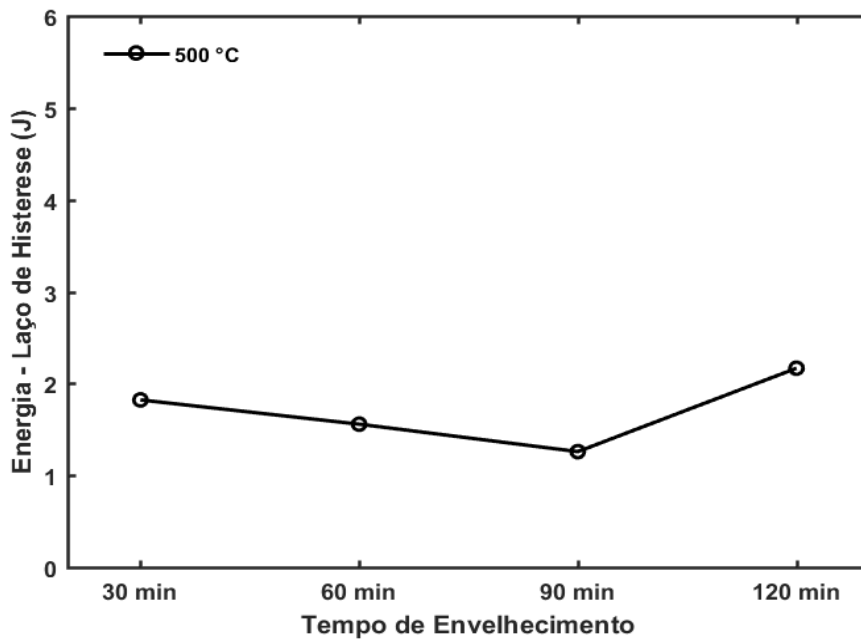


Figura 39: Dissipação de energia por ciclo para as molas B1, B2, B3 e B4

A **Figura 40** apresenta as curvas de histerese obtidas para as molas B13, B14, B15 e B16, enquanto a **Figura 41** mostra a dissipação de energia obtida com cada uma.

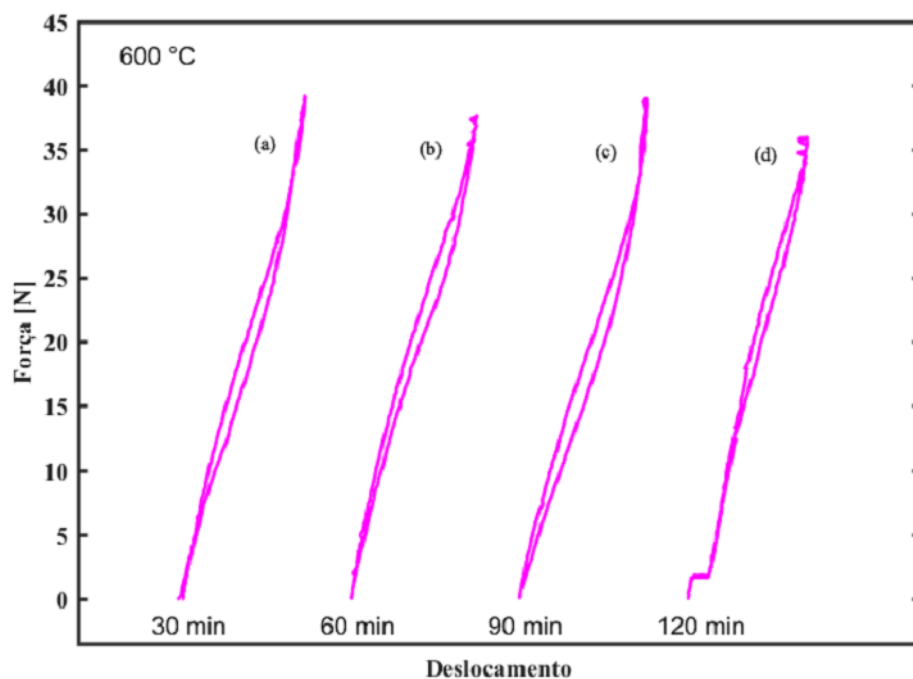


Figura 40: Laço de histerese obtido após carga máxima prescrita de 45 N nas molas B. (a) B13; (b) B14; (c) B15; (d) B16

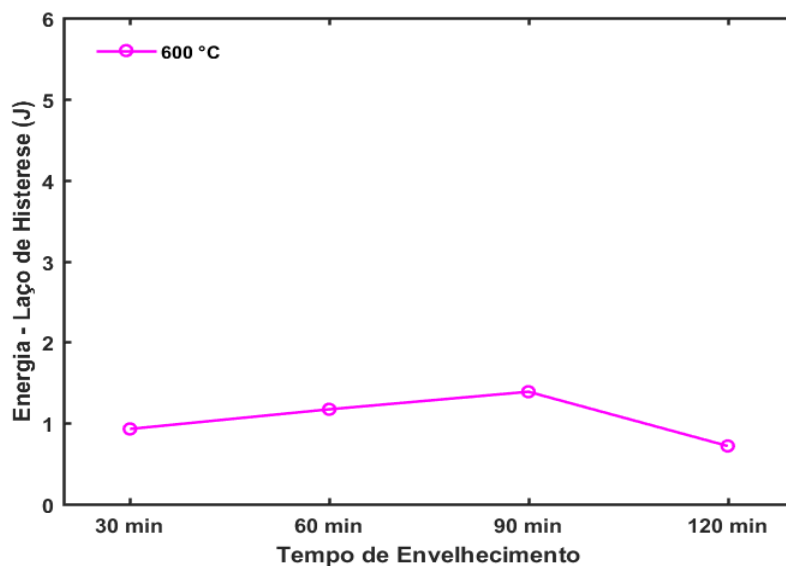


Figura 41: Dissipação de energia por ciclo para as molas B13, B14, B15 e B16.

Os resultados apresentados nas **Figuras 32 a 41** observa-se que o tratamento térmico que aumenta a dissipação de energia através do laço de histerese é o de envelhecimento a 400 °C. Nessa temperatura há uma relação diretamente proporcional entre a área histerética e o tempo de envelhecimento. Tal comportamento é constatado nos dois tipos de molas ensaiados

(molas A e molas B) e fortalece as indicações existentes na literatura que recomendam a realização de envelhecimento nessa faixa de temperatura (próximo a 400 °C) para a obtenção da máxima área dos laços de histerese em ligas Ni-Ti (Frick, et al., 2005). Nesse estudo a máxima área de laço possível não foi determinada, pois além do crescimento da curva histerética houve também elevação dos valores de A_f proporcional ao tempo de envelhecimento das amostras, de maneira que o limite de temperatura de ensaio do aparato experimental utilizado foi atingido.

Referências bibliográficas que pudessem auxiliar na análise da influência no tamanho do laço de histerese das amostras envelhecidas nas demais temperaturas estudadas não foram encontradas. Para a temperatura de 300°C observa-se uma maior área de histerese para 60 minutos de envelhecimento, logo, não se verifica uma tendência de aumento de área com o aumento de tempo de envelhecimento como ocorre para o caso de 400°C. Nos casos das temperaturas de 500°C e 600°C, as variações das áreas foram menores. Os resultados para as temperaturas diferentes de 400°C foram menos conclusivos, por não apresentarem uma tendência clara e pela variação da área de histerese ser pequena. Para avaliar a consistência desses resultados, e avaliar se essas variações de área ocorrem devido às diferenças dos tratamentos térmicos ou a erros e limitações experimentais, faz-se necessário um estudo mais aprofundado, envolvendo análise estatística. Para isso, uma quantidade maior de amostras para cada temperatura de envelhecimento é necessária. Consideradas essas ressalvas, uma comparação direta entre as amostras ensaiadas confirma as informações da literatura (Frick, et al., 2005) quanto ao efeito positivo na capacidade de dissipação de energia da liga Ni-Ti quando tratada termicamente num processo de envelhecimento a 400 °C (**Figura 42**)

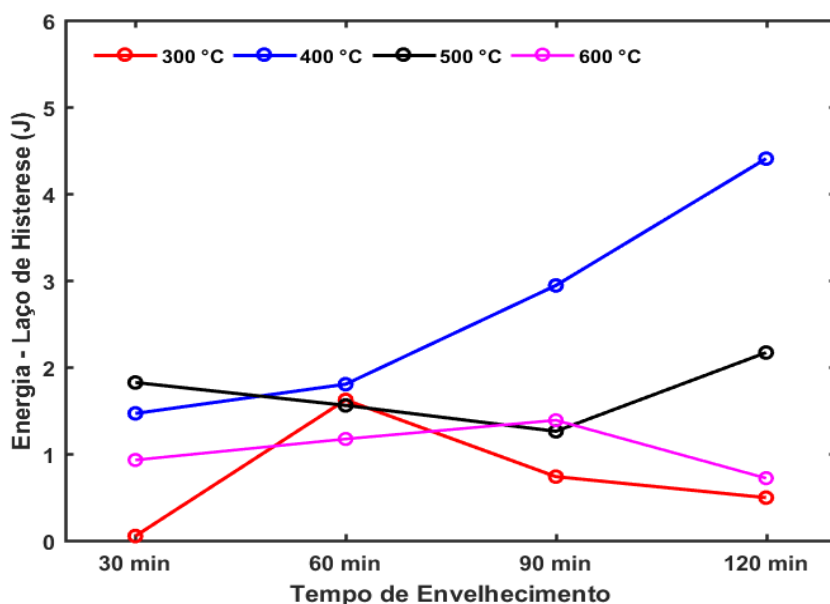


Figura 42: Comparação da energia dissipada por amostra

5 CONCLUSÕES

O comportamento peculiar das ligas com memória de forma é suficiente para motivar a realização de diversos estudos acerca de possíveis aplicações desse tipo de material. Ligas Ni-Ti pseudoelásticas, em especial, apresentam um caráter extremamente dissipativo quando carregadas mecanicamente. Esta característica faz com que molas pseudoelásticas e o seu potencial para absorver passivamente vibrações indesejadas sejam o foco desse estudo.

A caracterização do comportamento mecânico de molas Ni-Ti a fim de determinar a curva de histerese produzida pelos ciclos de carregamento e descarregamento da liga, após os diferentes tratamentos térmicos realizados, permitiu confirmar o grande potencial que ligas Ni-Ti possuem para aplicações como absorvedoras de vibrações, especialmente quando termicamente tratadas em processos de envelhecimento a 400 °C. Para esse caso foi constatado que o laço de histerese apresentado pelas molas quando expostas a ciclos de carregamento aumentou sua área numa relação diretamente proporcional ao tempo de envelhecimento aplicado, atingindo maior valor para a amostra envelhecida por 120 minutos. Dentre os tratamentos a 300 °C o valor máximo de área histerética foi atingido pela amostra envelhecida durante 60 minutos.

Amostras envelhecidas a 500 °C e 600 °C durante 30, 60, 90 e 120 minutos também foram analisadas neste estudo, mas não foi possível estabelecer uma relação direta entre o tamanho do laço de histerese e o tempo de envelhecimento. As curvas histeréticas apresentaram área tão pequenas que faz-se necessária uma análise estatística para verificar a consistência dos resultados. Esta análise, no entanto, exige maior quantidade de corpos de prova, e não foi abordada neste trabalho.

A partir dos resultados disponíveis e com a percepção de que quanto maior a área da curva histerética apresentada pelo material, maior é a dissipação de energia alcançada, é possível concluir que o tratamento térmico de nitinol que possui maior potencial para aplicações em absorvedores dinâmicos de vibração dentre os vários analisados é o de envelhecimento a 400°C durante 120 minutos.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Sugere-se determinar o ponto assintótico para os valores de área do laço de histerese de acordo com o tratamento térmico realizado, de modo a determinar o potencial máximo de dissipação de energia para ligas Ni-Ti relativo ao processo de envelhecimento aplicado. Ademais, é apropriado que se realize um estudo com análise estatística dos resultados obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2004). *Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis*. F 2004- 05.
- Dhar, S., Das, S., & Saha, P. (2015, Dezembro). *State of Art Review of Shape Memory Alloy Used in Civil Structures as Seismic Control Device*. *International Journal of Research in Engineering and Technology*, pp. 195-203.
- Ducos, P. C. (2006). *Transformações de Fase em Ligas de Níquel - Titânio para Ortodontia*. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia.
- Frick, C. P., Ortega, A., Tyber, J., Maksound, A., Maier, H., & Liu, Y. a. (2005). *Thermal processing of polycrystalline NiTi shape memory alloys*. *Mater. Sci. Eng. A*, 405, 34-49.
- Fuentes, J.; Gumpel, P., Strittmatter, J. (2002). *Phase Change Behaviour of Nitinol Shape Memory Alloys*. *Advanced Engineering Materials*, 437-451.
- Funakubo. (1987). *Shape Memory Alloys*. Taylor & Francis.
- Krishnan, R. V., Delaey, L., & Warlimont, H. (1974). *Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations*. *Journal of Materials Science*, 1521-1535.
- Kumar, K. P., & Lagoudas, D. C. (2011). *Introduction to Shape Memory Alloys*. Springer Science+Business Media.
- Lagoudas, D. (2008). *Shape Memory Alloy*. Texas: Springer.
- Lekston, Z., & Zubko, M. (2015). *X-Ray Diffraction Studies of the Reversible Phase Transformation in NiTi Shape Memory Alloy*. *Acta Physica Polonica*.
- Machado, L. G., & Lagoudas, D. (2008). *Thermomechanical Constitutive Modeling of SMAs: Modeling and Engineering Applications of Shape Memory Alloys*. New York: Springer.
- Meirovitch, L. (2001). *Fundamentals of vibrations*. USA: McGraw Hill.
- Oliveira, H. S. (2011). *Análise Dinâmica de um Stockbridge pseudoelástico*. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica). Brasília: Universidade de Brasília.
- Oliveira, H. S. (2014). *Análise de um Absorvedor Dinâmico Pseudoelástico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Brasília: Universidade de Brasília.
- Quintão, C. C., & Brunharo, I. H. (2009). *Fios ortodônticos: conhecer para otimizar a aplicação clínica*. *Dent. Press Ortodon. Ortop. Facial*, 144-157.
- Souza, W. O. (2014). *Caracterização Experimental de Molas Pseudoelásticas de Ligas com Memória de Forma*. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica). Brasília: Universidade de Brasília.

- Stoeckel, D. (1995). *The Shape Memory Effect - Phenomenon, Alloys and Applications*. Retrieved Abril 11, 2017, from Nitinol Devices & Components, Inc: <https://www.nitinol.com/wp-content/uploads/2012/01/038.pdf>
- Ten QEM REIS, W. P. (2001). *Caracterização de Ligas Níquel-Titânio para Ortodontia*. Rio de Janeiro: IME.
- Tiseo, B., Koopmann, G. H., Concilio, A., & Gianvito, A. (2006). *Smart Tunable Dynamic Vibration Absorbers*. American Institute of Aeronautics and Astronautics.
- Villarinho, D. J., Roese, P. B., Ferreira, C., & Schaeffer, L. (2010). **Caracterização parcial de liga Nitinol atuador através de pontos críticos de transformação de fases utilizando calorimetria diferencial de varredura**. *Estudos Tecnológicos*, vol. 6, 1-10.
- Xenos-Despina, S., & Karamichailidou. (2016). *The Unique Properties, Manufacturing Processes and Applications of Near Equiatomic Ni-Ti Alloys*. Filellinon, Grécia: Department of Mechanical Engineering. University of Thessaly.
- Zanaboni, E. (2008). *One Way and Two Way - Shape Memory Effect: Thermo-Mechanical Characterization of Ni-Ti wires*. Pavia: Università Degli Studi di Pavia.