

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Desenvolvimento de um Dispositivo Origâmico
Atuado por Memória de Forma**

Camila Nunes de Lima Leite

Carolina Araujo de Queiroz Costa

Marcella Penna Franca Theodoro

Orientador: Pedro Manuel C. L. Pacheco

Rio de Janeiro

Novembro de 2018

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA CELSO
SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Desenvolvimento de um Dispositivo Origâmico
Atuado por Memória de Forma**

Camila Nunes de Lima Leite

Carolina Araujo de Queiroz Costa

Marcella Penna Franca Theodoro

Projeto final apresentado em cumprimento às
normas do Departamento de Educação Superior
do CEFET/RJ, como parte dos requisitos para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Orientador: Pedro Manuel C. L. Pacheco

**Rio de Janeiro
Novembro de 2018**

CEFET/RJ – Sistema de Bibliotecas / Biblioteca Central

L533 Leite, Camila Nunes de Lima
Desenvolvimento de um dispositivo origâmico atuado por
memória de forma / Camila Nunes de Lima Leite, Carolina Araujo de
Queiroz Costa [e] Marcella Penna Franca Theodoro.—2018.
xiii, 44f. : il. (algumas color.) ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação
Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2018.

Bibliografia : f. 37-44

Orientador : Pedro Manuel C. L. Pacheco

1. Engenharia mecânica. 2. Materiais inteligentes. 3. Ligas com
memória de forma. 4. Origami. I. Costa, Carolina de Araujo de
Queiroz. II. Theodoro, Marcella Penna Franca. III. Pacheco, Pedro
Manuel C.L. (Orient.). IV. Título.

CDD 620.1

Elaborada pela bibliotecária Mariana Oliveira CRB-7/5929

RESUMO

A arte do origami ganhou relevância no campo da ciência ao inspirar diversas áreas do conhecimento com desenvolvimento de estruturas inovadoras capazes de apresentar características adaptativas a partir dos seus conceitos de padrões e dobras. Dispositivos autodobráveis tem sido criados baseados no conceito do origami associados a materiais inteligentes. O avanço tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento no campo de materiais inteligentes, dentre eles destacam-se as ligas com memória de forma, conhecidas como SMA (*Shape Memory Alloys*), que são ligas metálicas que apresentam a capacidade de recuperar sua forma inicial quando submetidas a um carregamento termomecânico apropriado fornecendo grandes forças e deslocamentos através da variação de temperatura. Este trabalho apresenta um estudo da utilização das ligas com memória de forma como elementos de atuação de uma estrutura origâmica com padrão denominado “Waterbomb”. Propõe-se um modelo experimental a fim de investigar o comportamento da estrutura origâmica atuada por uma mola de SMA e duas molas antagônicas. Um modelo analítico foi estudado para verificar o desempenho do atuador e para comparar com os resultados numéricos lineares. A partir desses resultados, estudou-se um modelo numérico referente ao comportamento não-linear do material através de uma equação constitutiva que descreve as características termomecânicas do atuador. Simulações numéricas baseado no Método de Elementos Finitos foram realizadas utilizando o software ANSYS, considerando diferentes situações de carregamentos térmicos e mecânicos.

Palavras-Chave: Materiais inteligentes, Ligas com Memória de Forma, Origami, Método de Elementos Finitos.

ABSTRACT

The origami art has gained relevance in the field of science by inspiring several areas of knowledge with the development of innovative structures capable of presenting adaptive characteristics from their concepts of patterns and folds. Self-folding devices have been created based on origami concept associated with smart materials. The technological advance has stimulated the development in the area of smart materials, among them the shape memory alloys (SMA), which are metallic alloys that have the capacity to recover the original shape when submitted to an appropriate thermomechanical loading which provides large forces and displacement through temperature variation. This work develops a study of the use of shape memory alloys as an actuation system of an origami structure with a pattern called "Waterbomb". It is proposed an experimental model in order to investigate the behavior of the origami structure actuated by a SMA spring and two antagonistic springs. An analytical model was studied to verify actuator performance and to compare with linear numerical results. From these results, a numerical model regarding the non-linear behavior of the material was studied through a constitutive equation that describes the thermos-mechanical characteristics of the actuator. Numerical simulations based on the Finite Element Method were performed using the ANSYS software considering different thermal and mechanical loading situations.

Keywords: Smart Material, Shape Memory Alloy, Origami, Finite Element Method.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a “Deus” por ter nos guiado até aqui e por ter permitido a superação de toda e qualquer dificuldade.

Aos nossos pais pelo direcionamento de vida e suporte moral, cujo apoio tem sido fundamental em todos os momentos de nossas vidas.

Ao nosso orientador Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, pela orientação, conhecimento transmitido, paciência e por acreditar na proposta desse projeto.

Aos professores do corpo docente da Engenharia Mecânica por todo conhecimento transmitido.

Aos amigos do Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de materiais (LACTM), Arthur Adeodato, Brenno Duarte, Daniel Barreto e Giovanni Seiji, por todo auxílio na realização desse projeto.

E a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para que chegássemos até aqui.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Objetivo	2
1.4 Organização do Trabalho	2
2. Origami	4
2.1 Origami e a Ciência	4
2.2 Dobras e Padrões	6
2.2.1 Padrão Miura-Ori	7
2.2.2 Padrão “Waterbomb”	8
2.3 Aplicações Científicas	9
2.3.1 Área automotiva	9
2.3.2 Área Espacial	11
2.3.2.1 Painel Solar	11
2.3.2.2 Telescópio Especial Eyeglas	11
2.3.3 Área Biomédica	12
2.3.4 Arquitetura	13
3. Ligas com memória de forma	15
3.1 Efeito de Memória de Forma	18
3.2 Pseudoelasticidade	19
3.3 Efeito de Memória de Forma Reversível	20
3.4 Efeito Memória de Forma com Tensão Assistida	21
3.5 Aplicações	22
3.5.1 Medicina	23
3.5.2 Indústria Aeroespacial	24
3.5.3 Robótica	25
3.5.4 Válvulas	27
3.5.5 Controle de Vibrações	28

3.6 Fadiga	29
3.7 Atuadores	30
3.8 Estrutura de Origami para Fachada Externa	32
4. Modelo Analítico	38
4.1 Modelo Geométrico da Estrutura	38
4.2 Molas de Tração	40
4.3 Combinação de Molas	42
4.4 Rigidez de uma Viga	44
4.5 Atuação do Sistema	44
4.6 Análise Linear	45
5. Procedimento Experimental	48
5.1 Descrição do Ensaio Experimental	49
6. Modelo Numérico	40
6.1 Modelo Constitutivo	56
6.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)	60
6.2.1 Ansys	61
6.3 Desenvolvimento do Modelo Numérico	61
7. Resultados	63
7.1 Modelo Analítico	63
7.2 Modelo Numérico	65
7.2.1 Situação com temperatura prescrita	65
7.2.2 Situação com relação de rigidez prescrita	68
7.2.3 Comparativo de Atuação	71
8. Conclusão	73
9. Referências Bibliográficas	74

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1:	Os Sete axiomas Huzita-Hatori	6
FIGURA 2:	Padrão de dobra Miuri-Ori (a) célula unitária na posição original plana, (b) definição dos parâmetros da célula unitária e (c) padrão dobrado em diferentes ângulos θ	7
FIGURA 3:	Padrão de oito vincos do Waterbomb	8
FIGURA 4:	Padrão de seis vincos do Waterbomb, (a) célula unitária na posição original plana, (b) forma da célula unitária após dobramento e (c) padrão de vincos da estrutura Waterbomb	9
FIGURA 5:	Apresenta três padrões diferentes de dobras onde foram empacotados em recipientes iguais e compactados na mesma altura	10
FIGURA 6:	Protótipo desenvolvido pela NASA de uma matriz de Painel Solar sendo desdobrada	11
FIGURA 7:	Layout e sequência de dobramento do protótipo de 5 metros criado por Land	12
FIGURA 8:	Protótipo de um Stent baseado em técnicas de origami (a) forma contraída, (b) forma expandida	13
FIGURA 9:	Fachada de Torre Al Bahar	14
FIGURA 10:	Esquema das transformações ocorridas em um material com memória de forma	16
FIGURA 11:	Transformação Martensítica de uma liga com memória de forma de forma	17
FIGURA 12:	Transformação de fase induzida por temperatura de uma SMA	18
FIGURA 13:	Efeito de Memória de Forma, curva tridimensional tensão-deformação-temperatura	18
FIGURA 14:	Curva Tensão-Deformação Pseudoelástica	19
FIGURA 15:	Comportamento Pseudoelástico completo e parcial.....	20
FIGURA 16:	Ciclo Térmico de uma liga com Memória de Forma NiTi, sob um carregamento constante de 150 Mpa	21
FIGURA 17a:	Transformação de fase induzida por temperatura de três amostras $\sigma_1, \sigma_2 e \sigma_3$	22
FIGURA 17b:	Deformação X Temperatura de três amostras com tensões: $\sigma_1, \sigma_2 e \sigma_3$...	22

FIGURA 18:	Simulação da expansão de um Stent.....	24
FIGURA 19:	Representação da SMA utilizada na parte de trás da turbina da aeronave	25
FIGURA 20:	Representação do robô passando pelo obstáculo	26
FIGURA 21:	Robô com rodas deformáveis	26
FIGURA 22:	Deformação variando de acordo com aquecimento/resfriamento	27
FIGURA 23:	Representação da atuação da mão robótica	27
FIGURA 24:	Representação em corte da mini válvula	28
FIGURA 25:	Representação SMA-ATVA	29
FIGURA 26:	Comportamento do Nitinol sob fadiga e soldado a laser	30
FIGURA 27:	Tipos Básicos de atuadores SMA	31
FIGURA 28:	Diagrama esquemático das configurações dos atuadores.	32
FIGURA 29:	Configuração para um Atuador mover um elemento	33
FIGURA 30:	Sistema HelioTrace	34
FIGURA 31:	Estágios de Funcionamento do Sistema	34
FIGURA 32:	Representação da Fachada da Biblioteca Central de New Phoenix	35
FIGURA 33:	Padrão gerado por Origami	35
FIGURA 34:	Padrão com maior abertura entre encaixes	36
FIGURA 35:	Transmaterial PixelSkin02	36
FIGURA 36:	Estrutura de Origami para Fachada	37
FIGURA 37:	Mola Helicoidal (a) Carregamento Externo e (b) Esforços	38
FIGURA 38:	Distribuição de tensão de Cisalhamento em uma mola (a) Linear Elástica e (b) Com memória de forma	39
FIGURA 39:	Extremidades usadas nas molas de extensão	40
FIGURA 40:	Extremidades para molas de tração (a) Tensão em A e (b) Tensão decorrente da torção em B (Fonte: SHIGLEY, 2011)	41
FIGURA 41:	(a) Curva Carga-Deflexão de uma mola de extensão e (b) Geometria de uma Mola de Extensão	42
FIGURA 42:	Combinação de molas em (a) série e (b) em paralelo	43
FIGURA 43:	Representação do Atuador	45
FIGURA 44:	Representação do Atuador Simplificado	46
FIGURA 45:	Estrutura origâmica com padrão “Waterbomb” (a) completamente fechada, (b) parcialmente fechada e (c) completamente aberta	48

FIGURA 46:	Estrutura Experimental montada com o carregamento mecânico realizado por duas molas de aço	50
FIGURA 47:	Diagrama esquemático do experimento	50
FIGURA 48:	Fonte de alimentação HY-3003E-3 conectada a mola de memória de forma	51
FIGURA 49:	Transformação de fase de uma mola de liga de memória de forma	51
FIGURA 50:	Estrutura atuada com três diferentes cargas mecânicas. (a) Estrutura com carga de 400 g, (b) Estrutura com carga de 600 g e (c) Estrutura com carga mecânica de mola de aço	53
FIGURA 51:	Esquema Atuador Modelo Numérico	55
FIGURA 52:	Dependência do raio de domínio elástico (R) com a temperatura	57
FIGURA 53:	Dependência da temperatura para a tensão de transformação (σ_y)	59
FIGURA 54:	Forma de Utilização do MEF	60
FIGURA 55:	Elemento BEAM188	61
FIGURA 56:	Gráfico comparativo da força por deflexão do modelo linear, (a) na fase Austenítica e (b) na fase Martensítica	64
FIGURA 57:	Gráfico Comparativo da Evolução da Força X Deslocamento	65
FIGURA 58:	Relação Temperatura X Deslocamento de acordo com variações de Rigidez	66
FIGURA 59:	Relação Tempo X Deslocamento	67
FIGURA 60:	Representação do (a) Carregamento Térmico e (b) do Carregamento Mecânico	68
FIGURA 61:	Relação Temperatura X Deslocamento de acordo com variações de temperaturas	69
FIGURA 62:	Relação Tempo X Deslocamento	70
FIGURA 63:	Gráfico comparativo da Recuperação em função da relação de Rigidez	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 1:	Propriedades de uma liga de Nitinol	15
TABELA 2:	Dados do Atuador	46
TABELA 3:	Especificação da mola de <i>NiTi</i>	49
TABELA 4:	Variação de comprimento de acordo com a influência de diferentes forças	52
TABELA 5:	Variações de comprimento da mola	53
TABELA 6:	Propriedades do fio de SMA Flexinol	62
TABELA 7:	Comparação dos resultados do modelo linear na fase Austenítica	63
TABELA 8:	Comparação dos resultados do modelo linear na fase Martensítica	64
TABELA 9:	Tempo de acordo com a Relação de Rigidez	67
TABELA 10:	Tempo de acordo com a Relação de Rigidez	70
TABELA 11:	Comparação da Recuperação do Atuador de acordo com o Carregamento Térmico	72

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A_f	-	Temperatura Final Austenítica
A_s	-	Temperatura Inicial Austenítica
C_a	-	Calor Específico Austenítico
C_m	-	Calor Específico Martensítico
E_1	-	Força interna do acoplamento do Origami
E_2	-	Força interna do acoplamento do Origami
E_A	-	Módulo de Elasticidade no estado completamente austenítico
E_M	-	Módulo de Elasticidade no estado completamente martensítico
E_m	-	Módulo Martensítico
F_E	-	Força atuante na mola elástica
F_{SMA}	-	Força atuante na mola com memória de forma
G_A	-	Módulo de Cisalhamento da Austenita
G_M	-	Módulo de Cisalhamento da Martensita
L_{SMA}	-	Comprimento da liga de memória de forma
L_{mola}	-	Tamanho da Mola Passiva
M_d	-	Martensita Não Maclada
M_f	-	Temperatura Inicial Martensítica
M_s	-	Temperatura Inicial Martensítica
M_t	-	Martensita Maclada
α_0	-	Ângulo construtivo do origami no plano Y'Z'
β_0	-	Ângulo construtivo do origami no plano YZ
ε_r	-	Deformação Residual
θ_0	-	Ângulo construtivo do origami no plano XZ
σ_{AF}	-	Tensão final da transformação de Austenita induzida por tensão
σ_{AS}	-	Tensão inicial da transformação de Austenita induzida por tensão
σ_{MF}	-	Tensão final da transformação de Martensita induzida por tensão
σ_{MS}	-	Tensão inicial da transformação de Martensita induzida por tensão
σ_f	-	Tensão Final
σ_s	-	Tensão Inicial
$2s$	-	Comprimento do elemento

ATVA	-	Adaptative Tuned Vibration Absorber
BF	-	Bias Force
d	-	Diâmetro do Fio
D	-	Diâmetro médio de Espiral
DCL	-	Diagrama de Corpo Livre
F	-	Fio
FMF	-	Fio – Mola - Fio
G	-	Módulo de Cisalhamento
GDL	-	Grau de Liberdade
LMF	-	Ligas de Memória de Forma
MF	-	Mola - Fio
MFM	-	Mola – Fio - Mola
N	-	Número de espiras ativas
OWSME	-	One Way Shape Memory Effect
PE	-	Pseudoelasticidade
R	-	Raio da roda
r	-	Raio da placa
SATWME	-	Stress Assisted Two Way Memory Effect
SFU	-	Space Flyer Unit
SMA	-	Shape Memory Alloys
TVA	-	Tuned Vibration Absorber
TWSME	-	Two Way Shape Memory Effect
Ω	-	Constante associada a transformação de fase
A	-	Austenita
M	-	Martensita
T	-	Temperatura Ambiente
θ	-	Coefficiente de Expansão Térmica

Capítulo 1

Introdução

O avanço tecnológico e industrial tem impulsionado o desenvolvimento de pesquisas em diversos setores e materiais. A busca por novos materiais e otimização dos recursos a fim de desenvolver produtos e processos eficientes, leves e inteligentes tem encontrado na natureza a inspiração para compreensão de comportamentos e padrões.

A partir desta perspectiva, fundamentos de artes de origami tem sido alvo de estudo associado à bioinspiração na busca pelo desenvolvimento de estruturas inteligentes capazes de apresentar características adaptativas. Neste sentido, o uso de materiais inteligentes como sensores e atuadores destes sistemas é de grande importância.

1.1 Motivação

A arte milenar oriental de dobrar uma folha de papel conhecida como Origami se apresenta muito além de apenas uma atividade recreativa e se expandiu para o ramo da ciência. Tal arte revelou um grande potencial para solucionar problemas através de formas criativas de seu uso, onde padrões de dobras podem fornecer uma habilidade adaptativa, ganhando destaque principalmente quando a limitação de espaço é fator principal.

As ligas de memória de forma, também conhecidas como *SMA* (Shape Memory Alloys) possuem uma característica muito importante para indústria, a capacidade de recuperarem sua forma inicial mediante a aplicação de carregamentos termomecânicos. Esta habilidade torna interessante a utilização deste material em diversas aplicações. Vale destacar que a utilização de temperaturas muito altas, podem ocasionar uma perda desta “memória”.

A utilização das SMAs vem ganhando cada vez mais espaço e, como consequência, diversos estudos têm sido desenvolvidos para promover a ampliação do uso deste material. O potencial destas ligas torna-se bastante relevante quando são empregadas no desenvolvimento de estruturas origâmicas adaptáveis, fomentando novas áreas de aplicação que vão além de aplicações no campo da Medicina, Robótica e indústrias de óleo e gás, conquistando espaço no campo da indústria aeroespacial.

1.2 Justificativa

Os materiais inteligentes possuem qualidades especiais que tornam o seu estudo bastante atraente em diversas áreas do conhecimento. A ampliação do número de pessoas interessadas no tema promove o aumento do número de trabalhos e, como consequência, permite o desenvolvimento de inovações e melhorias na área.

As ligas com memória forma (*LMF*) foram descobertas em meados dos anos 60, e desde então várias ligas foram exploradas, tais como: NiTi, CuAlNi, CuAlBe, CuZn. Os estudos desenvolvidos indicaram que as ligas de *NiTi* (Nitinol) são as que possuem um melhor conjunto de propriedades, entre elas resistência a corrosão, biocompatibilidade, superelasticidade. (OLIVEIRA *et al.*, 2015)

Esta percepção fez com que o número de pesquisas aumentasse, contribuindo desta forma para o avanço nesta área. Em contrapartida, o número de trabalhos desenvolvidos na Língua Portuguesa relativos a este tema é relativamente reduzido. Este estudo propõe o desenvolvimento de uma estrutura origâmica adaptável com atuação realizada por um elemento de liga com memória de forma com a finalidade ampliar o conhecimento aliando duas áreas contemporâneas de pesquisa.

1.3 Objetivo

Este projeto tem como objetivo propor um modelo de estrutura origâmica adaptativa que utiliza elementos de ligas com memória de forma (*SMA – Shape Memory Alloy*) como atuadores do sistema. Devido ao seu comportamento termomecânico especial, estes elementos possuem grande capacidade de deformação.

Neste trabalho é desenvolvido um protótipo de um sistema feito de Origami com atuação através de um elemento de SMA. Para avaliar o comportamento do sistema são desenvolvidos modelos analítico e numérico. O pacote comercial de elementos finitos ANSYS é utilizado para o desenvolvimento de simulações numéricas.

1.4 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em 9 capítulos:

- Introdução
- Origami
- Ligas com Memória de Forma
- Modelo Analítico
- Modelo Experimental
- Procedimento Numérico
- Resultados
- Conclusão
- Referências

O Capítulo 2 apresenta um breve resumo sobre a história do origami. O Capítulo 3 apresenta as principais características das ligas com memória de forma, assim como seu funcionamento, efeitos, aplicações e tipos de atuadores usados.

Em seguida, no Capítulo 4 é apresentado o modelo analítico, assim como o funcionamento das molas utilizadas no sistema.

O Capítulo 5 apresenta o modelo experimental desenvolvido no laboratório LASEI (Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes) do CEFET/RJ.

O modelo constitutivo usado para fazer a relação numérico experimental é apresentado no Capítulo 6.

No Capítulo 7 são mostrados os resultados obtidos das simulações numéricas desenvolvidas com o modelo numérico de elementos finitos. O modelo é capaz de representar o comportamento constitutivo das ligas com memória de forma (*LMF*).

O capítulo 8 abrange a conclusão, os conhecimentos adquiridos e oportunidades e sugestões para trabalhos futuros como continuidade deste presente estudo.

No último capítulo são apresentadas as referências usadas para a realização deste projeto.

Capítulo 2

Origami

O origami é uma arte manual secular tradicional do Japão que consiste em dobrar uma folha de papel quadrada não cortada, a fim de obter formas decorativas, que podem ser desde objetos realistas como, por exemplo, figuras de animais e de plantas até objetos com formas abstratas. Seu nome tem origem nas palavras japonesas “Oru” que significa dobrar e “kami” que significa papel, descrevendo uma arte que se desenvolveu e é comumente praticada em todo o mundo, contudo, originalmente não teve propósito utilitário, mas sim recreativo e artístico (FEI & SUJAN, 2013; PEAZA-HERMANDEZ et al., 2014).

No Japão existem dois tipos de origami, o primeiro é o origami representacional em que tem o objetivo de se parecer com algo, onde os temas usuais historicamente eram pássaros, peixes, flores e afins. O segundo tipo era de formas abstratas e cerimoniais, sendo este carregado de grande simbolismo (LANG, 2004).

A arte do origami foi sendo difundida ao longo dos anos e ganha notoriedade mundial na década de 50 quando um japonês chamado Akira Toshizawa desenvolveu novos projetos artísticos e regras para a representação gráfica das dobraduras com diagramas que descreviam de forma simples os passos necessários para a construção de um origami, levando-o a criação de livros e exposições inicialmente no Japão, e depois em todo o mundo, onde consegue transcender os limites da linguagem e mostrar que havia mais na arte do origami do que apenas projetos inteligentes (LANG, 2004; LANG, 2003).

As décadas seguintes são marcadas pela disseminação da arte do origami no ocidente, apresentando um crescimento exponencial do número de pessoas e estudiosos que se renderam aos encantos do origami e sua simplicidade de ao dobrar uma folha obter belas e inesperadas formas (LANG, 2003).

2.1 Origami e a Ciência

Ao longo da história do origami, a maioria das criações foram sendo realizadas por uma combinação de tentativa e erro ou baseadas em técnicas heurísticas. Apesar de ser uma arte

antiga, é também recente quanto à difusão e evolução das técnicas de design marcadas pelas últimas décadas, apresentando um elevado número de projetos com relevante complexidade e realismo (FEI & SUJAN, 2013; LANG, 2003).

Tal evolução foi influenciada pelo envolvimento de matemáticos e cientistas motivados pela curiosidade e possibilidades que encontraram no origami. Muitas foram as abordagens matemáticas desenvolvidas para compreender o processo de dobramento e estimar as perspectivas do projeto, resultando atualmente em técnicas matemáticas e geométricas codificadas para o desenvolvimento de uma estrutura desejada (FEI & SUJAN, 2013; LANG, 2003).

O “International Meeting of Origami Science and Technology” marca o primeiro encontro abordando a ciência e tecnologia baseadas em origami envolvendo diversos estudiosos onde se destacam Humiaki Huzita e Benedetto Scimemi por apresentar dentre uma série de artigos, são identificadas seis maneiras distintas de criar um único vinco alinhando uma ou mais combinações de pontos, linhas e linhas de dobra existentes (LANG, 2018).

Essas seis operações ficaram conhecidas como os axiomas de Huzita fornecendo a primeira descrição formal dos tipos de construção geométrica possíveis, se tornando base para estudos na área por muitos anos até que Koshiro Hatori encontra um tipo de alinhamento de dobra que não havia sido descrito resultando no sétimo axioma (FEI & SUJAN, 2013; LANG, 2018).

Vale ressaltar que tais axiomas haviam sido identificados anteriormente por Jacques Justin, contudo, os estudos sistemáticos de Huzita levaram-no a ganhar reconhecimento como os setes axiomas Huzita-Hatori. De acordo com Lang (2018), os sete axiomas são:

1. Dados dois pontos P_1 e P_2 , é possível dobrar uma linha conectando os dois pontos;
2. Dados dois pontos P_1 e P_2 , é possível dobrar uma linha que coincida P_1 em P_2 ;
3. Dadas duas linhas l_1 e l_2 , é possível dobrar l_1 de modo que coincida com l_2 ;
4. Dado um ponto P_1 e uma linha l_1 , é possível realizar uma dobra perpendicular a l_1 passando por P_1 ;
5. Dados dois pontos P_1 e P_2 e uma linha l_1 , é possível realizar uma dobra de modo que coincida P_1 sobre l_1 e passe pelo ponto P_2 ;
6. Dados dois pontos P_1 e P_2 e duas linhas l_1 e l_2 , é possível realizar uma dobra de modo que coincida P_1 sobre l_1 e P_2 sobre l_2 ;
7. Dado um ponto P_1 e duas linhas l_1 e l_2 , é possível realizar uma dobra que coincida P_1 sobre a l_1 e que seja perpendicular a l_2 .

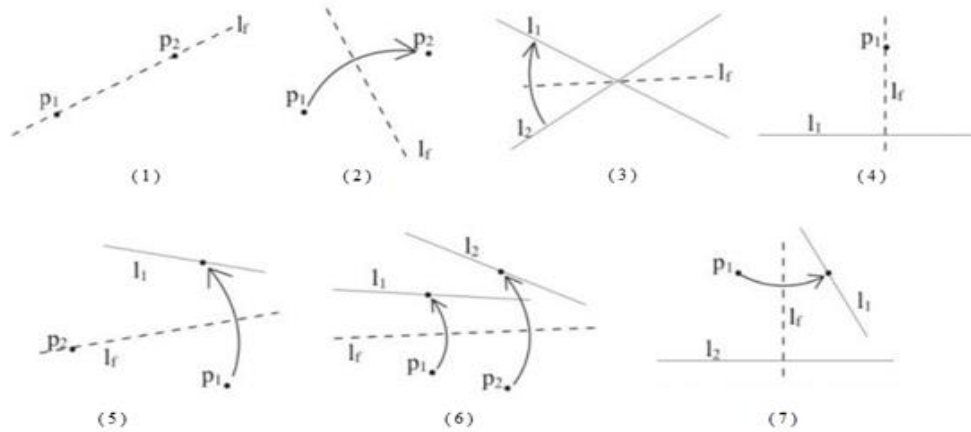


Figura 1: Os Sete axiomas Huzita-Hatori (Fonte: LANG, 2015)

Dado um conjunto de pontos e linhas, os axiomas de Huzita-Hatori permitem criar novas linhas, onde as interseções entre linhas antigas e novas definem pontos adicionais. O conjunto expandido de pontos e linhas pode então ser expandido por aplicação repetida das operações para obter mais combinações (LANG, 2015).

Muitos foram os estudos desenvolvidos tomando como base tais axiomas, como Robert Lang que realizou uma completa enumeração de todos os possíveis alinhamentos que especificam um único vinco e todas as construções viáveis corresponderam a um dos axiomas Huzita-Hatori (LANG, 2018).

2.2 Dobras e Padrões

A compreensão do desenvolvimento da estrutura das dobras do origami e suas definições básicas são de grande importância levando a primeira afirmativa de que uma dobra é referente a qualquer objeto delgado (folha) dobrado, independente do número de dobras realizadas na sequência, onde podem ser classificadas em dois tipos partindo da vista de uma face do papel desdobrado como, dobras de montanha que resultam em uma forma convexa e as dobras vale com forma côncava, podendo ser permutados quando com a alteração da face do papel (HULL, 2002; DUREISSEIX, 2012).

Outra definição importante é referente ao termo crease pattern que pode ser traduzido como “padrão de vincos” e é definido como a representação de vincos através de linhas desenhadas no papel plano desdobrado resultando no conjunto de todos os vincos (dobra vale e montanha) utilizados no objeto final dobrado (HULL, 2002; DUREISSEIX, 2012).

2.2.1 Padrão Miura-ori

Na década de 80, Koryo Miura desenvolveu um padrão de dobras que ficou conhecido como Miura-ori onde teve aplicação em painéis solares dobráveis espaciais. Miura explorou métodos de dobras que poderiam ser desdobrados com a simples tração de um canto (GREENBERG, et al., 2011). O padrão de vincos do Miura-ori é feito a partir de uma matriz $m \times n$ de paralelogramos congruentes, em que cada vértice consiste em dois ângulos agudos α dois ângulos obtusos congruentes $\pi - \alpha$, onde $0 < \alpha < \frac{\pi}{2}$, demonstrado na Figura 2(a), onde as linhas de dobra de montanha estão marcadas com linhas sólidas e a dobra de vale como linhas pontilhadas (GINEPRO & HULL, 2014; LIU et al. 2015).

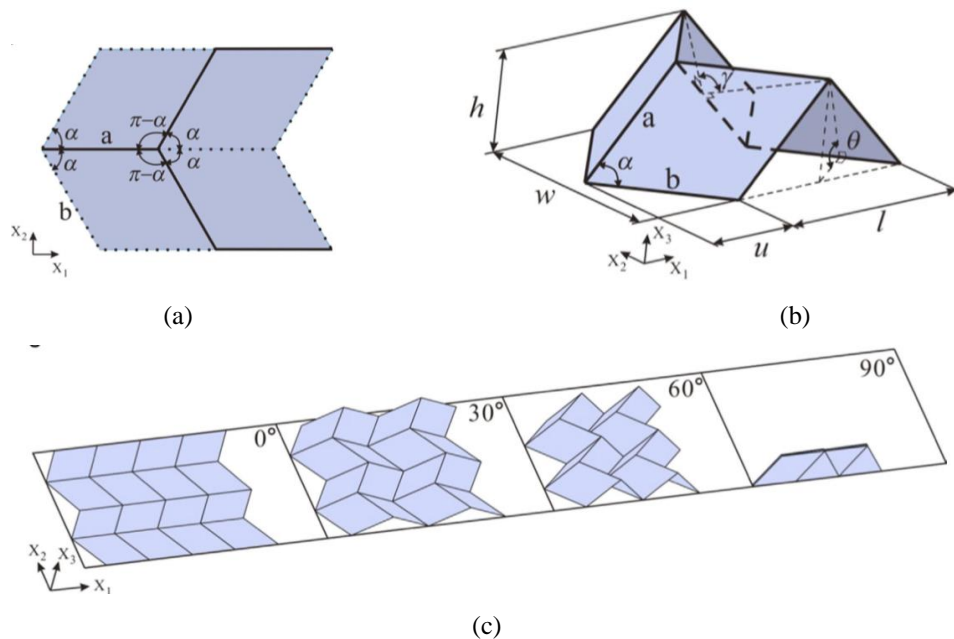


Figura 2: Padrão de dobra Miura-ori, (a) célula unitária na posição original plana, (b) definição dos parâmetros da célula unitária e (c) padrão dobrado em diferentes ângulos θ (Fonte: LIU et al. 2015).

Na análise de uma célula unitária (Figura 2a) constituída de quatro paralelogramos idênticos, LIU et al. (2015) e SCHENK & GUEST (2013) definem tal célula pelas dimensões do menor componente, um paralelogramo com comprimento de lado a , b e o ângulo α são dados como constantes e o movimento da unidade depende apenas do ângulo de dobra diédrica $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$, pode ser visto na Figura 2b. Dessa forma, o movimento de dobramento pode ser representado como:

$$h = a \sin \theta \sin \alpha \quad (2.1)$$

$$w = 2b \frac{\cos \theta \tan \alpha}{\sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \alpha}} \quad (2.2)$$

$$l = 2a \sqrt{1 - \sin^2 \theta \sin^2 \alpha} \quad (2.3)$$

$$u = \frac{2ab \cos \alpha}{l} \quad (2.4)$$

$$\sin \left(\frac{\gamma}{2} \right) = \frac{\cos \theta}{\cos \alpha \sqrt{1 + \cos^2 \theta \tan^2 \alpha}} \quad (2.5)$$

Na Figura 2 (c), é possível observar a mobilidade do padrão Miura-ori conforme os valores de θ se modificam, contudo, devido a característica anisotrópica do padrão seu comportamento dependerá da direção de interesse (LIU et al. 2015).

2.2.2 Padrão “Waterbomb”

O “Waterbomb” é um padrão de dobras de origami tradicional muito difundido que serve como base para modelos mais complexos. Pode apresentar dois tipos de padrão de vincos, a base de oito vincos e a base de seis vincos (CHEN et al., 2016).



Figura 3: Padrão de oito vincos do Waterbomb (Fonte: HANNA et al., (2014)).

O primeiro padrão consiste de oito vincos em uma folha quadrada alternados entre montanha e vale ao redor de um vértice central separados entre si por 45° , como pode ser visto na Figura 3 com as linhas sólidas representando as dobras de montanha e as linhas pontilhadas representam as dobras de vale, onde HANNA et al., (2014) utiliza como base uma folha de papel circular para que as dobras possuam o mesmo comprimento.

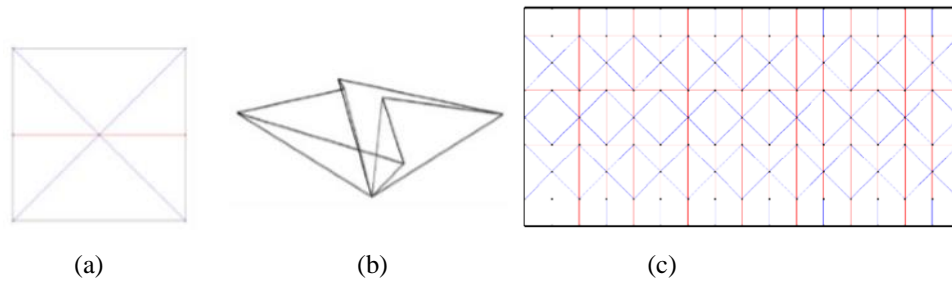


Figura 4: Padrão de seis vincos do Waterbomb, (a) célula unitária na posição original plana, (b) forma da célula unitária após dobramento e (c) padrão de vincos da estrutura Waterbomb (Fonte: LEE et al., 2013).

O segundo padrão consiste de seis vincos onde apresenta duas dobras de montanha e quatro dobras de vale, apresentados na figura 4(a) e (b), em que as linhas azuis são a representação das dobras de vale e as linhas vermelhas são as dobras de montanha. Esse padrão é o mais conhecido e utilizado em que permite a variação a partir de uma superfície plana dobrável para um tubo deformável que pode assumir o formato de uma bola, conhecido como “magic ball”, com o “padrão de vincos” demonstrado na Figura 4(c) (CHEN et al., 2016).

A base de seis vincos obteve grande aplicação devido a sua capacidade de implantação, com sua característica única a sua forma pode ser desde um padrão tubular que pode ser expandido e contraído ou apresentar um padrão de uma esfera que pode ser alongada a achatada, dessa forma, tal estrutura com circunferência variável pode ser utilizada como um mecanismo de transição de diâmetro, apresentando uso desde o primeiro Stent desenvolvido de origami à roda deformável para robôs (LEE et al., 2017; CHEN et al., 2016).

2.3 Aplicações Científicas

2.3.1 Área Automotiva

Na área automotiva o estudo envolvendo o conhecimento da arte do origami e seu processo de dobramento tem destaque em projetos de airbags, com o intuito de mapear a transição entre seu estado inicial e seu desdobramento até o volume final. Uma vez que, o desenvolvimento de um modelo de dobras deve atender uma geometria frequentemente especificada em uma forma tridimensional inflada resultando em estudo de modelos computacionais nada triviais (GREENBERG, et al., 2011, CROMVIK & ERIKSSON, 2006).

Ao longo dos anos de pesquisa e desenvolvimento, os airbags passam a ser considerados como um sistema de proteção suplementar para motoristas e passageiros, que consiste em três

partes principais, o módulo do airbag, o inflador (unidade responsável pelo enchimento) e o sensor de colisão. Para a construção do airbag propriamente dito, utiliza-se o nylon devido ao seu pouco peso e ter como característica elevada resistência ao alongamento (CROMVIK, 2007).

De acordo com BRUTON et al. (2016), devido às características do material adota-se para os estudo e desenvolvimento das dobras do airbag o método conhecido como “Soft Origami”, que tem sido explorado como um método viável para empacotar de forma eficiente materiais ou substratos delgados e flexíveis em volumes cilíndricos a partir de técnicas de designs de origami.

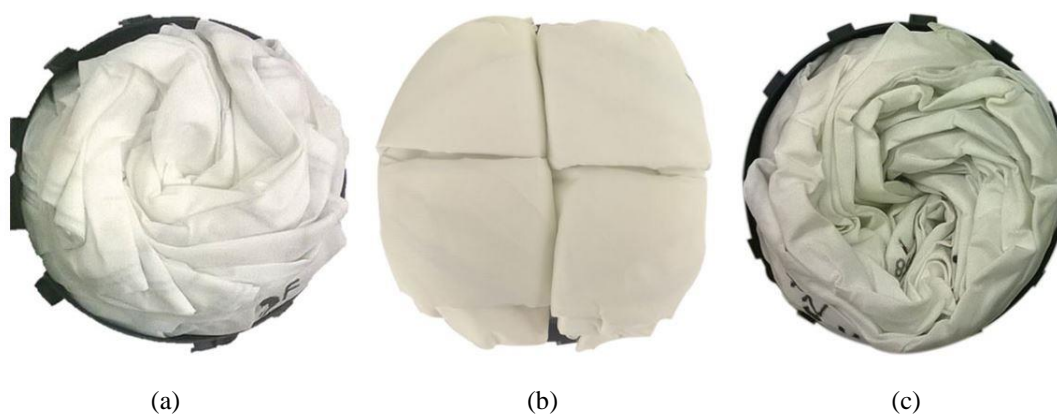


Figura 5: Apresenta três padrões diferentes de dobras onde foram empacotados em recipientes iguais e compactados na mesma altura (Fonte: BRUTON et al., 2016).

BRUTON et al. (2016) explora em seu estudo métodos e mecanismos de empacotamento para padrões de dobras determinados com o intuito de avaliar a influência de tais variáveis no desempenho do airbag, como pode ser visto na Figura 5.

A acomodação do airbag tinha como padrão a forma retangular onde o volante era projetado para se ajustar ao redor dessa unidade, contudo, tendências recentes apontam para o uso de colunas de direção e partes centrais do volante com formato cilíndrico. Dessa forma, os padrões de dobras foram modificados para acomodar montagens cilíndricas como pode ser visto na Figura 5 (a) apresentando um padrão de dobra conhecido como “flasher”, na Figura 5 (b) foi dobrado utilizando um padrão de dobra retangular tradicional que resulta na compressão dos cantos para sua acomodação dentro do perímetro circular e na Figura 5 (c) apresenta o padrão conhecido como “inverted cone” (cone invertido) onde visualmente obteve melhor eficiência ao ser embalado cilíndricamente (BRUTON et al., 2016).

Muitos são os estudos que visam encontrar a geometria correta do airbag dobrado assim como a dinâmica ideal do gás para seu inflamento, visto que, diferentes formatos de airbags são

dobrados por métodos, números e tipos de dobras diferentes. Tais estudos buscam atingir uma simulação realista tendo em vista que seu resultado afeta em como será o impacto e proteção dos motoristas e passageiros (CROMVIK, 2007).

2.3.2 Área Espacial

2.3.2.1 Painel Solar

Em 1995 no Japão, os conceitos de origami ganham novas perspectivas quando foi projetado pelo astrofísico japonês Koryo Miura com o objetivo de serem usados para empacotar e implantar uma matriz de energia solar no veículo espacial de pesquisa chamada Space Flyer Unit (*SFU*) (FEI e SUJAN, 2013).

O método de dobramento chamado de “Miura-ori”, consiste em uma série de dobras que quando aberta aparenta estar dividida igualmente em um tabuleiro de paralelogramos. Tal estrutura de dobras permite que exista apenas uma maneira de realizar sua abertura e fechamento, apresentando como consequência uma implantação bastante simplificada (FEI e SUJAN, 2013; LANDAU, 2014).

A partir deste teste, essa tecnologia continua sendo desenvolvida, contudo atualmente concentrando seus esforços em pequenos satélites e grandes estruturas, com combinações da dobra Miura com diferentes dobras para sua melhor adaptação, como exemplo do protótipo de uma matriz de painel solar desenvolvida pela NASA, apresentado na Figura 6 (LANDAU, 2014).



Figura 6: Protótipo desenvolvido pela NASA de uma matriz de Painel Solar sendo desdobrada
(Fonte: LANDAU, 2014).

2.3.2.2 Telescópio Espacial, Eyeglas

O Eyeglass é uma lente difrativa telescópica espacial dobrável projetada por Robert Lang no Laboratório Nacional Lawrence Livermore, onde utilizou princípios e técnicas de origami em sua criação, permitindo que fosse projetado com uma abertura de 100 metros (FEI e SUJAN, 2013).

O desafio de transportar sem danos uma lente fina de plástico, que apesar de não possuir muita rigidez não apresentaria impedimento, visto que, tal característica não possui relevância em órbita, foi solucionado através da sua redução a partir de um conjunto de vincos precisos dispostos de modo a não comprometer seu desempenho ótico (LANG, 2004).

A estrutura origâmica selecionada é conhecida como “Umbrella” que recebeu esse nome por apresentar semelhança com a estrutura de um guarda-chuva dobrável quando enrolado, onde pode ser facilmente ampliada, apresentando partes de produção em massa. Em 2002, um protótipo de cinco metros de diâmetro, representado na Figura 7, compreendendo 72 segmentos padronizados foi construído e montado para teste onde obteve sucesso ao focar a luz como esperado (FEI & SUJAN, 2013; LANG, 2004).

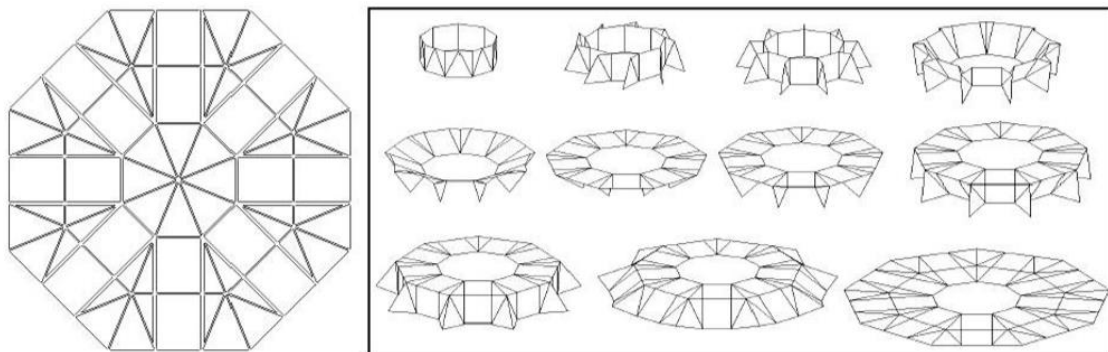


Figura 7: Layout e sequência de dobramento do protótipo de 5 metros criado por Lang (Fonte: HYDE, 2002).

2.3.3 Área Biomédica

Aplicações biomédicas representam uma área de grande interesse e desenvolvimento baseado em técnicas de origami para projetar dispositivos que possam ser inseridos em espaços restritos.



Figura 8: Protótipo de um Stent baseado em técnicas de origami (a) forma contraída, (b) forma expandida (Fonte: FEI e DUREISSEIX, 2012).

Muitas são as estruturas que atualmente estão sendo desenvolvidas, como instrumentos cirúrgicos minimamente invasivos, porém, vale ressaltar que um grande destaque envolvendo essa área foi o desenvolvimento do Stent baseado em técnicas de origami, apresentado na Figura 8 (TURNER et al., 2016).

O Stent tem como objetivo aumentar as artérias e veias obstruídas, através da utilização do padrão de dobras de malha triangular conhecido como bomba de água que possibilita a criação de uma estrutura cilíndrica permitindo que ele assuma um tamanho reduzido enquanto é conduzido através de veias e artérias e quando solicitado, se expande desdobrando-se para aumentar seu diâmetro no local obstruído e atingir sua finalidade (FEI e SUJAN, 2013; TURNER et al., 2016).

Os padrões são feitos a partir de três tipos de dobras, sendo dois conjuntos de dobras helicoidais ortogonais entre si e dobras transversais. Esse padrão de dobras helicoidais permite que o processo de implantação seja altamente sincronizado (FEI e SUJAN, 2013).

2.3.4 Arquitetura

A arquitetura se inspira na arte milenar do origami com vertentes diferentes, como a sua aplicação em telhados de placas dobradas ou fachadas à estruturas arquitetônicas transformáveis ou cinéticas. O design baseado em técnicas de origami apresenta como vantagem ser um modelo em que oferece um mecanismo geométrico com superfície contínua que permite ser realizado em diferentes escalas. Os telhados ou fachadas que se baseiam nas dobras do origami apresentam como característica sua estabilidade na posição em que foi projetado, muitos são os exemplos de estruturas envolvendo tal ideia, desde formas básicas à padrões complicados ou com forma livre (TURNER et al., 2016).

O sistema de estrutura cinética tem como característica sua dinâmica de transformação em que apresenta estados tanto dobrados quanto desdobrados de acordo com o que se deseja.

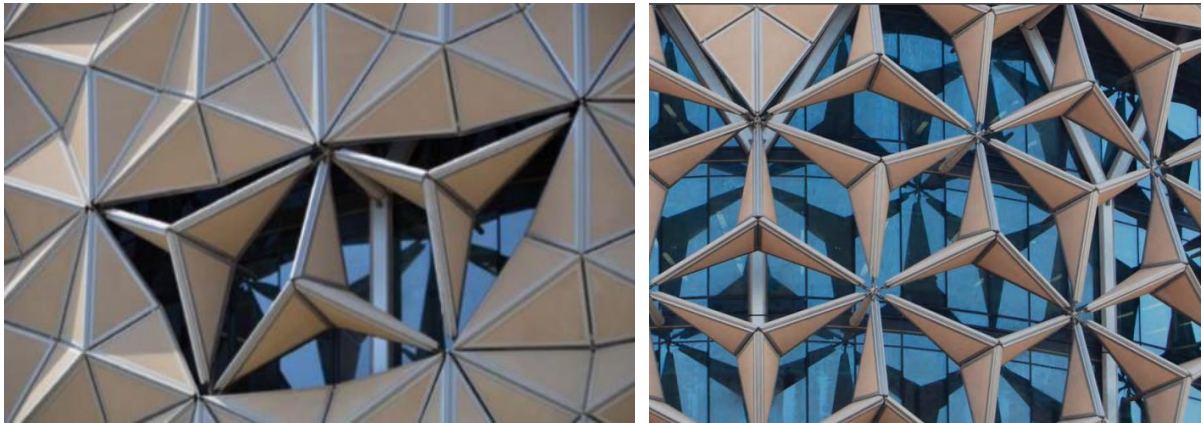


Figura 9: Fachada da Torre Al Bahar (Fonte: TURNER et al., 2016).

Um destaque desse estilo de arquitetura é a fachada de origami móvel da Torre Al Bahar localizado em Abu Dhabi, representada na Figura 9. O conceito do projeto é inspirado no objeto tradicional islâmico “Mashrabiya”, que é uma treliça de madeira usada para obter privacidade e obter controle da incidência de solar e ventilação. Dessa forma, as torres apresentam um sistema de sombreamento cinético que funciona por meio de juntas de movimento, composta por unidades triangulares atuando como dispositivos individuais de sombreamento que se desdobram em vários ângulos em resposta ao movimento do sol, com o intuito de bloquear a radiação solar direta (ATTIA, 2017).

Capítulo 3

Ligas com Memória de Forma

As ligas com memória de forma (*LMF*) são materiais metálicos que possuem a habilidade de recuperar sua forma inicial quando são submetidas a um carregamento termomecânico apropriado. Esse fenômeno acontece durante as transformações de fase do material.

O comportamento de recuperação das ligas com memória de forma é resultado de transformações de fase martensíticas termoelásticas. Estas transformações de fase são fenômenos independentes do tempo, mas que dependem da temperatura e que demonstram forte reversibilidade. (WAYMAN, 1990)

Existe uma grande variedade de ligas que exibem esse efeito memória de forma, a maioria delas possui Níquel, Cobre e Ferro na sua composição química – NiTi, CuZnAl, CuAlNi, FeCrNiMnSi, FeMnSiCrNi e FeCrNiMnSiCo. Porém, nem todas podem recuperar quantidades significativas de deformação ou gerar grandes forças, tornando-as pouco atrativas comercialmente. As ligas de NiTi são as mais utilizadas na indústria, pois essas alinham boa propriedade mecânica com memória de forma (HOGSON, 1990, MONTEIRO et al., 2016; MACHADO e SAVI, 2003). A Tabela 1 apresenta algumas características típicas das LMF, onde E_A representa o módulo de elasticidade de austenita, E_M o módulo de elasticidade de martensita, M_s a temperatura inicial de transformação de martensita, M_f a temperatura final de transformação de martensita, A_s a temperatura inicial de transformação de austenita e A_f a temperatura final de transformação de austenita.

Tabela 1: Propriedades típicas de uma liga de Nitinol (Fonte: PAIVA, 2006)

Propriedades do Material	Temperatura de Transformação	
$E_A = 67,0$ GPa	$M_s = 291,0$ K	$M_f = 282,0$ K
$E_M = 26,3$ GPa	$A_s = 307,5$ K	$A_f = 322,0$ K

A aplicabilidade desse material é vasta e vem sendo utilizada em diversas áreas como por exemplo, aeroespacial, automobilística, médica, robótica, dentre outras (DAE-YOUNG

LEE ,2013; PACHECO et al., 1999; PAIVA e SAVI, 2006; MACHADO e SAVI, 2003; BIRMAN, 1997).

A Figura 10 ilustra o processo de transformação de fase de uma SMA para um carregamento térmico. Elas podem apresentar duas fases microconstituintes, a fase Austenita (A) que é estável em altas temperaturas e a Martensita (M) que é uma fase estável em baixas temperaturas. A Martensita apresenta duas variantes distintas, uma induzida por temperatura: Martensita maclada (M_t); e a outra induzida por tensão: Martensita não maclada (M_d). (MIKOVÁ et al., 2015).

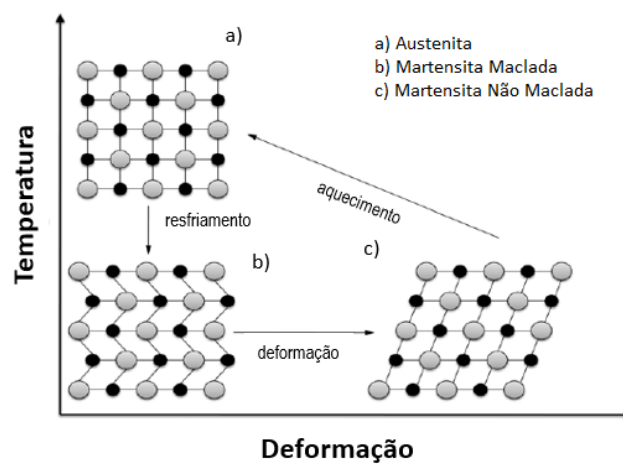


Figura 10: Esquema das transformações ocorridas em um material com memória de forma (Fonte: Adaptado de CZECHOWICZ A., 2015)

A Figura 11 representa a fração volumétrica da Austenita em relação à temperatura. Nesse esquema, é possível perceber laços de histerese sendo formados devido à transformação de fase. Esse comportamento é comum nas SMAs e as propriedades das histereses dependem da composição da liga, do pré tratamento termomecânico e do carregamento mecânico. (CZECHOWICZ, 2015)

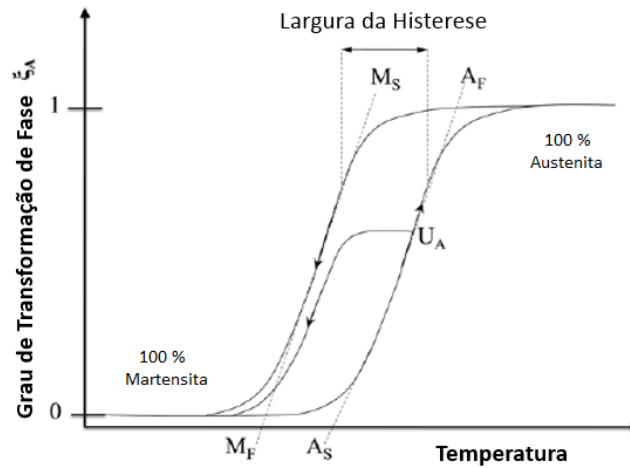


Figura 11: Transformação Martensítica de uma liga com memória de forma (Fonte: CZECHOWICZ A., 2015)

As transformações de fase acontecem de forma direta ou inversa. Essas transformações não ocorrem por difusão de átomos, como ocorrem nas outras ligas metálicas, elas independem do tempo, mas dependem da temperatura e tensão aplicada no material e podem ser descritas da seguinte forma: A_S - temperatura associada ao início do processo de transformação direta $M \rightarrow A$; A_f - temperatura associada ao fim da transformação de fase $M \rightarrow A$; M_S - temperatura associada ao início do processo de transformação de inversa $A \rightarrow M$; M_f - temperatura associada ao fim do processo de transformação de fase $A \rightarrow M$.

É importante ressaltar que se o material estiver a uma temperatura acima de A_f e livre de tensão, ele é completamente austenítico e se o material estiver a uma temperatura abaixo de M_s , ele é completamente martensítico mesmo com a presença de carga.

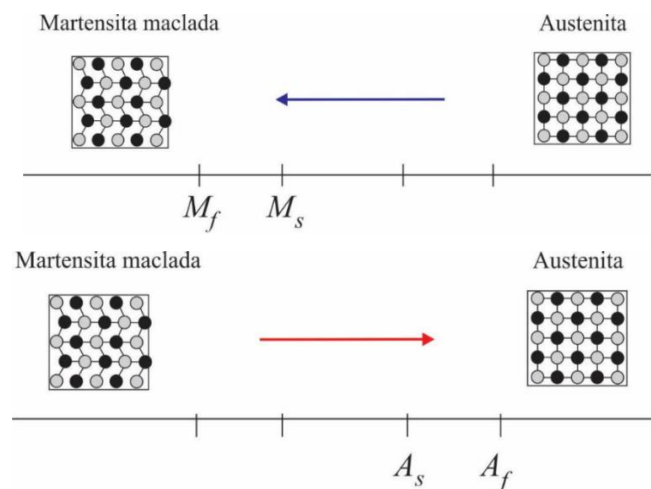


Figura 12: Transformação de fase induzida por temperatura de uma SMA (Fonte: LAGOUDAS, 2008).

Os fenômenos mais comuns apresentados por essa classe de material são: o efeito memória de forma, que pode ser One-way (*OWSME*), Two-way (*TWSME*), a pseudoelasticidade (*PE*) e o efeito memória de forma por tensão assistida.

3.1 Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma (Shape Memory Effect) é representado pela Figura 13. Seu comportamento natural é resultado de uma combinação entre tensão, deformação e temperatura. Esse fenômeno também pode ser definido como One-way shape memory effect, pois a recuperação de forma ocorre durante o aquecimento após o material ter sido submetido a um carregamento mecânico (LAGOUDAS, 2008).

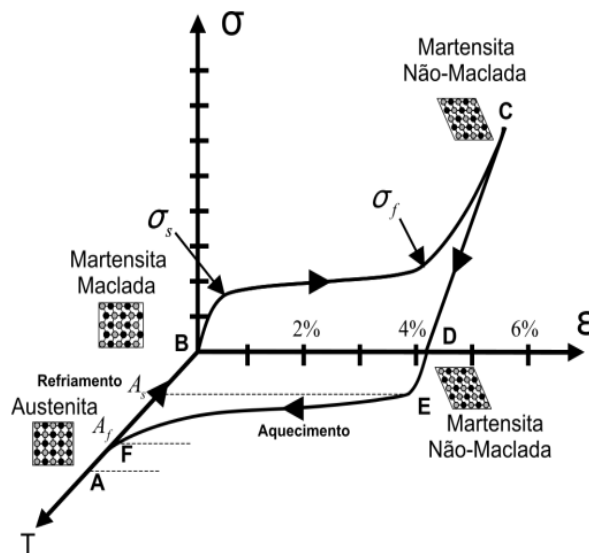


Figura 13: Efeito de Memória de Forma, curva tridimensional tensão-deformação-temperatura (Fonte: LAGOUDAS, 2008)

Como pode ser observado, no ponto A da Figura 13, o material se encontra na fase de Austenita e livre de tensão. A transformação de fase ocorre pela redução de temperatura até o ponto B. Nessa posição o material apresenta uma estrutura cristalina inteiramente Martensítica. Após esse ponto, aplica-se uma tensão inicial (σ_s) induzindo o início do processo de reorientação da Martensita maclada para não maclada até atingir o nível de tensão final (σ_f). No ponto C, o material se apresenta totalmente na variante Martensita não maclada.

Quando o processo de carregamento e descarregamento é finalizado, a liga apresenta uma determinada tensão residual, pois a Martensita não maclada fica retida, como pode ser observado entre os pontos C e D. Essa tensão residual é recuperada através do aquecimento e o material inicia transformação de fase reversa no ponto E até completar o ciclo em F. A partir desse ponto, observa-se o resfriamento do material, e assim o ciclo de transformações é novamente iniciado.

3.2 Pseudolasticidade

A pseudoelasticidade (*PE*) é um comportamento presente nas ligas com memória de forma que é ativado através de um carregamento mecânico. Esse efeito ocorre quando se aplica uma tensão alta suficiente no material induzindo a transformação de fase de Austenita para Martensita não maclada. (LAGOUDAS, 2008)

Em contrapartida ao efeito de memória de memória de forma, a pseudoelasticidade não ocorre com a mudança de temperatura, por isso é considerada como um processo isotérmico. Esse fenômeno ocorre acima da temperatura crítica A_f , na qual a fase Austenita se encontra estável no estado livre de tensão (WARLIMONT et al., 1974; MACHADO e SAVI, 2003; PACHECO et al, 2015).

A Figura 14 exibe o ciclo de carregamento pseudoelástico de uma *SMA*. No início do processo (ponto A), o material se encontra na fase Austenítica. Ao aplicar um carregamento mecânico, a amostra começa a se deformar elasticamente dando início ao processo de transformação de fase para Martensita não maclada. Quando o material atinge a tensão σ^{Mf} essa transformação se completa. Com um aumento subsequente da tensão, o material gera uma deformação elástica na Martensita não maclada, como pode ser visto entre os pontos C e D. Após o ponto D, o carregamento mecânico é gradualmente cessado, o material retorna a sua fase inicial de Austenita e recupera sua deformação. Nota-se que não houve variação da temperatura durante esse processo, ou seja, a transformação de fase é ativada somente pela tensão.

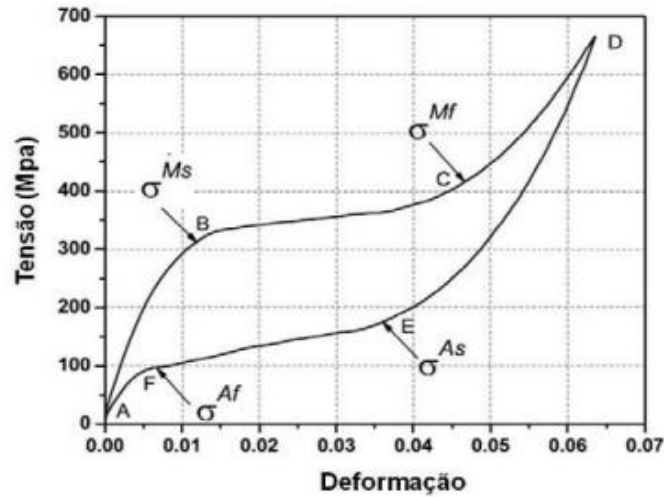


Figura 14: Curva Tensão-Deformação Pseudoelástica (Fonte: LAGOUDAS, 2008)

A Figura 15 representa o diagrama tensão-deformação para os comportamentos pseudoelástico completo e parcial. Quando ocorre um descarregamento, a liga apresenta um comportamento elástico, porém em seguida o material volta à fase Austenítica garantindo dessa forma, uma recuperação da deformação sofrida. Quando ocorre (a) Pseudoelasticidade completa, a temperatura está acima de A_f , e o material é reconstituído integralmente. Quando ocorre (b) Pseudoelasticidade parcial, e a temperatura mantida entre A_s e A_f , a reconstituição é incompleta gerando assim, uma deformação residual (ϵ_r). Essa deformação pode ser recuperada no futuro aquecendo a liga em temperaturas maior que A_f . (CHOPRA & SIROHI, 2013).

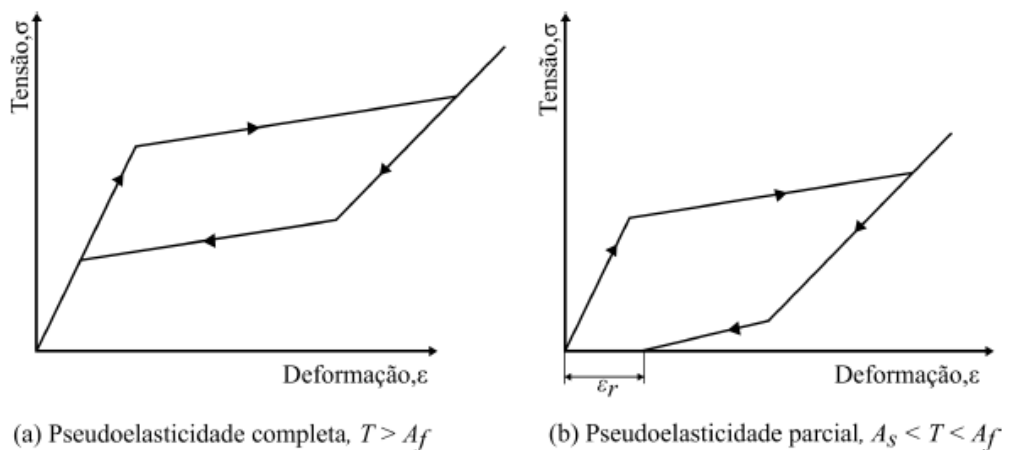


Figura 15: Comportamento Pseudoelástico completo e parcial

Para ligas de $NiTi$, a deformação reversível pode alcançar um patamar de 8%. O tamanho da histerese e os níveis de tensões são influenciados pela liga. (KOH et al., 2014)

3.3 Efeito de Memória de Forma Reversível

Um fenômeno que pode estar presente nas *SMA*s é o efeito de memória de forma reversível ou (Two-way shape memory effect - *TWSME*). Nesse caso, o material pode exibir repetidas mudanças de forma mesmo sem a presença de esforços mecânicos, quando são submetidos a carregamentos térmicos. (LAGOUDAS, 2008; WAYMAN e DURIG, 1990)

Para obter esse comportamento, não natural do material, é necessário treinar uma amostra de *SMA* através de repetidos ciclos de carregamentos termomecânicos. Esse treinamento implica em alterar a microestrutura do material e pode causar permanentes mudanças no seu comportamento.

A capacidade de deformação das ligas que apresentam Two-way shape memory effect - *TWSME* é menor do que as do modo One-way shape memory effect – *OWSME*. Além disso, o treinamento do material cria regiões com tensões residuais. Isso ocorre devido aos constantes ciclos que o material é submetido (PAIVA, 2004; CAVA et al., 1999).

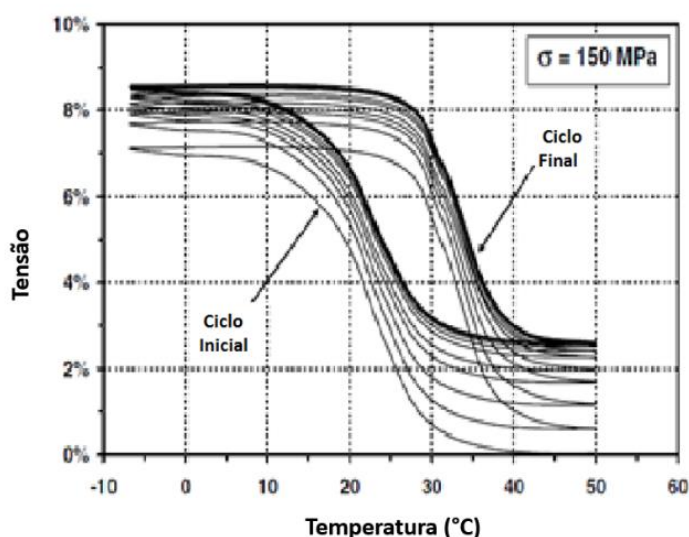


Figura 16: Ciclo Térmico de uma liga com Memória de Forma NiTi, sob um carregamento constante de 150 MPa (Fonte: LAGOUDAS, 2008)

Na Figura 16, pode-se observar o treinamento de uma liga com memória de forma. Nota-se que a cada ciclo, uma deformação plástica permanente é gerada no material.

3.4 Efeito memória de forma com Tensão Assistida

Outro comportamento que uma SMA pode apresentar é o efeito de memória forma com tensão assistida (*SATWME* - Stress Assisted Two Way Memory Effect). Esse fenômeno é ativado através de ciclos de aquecimento e resfriamento do material, podendo o mesmo estar submetido a uma tensão constante ou variável.

A Figura 17 (a) representa a transformação de fase induzida por temperatura na presença de três tensões σ_1 , σ_2 e σ_3 . Neste caso, pode-se notar que o efeito foi ativado por três tensões constantes.

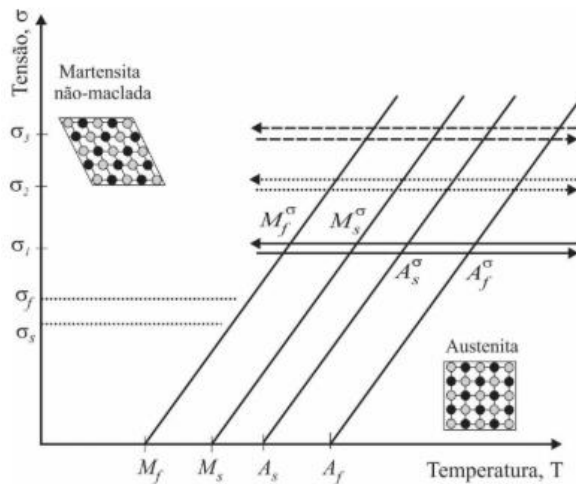


Figura 17 (a): Transformação de fase induzida por temperatura de três amostras σ_1 , σ_2 e σ_3 (Fonte: LAGOUDAS, 2008)

A Figura 17 (b) representa um gráfico de deformação por temperatura para cada tensão aplicada. Pode-se observar que a tensão está diretamente relacionada com a temperatura, ou seja, a transformação de temperatura depende do valor da carga aplicada no material (MONTEIRO et al., 2016).

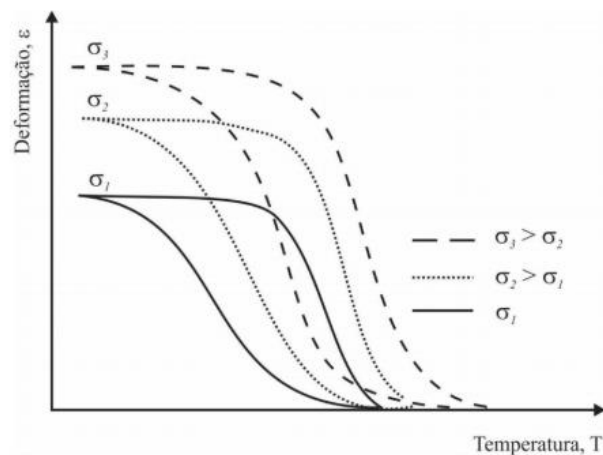


Figura 17 (b): Deformação X Temperatura de três amostras com tensões: σ_1 , σ_2 e σ_3 (Fonte: Adaptado de LAGOUDAS, 2008)

Comparando o efeito memória de forma reversível com tensão assistida, o SATWME apresenta certa vantagem em relação ao TWSME. Isso acontece, pois no efeito memória de forma reversível, as deformações são reduzidas devido aos repetidos ciclos que o material é submetido.

3.5 Aplicações

A utilização de *SMA* vem ganhando cada dia mais espaço devido a sua fácil ativação com baixa voltagem, fácil adaptabilidade, capacidade de compactação, operação silenciosa, biocompatibilidade do material do atuador e excelente resistência a corrosão. São usadas para uma variedade muito grande de produtos, pois conseguem mudar sua forma, rigidez, posição, frequência natural e outras características mecânicas. Essas características permitem que esses materiais sejam utilizados para aplicações em sensores e atuadores, absorvedores de impacto e amortecedores de vibrações (MIKOVÁ, 2015).

3.5.1 Medicina

É importante ressaltar que para que um material seja utilizado no corpo humano, é necessário que seja biocompatível e biofuncional. A biocompatibilidade está relacionada a capacidade de não ser tóxico durante o período em que irá funcionar, e a biofuncionalidade indica que o material deve apresentar bom funcionamento o interior do corpo humano. (MIYAZAKI, 1999).

A primeira vez que o *NiTi* foi utilizado, foi em um caso de ortodontia. Apesar desse material ser mais caro que os convencionais, ele possui características únicas como alta resistência à corrosão, além de apresentar biocompatibilidade. Isso garante que esse material seja usado em diversos campos biomédicos, como neurocirurgia, fisioterapia, urologia, oftalmologia, cirurgia geral, ortodontia, ortopedia e muitas outras. (THOMPSON, 1999)

A parte ortopédica é bastante empregada em casos de fraturas, pois é necessário promover um alinhamento correto durante a cicatrização e deve haver um dispositivo para promover um fortalecimento ósseo. Essas propriedades tem uma forte ligação com a utilização

de *NiTi*, pois a biocompatibilidade garante que isso seja feito de forma segura e eficiente (TAMITA, 2011).

As *LMF* também são muito utilizadas em grampos para recuperação de uma parte do corpo humano fraturada. Isso é possível devido as propriedades desta liga, e uma vantagem muito grande é que quando o material entra em contato com a temperatura do corpo humano, faz com que os grampos fiquem sempre tensionados, facilitando uma recuperação mais rápida para o paciente lesionado.

Ainda abrangendo este tema, é importante ressaltar os Stents que são próteses instaladas no interior de uma artéria com o objetivo de desobstrução dos vasos sanguíneos.

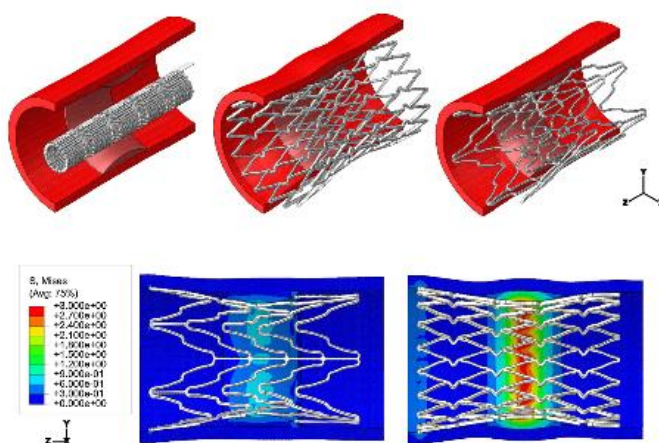


Figura 18: Simulação da expansão de um Stent (Fonte: AURICCHIO, 2015)

A Figura 18 representa o movimento de expansão de um mecanismo como este. Através da utilização de Stents é possível controlar e melhorar o fluxo sanguíneo. A maior parte dos casos de implantação deste equipamento é em pacientes que possuem doença coronariana durante o processo de angioplastia, melhorando assim a quantidade de oxigênio que chega nos órgãos.

3.5.2 Indústria Aeroespacial

A indústria aeroespacial precisa operar cada vez com pesos menores em busca de uma melhor eficiência (MAESTA, 2012). A utilização de flaps (estruturas móveis que garantem a altitude necessária) exerce uma influência nas manobras do avião, porém esse mecanismo necessita de sistemas hidráulicos em conjunto com bombas, atuadores e motores elétricos para

funcionar, elevando o peso e o custo do projeto de uma aeronave. Outro problema enfrentado por este segmento da indústria é o controle dos níveis sonoros. (JANOCHA, 2004)

Através do trabalho de HARTL, 2009 foi possível atenuar o nível de ruído produzido por uma aeronave através da utilização de ligas de memória de forma com o objetivo de promover um formato em “V” (Chevron) que visa um aumento da eficiência do motor. A liga utilizada foi composta por 60% de Níquel e 40% de Titânio, garantindo assim as propriedades desejadas para redução dos ruídos.

A Figura 19 representa uma aeronave, e em destaque é apresentado em definição melhor como as ligas de memória atuam na parte traseira da turbina.



Figura 19: Representação da SMA utilizada na parte de trás da turbina da aeronave (Fonte: HARTL, 2010)

3.5.3 Robótica

Uma das principais áreas de atuação de SMA é a Robótica, onde são usados principalmente como função de atuadores. Um exemplo dessa atuação está presente no artigo de DAE-YOUNG LEE, 2013 em que ele utiliza origami em um robô com roda deformável com padrão de Waterbomb (bomba d'água).

Seu funcionamento se apresenta da seguinte forma: quando uma corrente é ativada, ocorre uma transformação de fases (Martensita – Austenita) e o raio diminui de tamanho devido a uma deformação na superfície. Com o passar do tempo, o atuador é resfriado e sua rigidez diminui, assim, a fase Martensítica volta a se apresentar e o raio original é recuperado.

A Figura 20 representa um modelo de uma roda acionado por esse tipo de atuador passando por obstáculos em um determinado tempo (3s). Isto é um avanço muito importante,

pois as rodas utilizadas atualmente nos veículos não apresentam essa possibilidade de mudança de raio.

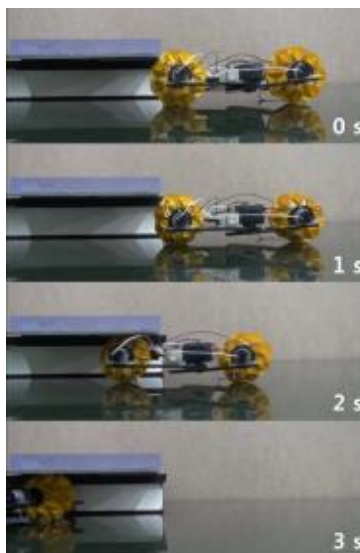


Figura 20: Representação do robô passando pelo obstáculo (Fonte: DAE-YOUNG LEE et al., 2013)

Seguindo este padrão, DAE-YOUNG LEE et al, 2013 fez uma adaptação do modelo de GUEST, 1992 onde uma estrutura feita por origami pudesse sofrer uma alteração de raio através de molas para passar por um obstáculo. É importante ressaltar que com apenas uma folha de papel (2 dimensões) foi possível garantir a transformação em um modelo de 3 dimensões que simulasse uma roda deformável através de dobraduras. A rigidez foi obtida através das dobras e dos vértices da estrutura. A estrutura está representada pela Figura 21.

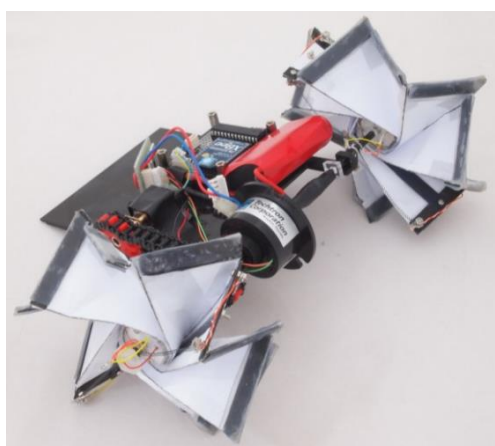


Figura 21: Robô com rodas deformáveis (Fonte: DAE-YOUNG LEE et al, 2013)

Materiais com o objetivo de reforçar a roda foram utilizados, entre eles, fibra de carbono nas bordas, e molas para garantir a rigidez da estrutura e recuperar a contração ocasionada pelos

4 atuadores de *SMA* alocados simetricamente. Os segmentos da roda estão conectados de forma a garantir sempre um formato circular para a roda independentemente da posição. A rigidez da estrutura foi proporcionada com apenas uma parta da estrutura, assim não foi necessário a presença de atuadores em toda estrutura inteira. Dessa forma, a estrutura fica com um grau de complexidade menor e conseqüente permite um aumento da eficiência (DAE-YOUNG LEE, et al, 2013).

KAPLANOGLU desenvolveu uma mão robótica capaz de atuar tendões com o auxílio das ligas de memória de forma. Isso foi possível graças à característica dessas ligas de apresentarem uma deformação relativa a diferentes temperaturas. A Figura 22 mostra uma relação dessa deformação com o aquecimento/resfriamento.

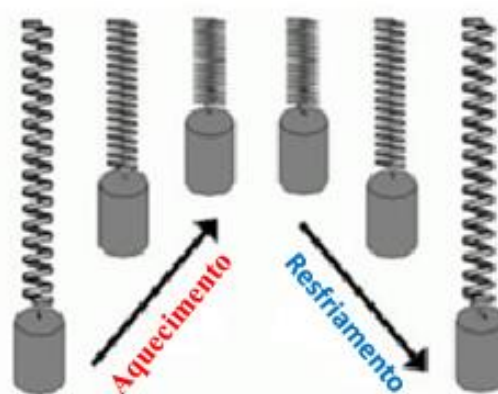


Figura 22: Deformação variando de acordo com aquecimento/resfriamento (Fonte: Adaptado de KAPLANOGLU, 2012)

Na confecção dos protótipos dos dedos foi usado um compósito capaz de garantir força e rigidez. A estrutura artificial usada por cabos como mostrado na Figura 23 foi conectada aos seus respectivos atuadores de *SMA*, promovendo a ocorrência da simulação dos movimentos diários de uma mão (KAPLANOGLU, 2012).

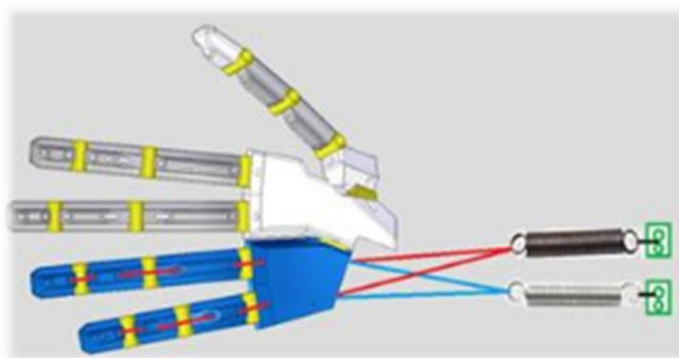


Figura 23: Representação da atuação da mão robótica (Fonte: KAPLANOGLU, 2012).

3.5.4 Válvulas

O estudo de TIBONI, 2011 permitiu a construção de uma mini válvula com qualidades aprimoradas, devido ao baixo peso, pouco ruído, custo reduzido quando comparada com uma válvula normal.

A Figura 24 representa a válvula em uma vista em corte que garante a visualização do seu interior, dessa forma torna-se possível um melhor entendimento do seu funcionamento. A maioria das propriedades adquiridas com este estudo foram obtidas através da utilização de materiais poliméricos, garantindo assim resultados impressionantes.

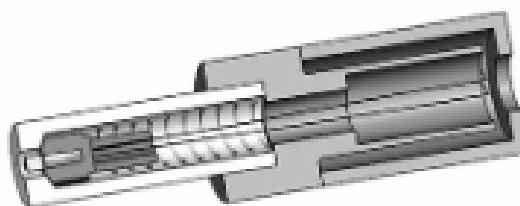


Figura 24: Representação em corte da mini válvula (Fonte: TIBONI, 2011)

3.5.5 Controle de Vibrações

Vibrações são um campo importante da engenharia, e para atenuar este efeito, absorvedores de vibrações sintonizados (*TVA* – Tuned Vibration Absorbers) são utilizados. VON FLOTOW et al., 1994, apresentou dois tipos de aplicações para os *TVA*, a primeira é a atenuação da contribuição modal de um determinado problema, a outra é a neutralização de uma frequência excitação específica.

WILLIAMS et al., 2002 desenvolveu um absorvedor adaptado de vibrações sintonizados (*ATVA* – Adaptive Tuned Vibration Absorber) com elementos de SMA introduzidos. Através de ajustes da frequência natural dos *TVA* para a frequência de excitação ocorrerá uma redução da vibração. *TVA* são classificados como vibrações passivas, e não precisam de forças externas durante a operação.

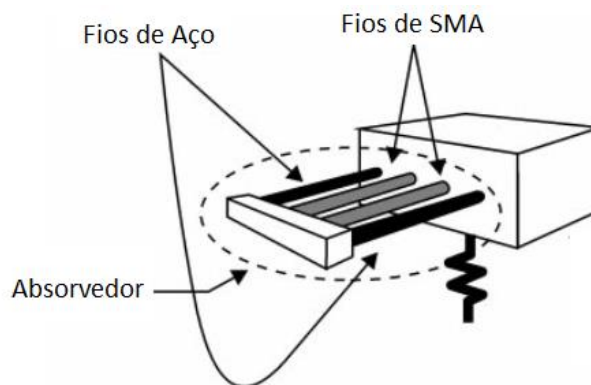


Figura 25: Representação SMA-ATVA (Fonte: Adaptado de WILIIANS et al., 2002)

A Figura 25 representa o funcionamento de um sistema *TVA* com *SMA* introduzidos. São utilizados fios de aço em conjunto com fios de *SMA* conectados a um absorvedor com objetivo de atenuação/controlar de vibrações. Para evitar a amplificação da vibração do sistema primário, é importante que o *TVA* seja corretamente sintonizado com a frequência de excitação externa. Desta forma, as aplicações de *TVA* são limitadas a casos onde a frequência de excitação seja conhecida e mantida constante, para que o absorvedor seja sintonizado de forma correta.

3.6 Fadiga

A Fadiga é um fenômeno responsável por inúmeros casos de falhas na indústria mecânica, acontece devido a carregamentos cíclicos que podem causar estragos antes do previsto, pois pode ocorrer sob um nível de tensões menor do que o de limite de resistência.

A Figura 26 representa o resultado do comportamento do Nitinol desenvolvido por YAN, 2007. Ele soldou fios a laser sob a influência de tratamentos térmicos. Através do gráfico é possível perceber que a resistência a fadiga do material foi maior na temperatura de 400 °C em relação a temperatura de 500 °C.

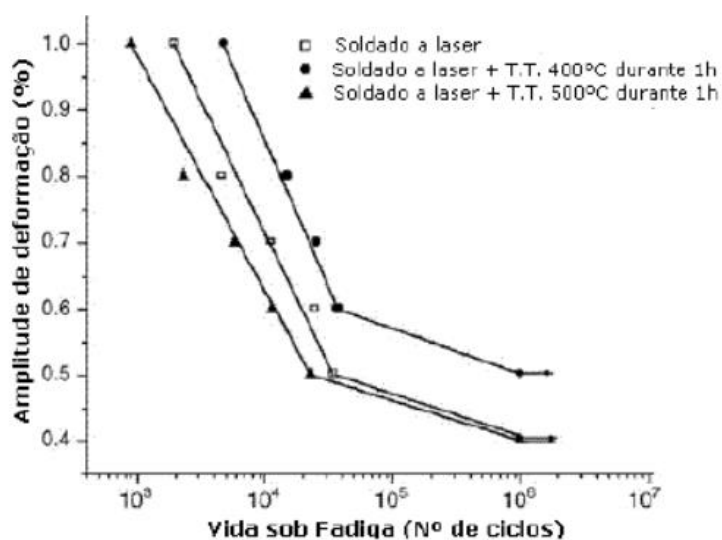


Figura 26: Comportamento do Nitinol sob fadiga e soldado a laser (Fonte: YAN, YANG, LIU, 2007)

De acordo com HUMBEECK (1998) quando ocorre a fadiga funcional, o material deve parar de ser utilizado devido as perdas ocasionas na microestrutura. Então, pensando nisto, o material deve ser capaz de resistir a fadiga. (MORGAN, 2004)

3.7 Atuadores

A implementação de ligas com memória de forma em sistemas de atuação é bastante comum. O complexo comportamento termomecânico das *SMA*s implica na dificuldade de modelar esses sistemas, por isso, simulações numéricas são usadas para facilitar o entendimento do modelo proposto. (LAGOUDAS, 2008; PAIVA e SAVI, 2006)

Diversos tipos de atuadores são usados, os convencionais são pneumáticos, hidráulicos e eletromecânicos, porém eles promovem muita perda de energia e de massa para o sistema, além de apresentarem um volume muito grande. Com a necessidade de melhorar o funcionamento dos sistemas modernos foram criados novos tipos de atuadores com aprimoramento tecnológico para que consiga se desenvolver sistemas leves e com maior poder de atuação. (HUANG, 2002; MAVROIDIS, 2002; JANI et al., 2014).

A Figura 27 mostra alguns dos principais tipos de atuadores de ligas de memória de forma disponíveis. O primeiro atuador (a) é de simples ação, e os dois últimos (b) e (c) são de dupla ação ou antagônicos. Estes atuadores são aquecidos por efeito Joule e são categorizados de acordo com a força de recuperação (*BF* - Bias Force).

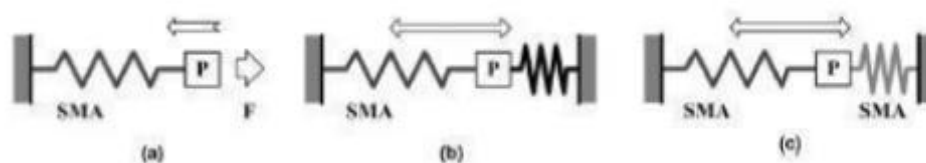


Figura 27: Tipos Básicos de atuadores SMA (Fonte: Adaptado de HUANG, 2002)

Atuadores de simples ação precisam de um auxílio externo para retornar e recuperar o comprimento originado pelo *SMA* inicialmente. Esse auxílio é dado através de uma mola ou massa, assim o dispositivo pode contrair-se novamente, apesar de ter a desvantagem de realizar trabalho em apenas uma direção. (BORTONCELLO, 2015)

Os atuadores antagônicos ou de dupla ação são muito utilizados em próteses, pois é possível realizar trabalho em ambos os sentidos. Algumas vantagens deste tipo de atuador são controle da rigidez do atuador, a redução da histerese e frequência máxima de atuação. (IKUTA et al., 1998; BORTONCELLO, 2015; JANI et al., 2014)

Os atuadores de *SMA* são feitos de fios, molas ou em forma de fitas. Os fios de *SMA* são linearmente induzidos e usados como atuadores, já os atuadores de músculos artificiais são mais utilizados na robótica. É importante ressaltar que *SMA* em forma de fio é o tipo mais barato e pode ser facilmente programado para utilização em uma enormidade de aplicações. (KOH et al., 2014; KOH e CHO, 2013; KIM et al., 2009)

Atuadores de torção para dobraduras de origamis realçam a simplicidade desse tipo de junção. *SMA* produz mudanças de forma que são responsáveis por induzir forças e torques em várias posições de acordo com a programação estabelecida. Podem ser incorporados entre materiais planos e são acionados por corrente elétrica sem precisar de dobraduras manuais.

MONTEIRO ET AL., 2016 realizou um estudo comparativo com quatro atuadores acionados por *SMA*. A configuração de cada sistema foi montada da seguinte forma: um fio de *SMA*, submetido a um carregamento termomecânico (F), uma mola de aço conectada a um fio de *SMA* (MF), duas molas de aço conectadas a um fio de *SMA* (MFM) e dois fios de *SMA* conectados a uma mola de aço (FMF). A Figura 28 indica um diagrama que representa essas configurações de forma simplificada.

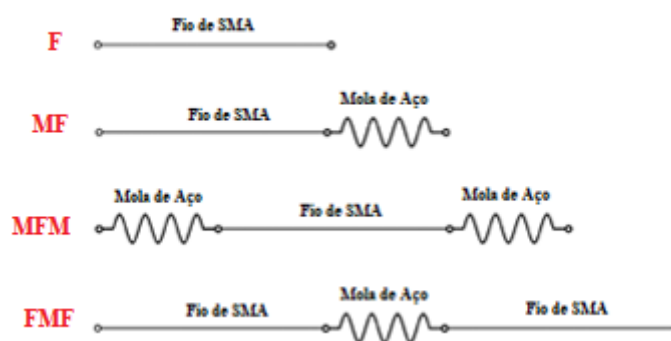


Figura 28: Diagrama esquemático das configurações dos atuadores. (Fonte: MONTEIRO P.C.C,2016)

Para o estudo foram realizadas simulações numéricas em conjunto com equações constitutivas para o modelo de atuador com *SMA* com o intuito de explorar o efeito memória de forma por tensão assistida. A partir dessa ideia, realizou-se uma sequência de carregamento e descarregamento mecânico e posteriormente aquecimento e resfriamento.

O estudo de MONTEIRO ET AL., 2016 confirmou que as transformações de fase desse material dependem diretamente dos carregamentos mecânicos aplicados. Isso influencia na eficiência do atuador, pois se essas transformações forem incompletas, perde-se eficiência no atuador.

3.8 Estrutura de Origami para Fachada Externa

A arquitetura é muito conhecida por ser uma arte estática, porém com o avanço da tecnologia, movimentos dinâmicos estão sendo cada vez mais utilizados para promover um melhor aproveitamento de energias naturais, como solar, eólica, sonora. Somado a isso, as propriedades e as formas dos materiais empregados devem ser utilizados para garantir uma maior eficiência. Os principais materiais utilizados de acordo com CHAI, 2006 são:

- **Metais:** Devido as suas propriedades mecânicas, como alta ductilidade, elevada resistência, alta dureza e são bons condutores de calor. Podem ser ferrosos ou não ferrosos. Normalmente são uma combinação de elementos metálicos. São muito usados em aplicações estruturais.
- **Polímeros:** São empregados devido à alta durabilidade, baixo peso, baixa densidade e custo reduzido em comparação com os outros materiais. Subdivididos em elastômetros, termoplásticos e termoendurecíveis, são formados por macromoléculas.

- **Materiais Naturas:** São materiais que podem ser facilmente encontrados na natureza, como ossos, bambus, algodão e madeira.
- **Fibra de Carbono:** Material bastante resistente e mais leve em comparação com o aço. Uma de suas principais aplicações é em materiais esportivos como tacos e raquetes, além de estar presente em aeronaves. Somado a isso, apresenta resistência a corrosão e alta durabilidade.

Os atuadores possuem uma importância muito grande neste tipo de estruturas, pois são eles que garantem que o movimento seja realizado.

A Figura 29 ilustra como um atuador é capaz de movimentar um elemento móvel. Normalmente os atuadores possuem como fonte de energia a energia elétrica, hidráulica ou pneumática, sendo esta última a mais utilizada em movimentação de sistemas lineares.



Figura 29: Configuração para um Atuador mover um elemento. (Fonte: Adaptado de YOUSSEF, 2014)

MAJED, 2013 descreve em seu trabalho, uma estrutura capaz de interagir com a luz do sol. É chamado de HelioTrace, e é usada em fachadas para absorver a maior quantidade de luz para promover uma economia de energia. Isso é possível, pois o sistema é capaz de se mover de acordo com o traçado do sol durante um dia.

Este processo dura 5 segundos para se adaptar e garantir um conforto para as pessoas que estão dentro do prédio. A estrutura é capaz de se mover em 3 dimensões e com 3 graus de liberdade. Sua principal vantagem é ser projetado em superfícies curvadas tridimensionalmente quando expandidas, e ao se retraírem ficam quase imperceptíveis, pois se alinham com a fachada. Possui um atuador eletromecânico de rotação e é feito de Alumínio, por isso apresenta baixo peso, alta resistência e uma boa tolerância às condições climáticas adversas. São regulados para operar de acordo com o horário de funcionamento do prédio onde é instalado.

A Figura 30 ilustra como o sistema HelioTrace é realizado. O sistema é composto de uma parede de vidro de alto desempenho que é sombreada por painéis opacos externos que são projetados perpendiculares à fachada. Desta forma, é possível ter um nível de sombreamento efetivo de 78% e reduzir o ganho de pico anual no interior em até 81%. Cada abertura é gerada através da configuração de 4 superfícies de sombreamento triangulares. As superfícies a serem dobradas estão localizadas nas bordas da janela.

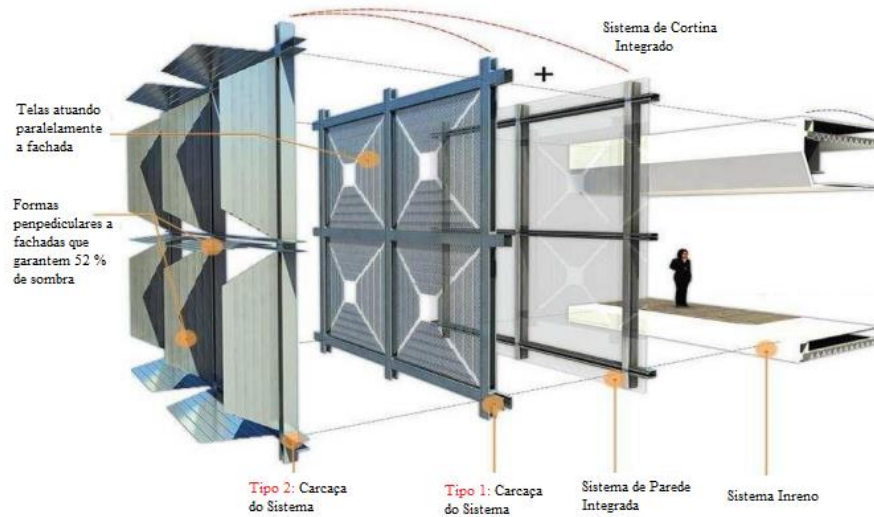


Figura 30: Sistema HelioTrace (Fonte: Adaptado de MAJED, 2013)

Outros tipos de trabalhos também foram realizados buscando promover um maior aproveitamento da luz solar, entre eles pode-se destacar o trabalho de AHMED et.al., 2016 que está ilustrado na Figura 31. Ele promoveu uma comparação entre dois ambientes, um sem este equipamento, e outro com sua utilização e assim AHMED obteve a conclusão que os ganhos resultantes deste sistema eram bastante elevados.

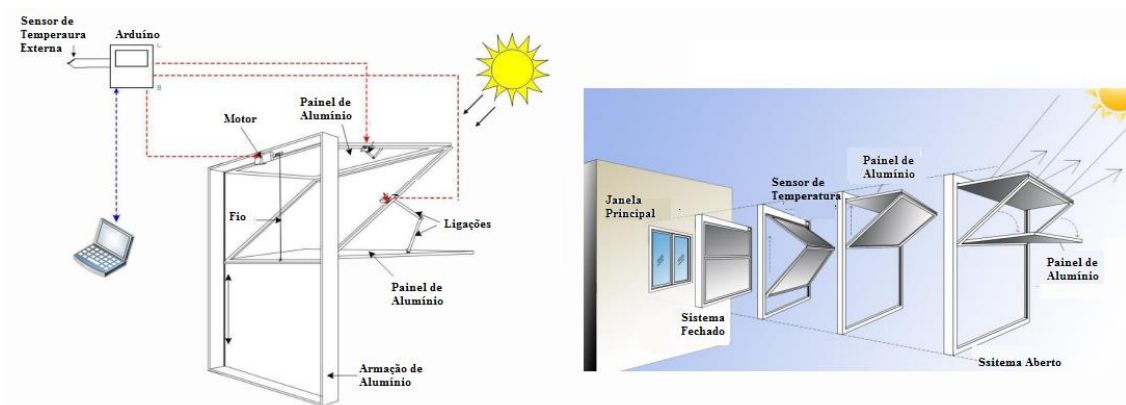


Figura 31: Estágios de Funcionamento do Sistema (Fonte: Adaptado de AHMED, 2016)

A Figura 32 representa o padrão gerado pela fachada da Biblioteca Central de New Phoenix, localizado no Arizona. A fachada elegante se dá pela interação das formas que são geradas pela movimentação das estruturas que geram sombra no interior da biblioteca.

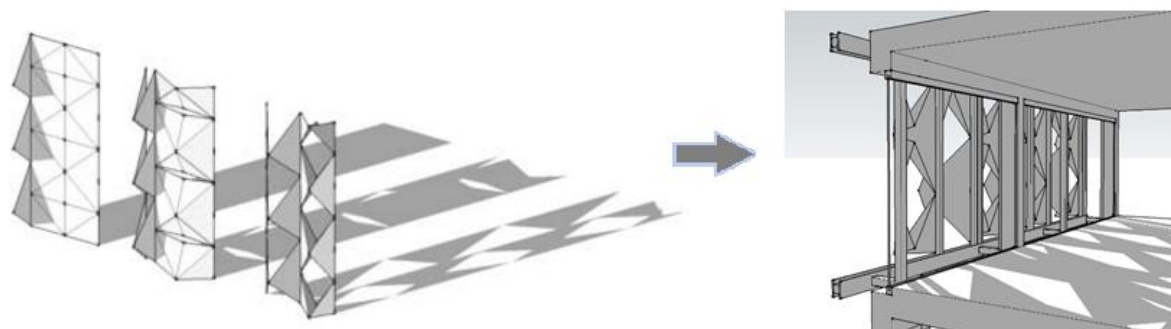


Figura 32: Representação da Fachada da Biblioteca Central de New Phoenix. (Fonte: INTELLIGENT SKINS, 2013)

A Figura 33 demonstra como as dobras podem ser executadas de forma a gerar diversos movimentos para aproveitar de forma mais eficiente a luz solar. É importante ressaltar que o padrão de dobras é essencial para isso acontecer.

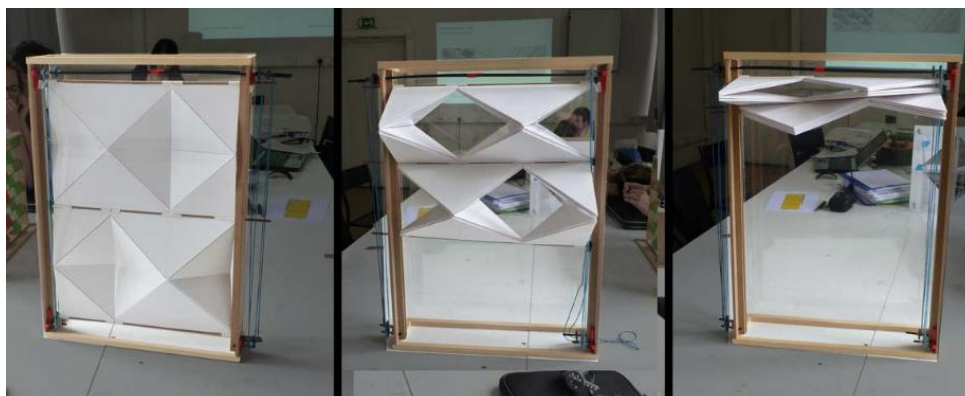


Figura 33: Padrão gerado por Origami (Fonte: INTELLIGENT SKINS, 2013)

Outros tipos de configurações também foram criados para um melhor encaixe de forma a otimizar o espaço utilizado pelo sistema como mostra a Figura 34.

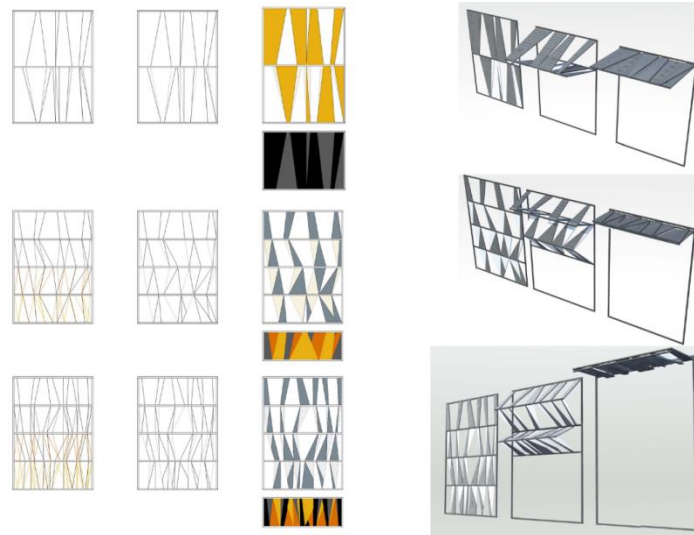


Figura 34: Padrão com maior abertura entre encaixes (Fonte: SERRERO, 2012)

O protótipo representado na Figura 35 desenvolvido por ANSHUMAN, utiliza ligas de memória de forma como forma de atuação dos 4 painéis triangulares que consistem um único módulo, onde cada superfície possui 255 incrementos entre aberto/fechado atuando como “pixel” com intensidade de luz regulável. Cada pixel é acionado por fio de memória de forma de 200 mA. Essa matriz de atuadores gera uma janela dinâmica que permite o controle da iluminação interna do ambiente. Um microcontrolador é responsável por controlar a corrente fornecida para cada conjunto de quatro painéis 20 vezes por segundo. A multiplexação permite o controle dos coeficientes de abertura de cada pixel. Somado a isso, os módulos podem criar imagens, podendo ser utilizado em espaços públicos para divulgação de produtos.

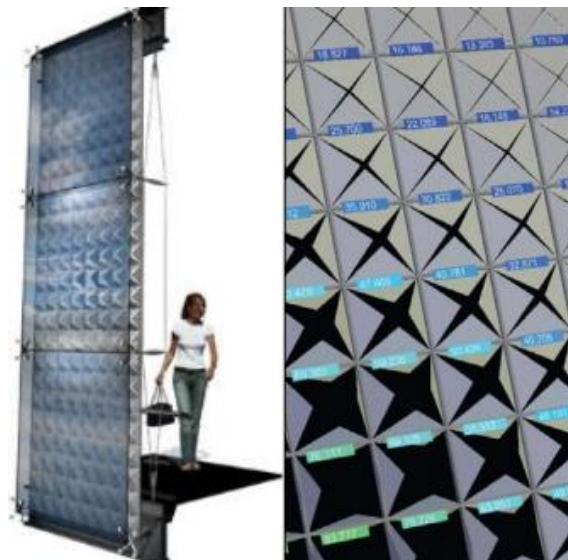


Figura 35: Transmaterial PixelSkin02. (Fonte: FOX, 2009)

A estrutura que será utilizada será composta de perfis triangulares para garantir um controle da quantidade de luz, como mostrado na Figura 36. As *LMF* entram no acionamento desta estrutura para promover o acionamento. As fachadas dinâmicas permitem um conforto térmico e visual, além de serem usadas como integração entre ambientes (interno e externo).



Figura 36: Estrutura de Origami para Fachada. (Fonte: FACHADA VARIABLE, 2018)

A importância dos materiais inteligentes está no fato de poderem atuar este sistema devido a caracterização intrínseca que permite deformações. Além disso, as propriedades sensoriais das LMF permitem obter um controle da operação, podendo inclusive fazer com que o origami volte a estrutura original. Para isso acontecer, é necessário que o sistema tenha rigidez suficiente para garantir a movimentação, e que a deformação gerada seja suficiente para alterar o estado da estrutura em uma escala arquitetônica. Então, as LMF devem atuar como atuadores do sistema. (LIGNAROLO, et al.)

Quando ocorre a atuação de forças externas é necessária uma energia constante para se manter a forma. Para isso, um polímero é utilizado pois é considerado rígido em temperatura ambiente, e quando aquecido é capaz de se tornar “emborrachado” podendo assim ser deformado com maior facilidade. Quando ocorre resfriamento o material é capaz de recuperar a rigidez inicial. (LELIEVELD, 2008)

Capítulo 4

Modelo Analítico

4.1 Molas Helicoidais

As molas helicoidais possuem um papel fundamental na indústria mecânica. Por serem capazes de proporcionar grandes deslocamentos, são muito utilizadas na atuação de sistemas.

A Figura 37 (a) representa uma força F aplicada com o objetivo de fechar a mola. O ângulo entre as espiras é chamado de ângulo de hélice e indica a inclinação das mesmas. Quando uma parte da mola é cortada, efeitos internos são gerados como indicado na Figura 38(b). O diâmetro médio é chamado de D e o diâmetro do fio é d . Quando carregadas axialmente, as molas apresentam uma combinação de esforços internos (torção e cortante). (SHIGLEY, 2005)

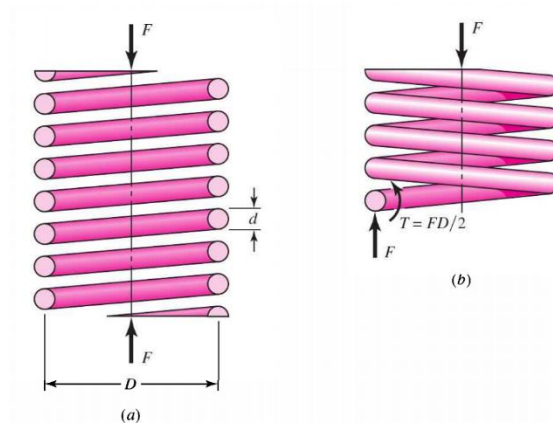


Figura 37: Mola Helicoidal (a) Carregamento Externo e (b) Esforços internos (Fonte: Adaptado de SHIGLEY, 2005)

Na fabricação de uma mola, ocorrem tensões residuais por flexão, mas elas são aliviadas posteriormente através de um tratamento térmico. Possuem a capacidade de promover deflexões elevadas e por este motivo, são bastante usadas na atuação de sistemas. Aliada a capacidade de armazenamento de energia, as molas permitem uma aplicação controlada de força ou torque (PEREIRA, 2009).

As molas lineares elásticas apresentam uma distribuição linear de tensões cisalhantes na direção circunferencial, na seção circular do fio como é mostrado na Figura 38 (a). Já nas molas

com memória de forma ocorre transformação de fase (Figura 38 (b)) e por isso observa-se uma distribuição de tensão não linear.

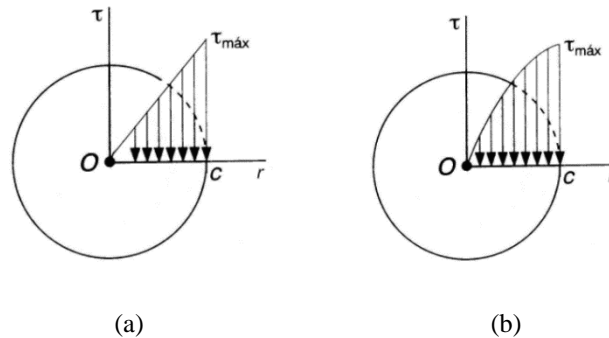


Figura 38: Distribuição de tensão de Cisalhamento em uma mola (a) Linear Elástica e (b) Com memória de forma (Fonte: PEREIRA, 2009)

Para uma mola linear sob tração mecânica, sua constante elástica (k) pode ser determinada usando a seguinte equação:

$$k = \frac{G \times d^4}{8 \times D^3 \times N} \quad (4.1)$$

Sendo:

d = diâmetro do fio

G = módulo de cisalhamento

D = diâmetro médio de espiral

N = número de espiras ativas

Considerando uma mola helicoidal de material com memória de forma, esta apresentará dois valores de rigidez limite devido à variação do valor do módulo de cisalhamento para as fases de Martensita (G_M) e Austenita (G_A). Estes valores podem variar bastante dependendo da liga com memória de forma. Assim, para uma mola que tenha toda a sua seção transversal com uma das duas fases, é possível estimar o valor do módulo de cisalhamento associado a essa fase utilizando-se a equação (4.1) através de um ensaio mecânico onde se meça os valores da força F e deslocamento s :

$$G = \frac{F}{s} \times \frac{8 \times D^3 \times N}{d^4} \quad (4.2)$$

4.2 Molas de Tração

As molas de tração possuem características que as diferem dos outros tipos de mola, pois têm ganchos nas extremidades e suas espiras são encostadas. Geralmente o diâmetro destas molas variam de 0,15 a 8,00 mm, e o gancho auxilia na tração. As tensões no corpo da mola são semelhantes às das molas de compressão, podendo ser tratadas da mesma maneira. (SHIGLEY, 2011)

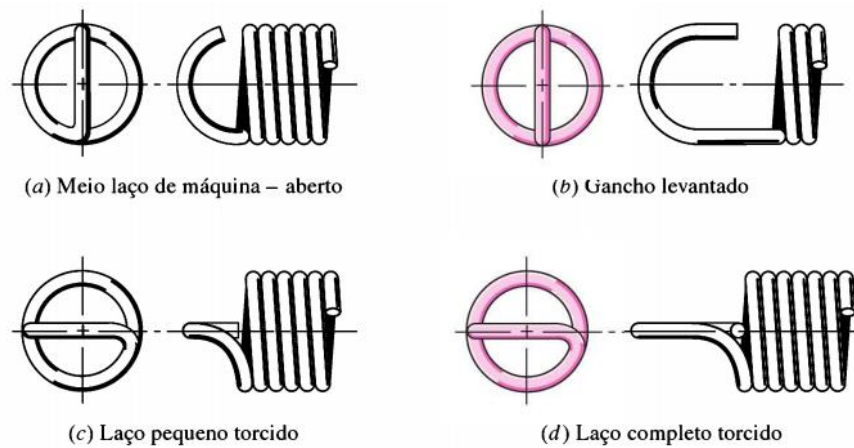


Figura 39: Extremidades usadas nas molas de extensão (Fonte: SHIGLEY, 2011)

As extremidades das molas de tração ou extensão podem apresentar variações como representado na Figura 39. Quando as molas são produzidas com espirais em contato (enrolamento fechado), os fabricantes incluem uma tração inicial (corpo comprimido) para manter o comprimento livre.

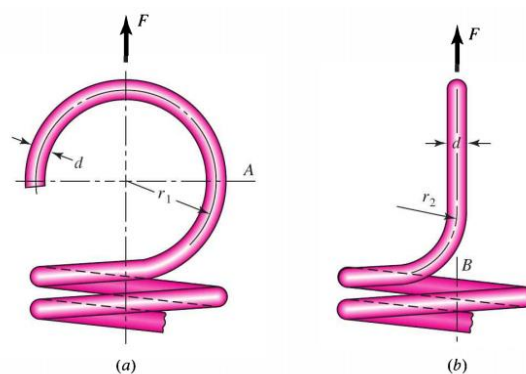


Figura 40: Extremidades para molas de tração (a) Tensão em A e (b) Tensão decorrente da torção em B (Fonte: SHIGLEY, 2011)

A tensão máxima de tração em A é dada por:

$$\sigma_A = F \left[(K)_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \quad (4.3)$$

O fator $(K)_A$ é um concentrador de tensão de flexão para a curvatura, e é definido por:

$$(K)_A = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad (4.4)$$

Onde $C_1 = 2r_1/d$. A tensão máxima no ponto B é:

$$\tau_B = (K)_B \frac{8FD}{\pi d^3} \quad (4.5)$$

Em que $(K)_B$ é um fator de correção para a curvatura:

$$(K)_B = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad (4.6)$$

Em que $C_2 = 2r_2/d$.

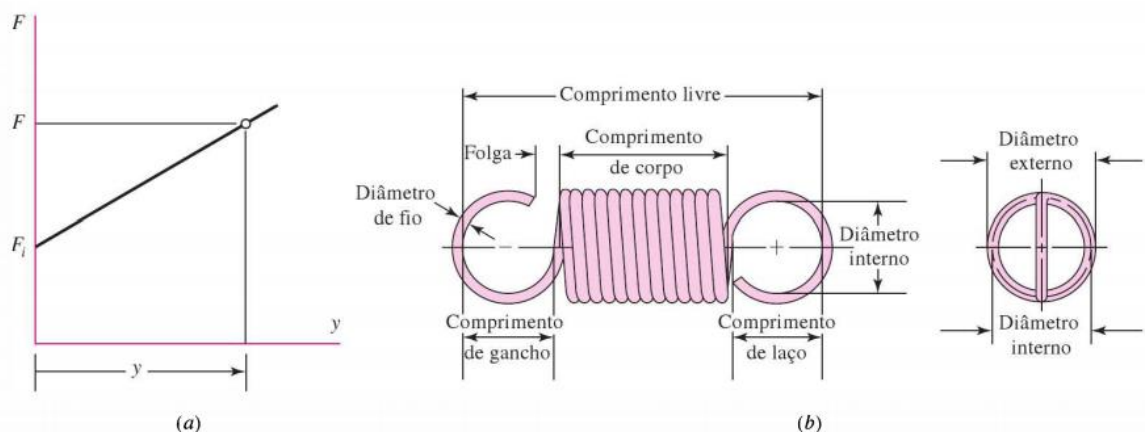


Figura 41: (a) Curva Carga-Deflexão de uma mola de extensão e (b) Geometria de uma Mola de Extensão (SHIGLEY, 2011)

A Figura 41 mostra uma curva força x extensão, onde y representa a deflexão além do comprimento livre (L_o), e F_i representa a tração inicial que deve ser ultrapassada antes que a

mola comece a defletir. Esta relação carga-deflexão é definida pela seguinte equação, em que k é a razão da mola:

$$F = F_i + ky \quad (4.7)$$

Medido no interior dos laços de extremidade, o comprimento livre é definido por:

$$L_o = 2(D - d) + (N_b + 1)d \quad (4.8)$$

Onde D é o diâmetro médio de espiral e N_b é o número de espiras. O número de espiras ativas no corpo é:

$$N_a = N_b + G/E \quad (4.9)$$

Em que G e E são respectivamente, o módulo de elasticidade e o de tração.

4.3 Combinação de Molas

Quando várias molas são combinadas, o valor da sua rigidez dependerá da combinação do sistema, podendo este ser em série ou em paralelo. Combinações em série caracterizam-se por apresentarem uma mesma força presente em todas as molas contribuindo para uma deflexão total. Já as molas em paralelo, possuem uma mesma deflexão e a força total é dividida individualmente entre as molas. (NORTON, 2013)

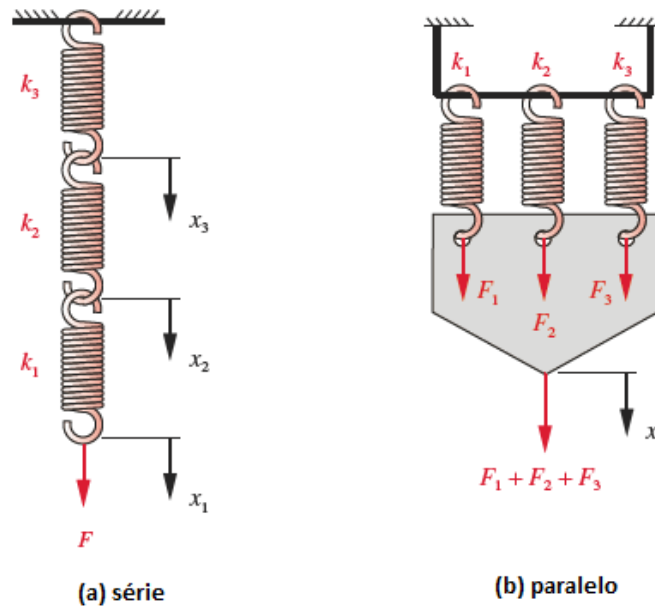


Figura 42: Combinação de molas em (a) série e (b) em paralelo (Fonte: NORTON, 2013).

A Figura 42 apresenta um esquema de uma combinação de molas, na Figura 42 (a) está representado o diagrama de corpo livre de molas combinadas em série, e na Figura 42 (b) em paralelo. A combinação adequada é fundamental no funcionamento do sistema.

Para calcular a rigidez de um sistema em série somam-se as constantes de mola de forma inversa, visto pela Equação (4.10):

$$\frac{1}{k_{total}} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \dots + \frac{1}{k_n} \quad (4.10)$$

Já em um sistema em paralelo, as constantes são adicionadas diretamente como exibido na equação (4.11):

$$k_{total} = k_1 + k_2 + k_3 + \dots + k_n \quad (4.11)$$

4.4 Rigidez de uma barra axial

As constantes de mola pode ser um valor constante como ocorre nas molas lineares ou pode variar de acordo com a deflexão (mola não linear) o ideal é trabalhar com molas lineares, pois essas permitem controlar o carregamento. (NORTON, 2013)

Uma barra longa pode ser utilizada como um elemento elástico linear [SHIGLEY, 2005]. Para calcular a rigidez de uma barra carregada axialmente utiliza-se a equação (4.12):

$$k = \frac{A \times E}{l} \quad (4.12)$$

A = área da barra

E = módulo de elasticidade

l = comprimento da barra

Independente da configuração do elemento pode-se estabelecer uma constante de rigidez k como sendo a inclinação de sua curva força-deflexão [SHIGLEY, 2005] definida pela equação (4.13).

$$k = \frac{\Delta F}{\Delta \delta} \quad (4.13)$$

4.5 Atuação do Sistema

A parte analítica desse projeto foi estudada a partir de um modelo físico de um atuador, composto por uma mola de SMA e duas molas lineares-elásticas de aço, representado esquematicamente pela Figura 43, onde dois estados são considerados na análise. O estado (1) representa uma condição de temperatura ambiente do sistema para o qual ocorre o carregamento mecânico da mola de SMA através da sua união com o conjunto de duas molas de aço em paralelo. Nesse estado, considera-se que a mola de aço é suficientemente rígida para promover uma força elevada, de modo que a mola de SMA encontra-se na fase de Martensita não maclada (M^+). O estado (2) representa uma condição de temperatura elevada (acima de A_f) em que a SMA se encontra totalmente na fase de Austenita (A). Quando a mola de SMA esfria, ela retorna para a condição (1), e assim conclui-se o ciclo em (1) \rightarrow (2) \rightarrow (1).

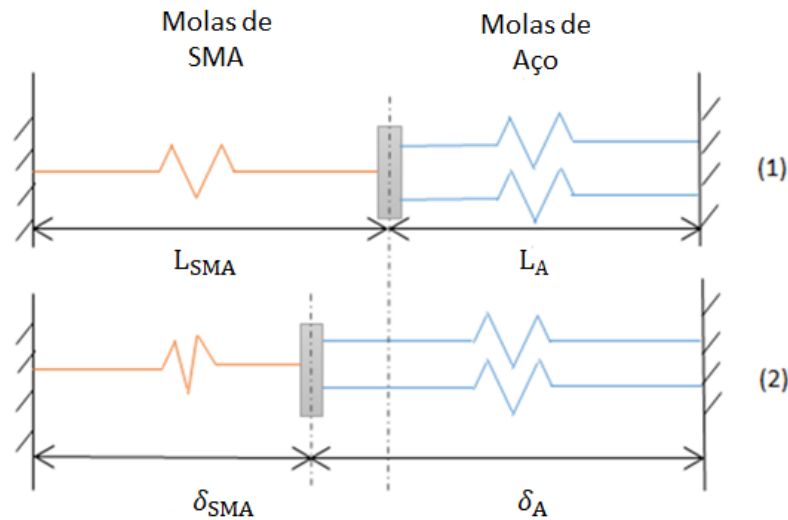


Figura 43: Representação do Atuador

O atuador utilizado para acionar o dispositivo origâmico considera uma combinação de duas molas elásticas lineares em paralelo unidas, em série, a uma mola de SMA, como representado esquematicamente pela Figura 43. O estado (1) representa esta configuração, já o estado (2) mostra a estrutura atuada, gerando dessa forma uma deformação que altera o sistema.

Nesse esquema apresentado pela Figura 43, a situação (1) representa os comprimentos da mola de SMA (L_{SMA}) e das molas de aço (L_A) quando são unidas, já na condição (2), δ_{SMA} e δ_A representam o deslocamento da mola com material inteligente e dos fios de aço, respectivamente, ao aquecer a mola de SMA. O modelo proposto permite estimar o valor do deslocamento total (δ_{total}) desse sistema nas condições adotadas, através da equação de compatibilidade:

$$\delta_{total} = \delta_{SMA} + \delta_A = \delta'_{SMA} + \delta'_A \quad (4.14)$$

Para estimar o valor da força de tração, desenvolve-se um modelo simplificado no qual as molas são substituídas por barras axiais com rigidez equivalente à das molas. Considera-se na análise uma deformação máxima de 4% do comprimento inicial da barra de SMA, da ordem de 50% do valor máximo típico para estes materiais.

4.6 Análise Linear

Materiais com memória de forma podem sofrer uma deformação de no máximo 8% do seu comprimento inicial (L_0) para não ocorrer plastificação no material. (AZEVEDO, 2016; PAIXÃO e RENTES, 2014). Na análise desenvolvida, adotou-se um valor máximo de 4% do comprimento inicial para evitar fadiga funcional, associada à perda de atuação ao longo de carregamentos cíclicos (AZEVEDO, 2016).

O modelo foi simplificado e utilizado para avaliar o desempenho do sistema de atuação, representado esquematicamente na Figura 44. Nesta configuração, k_{SMA} e k_{EQ} representam a rigidez equivalente da mola de SMA e a rigidez equivalente das duas molas de aço em série, respectivamente. A análise envolve calcular a deflexão do sistema, a partir de parâmetros estabelecidos, considerando duas condições limites para a mola de SMA: configuração Austenítica e Martensítica.

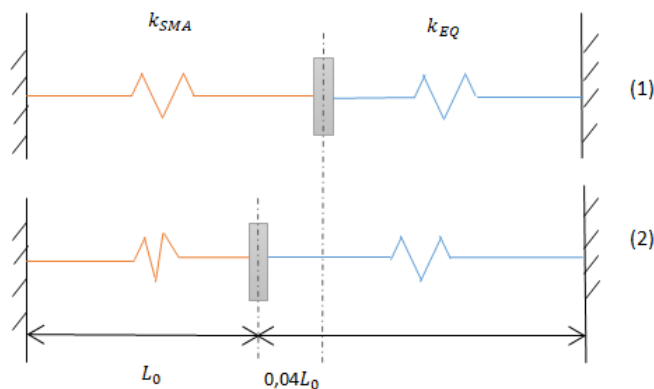


Figura 44: Representação esquemática do modelo simplificado para o atuador

Definidas as condições do atuador, o modelo analítico simplificado foi utilizado para verificar o desempenho do atuador a partir de uma análise linear, considerando transformações de fase constantes ao longo de toda a seção transversal da barra.

As condições adotadas para realiza a análise linear foram baseadas nos dados utilizados no modelo numérico que determinaram algumas condições de estudo (Tabela 2). Analogamente ao estudo do atuador com molas o estudo para a análise linear foi reduzido para uma análise de fios.

Tabela 2: Dados do atuador.

Módulo de Elasticidade do Aço	$E_{aço}$	200 GPa
Módulo de Elasticidade – Austenítica	E_A	75 GPa
Módulo de Elasticidade – Martensítica	E_M	28 GPa
Raio do fio de SMA	r_{SMA}	0,075 mm
Comprimento Inicial	L_0	200 mm

Considerando a equação 4.12, foi determinada a constante de rigidez k do fio de SMA na fase Austenítica e Martensítica, resultando em $k_A = 6,627 \text{ N/mm}$ e $k_M = 2,474 \text{ N/mm}$. Dessa forma, foi considerado $L = L_{SMA}$ e adotou-se três condições de relação de rigidez para cada fase a fim de analisar sua relação com o deslocamento, listadas a seguir para fase Austenítica e Martensítica, respectivamente:

$$\begin{aligned}
 k_{aço1} &= \frac{1}{2} \times k_A & k_{aço3} &= \frac{1}{6} \times k_A \\
 k_{aço2} &= \frac{1}{4} \times k_A & k_{aço1} &= 2 \times k_M \\
 & & k_{aço2} &= 4 \times k_M \\
 & & k_{aço3} &= 6 \times k_M
 \end{aligned}$$

Como o sistema apresenta uma configuração em que o fio de aço e o fio de SMA estão em série, foi utilizada a equação 4.3 para determinar a constante de rigidez equivalente k_{eq} para cada condição na fase Austenítica e na fase Martensítica.

Tabela 3: Relação de rigidez da mola de aço e rigidez equivalente para cada condição na fase austenítica e martensítica.

Condição na fase Austenítica	$k_{aço1} = 3,313 \text{ N/mm}$	$k_{eq1} = 2,209 \text{ N/mm}$
	$k_{aço2} = 1,657 \text{ N/mm}$	$k_{eq2} = 1,325 \text{ N/mm}$
	$k_{aço3} = 1,105 \text{ N/mm}$	$k_{eq3} = 0,946 \text{ N/mm}$
Condição na fase Martensítica	$k_{aço1} = 4,948 \text{ N/mm}$	$k_{eq1} = 1,649 \text{ N/mm}$
	$k_{aço2} = 9,896 \text{ N/mm}$	$k_{eq2} = 1,979 \text{ N/mm}$
	$k_{aço3} = 14,844 \text{ N/mm}$	$k_{eq3} = 2,120 \text{ N/mm}$

A partir das condições, a deflexão total dos fios baseado na configuração definida de dois fios, um de aço e um de SMA em série, é calculada submetendo-os a uma força de 6 N. Os resultados são apresentados no Capítulo 7.

Capítulo 5

Procedimento Experimental

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental desenvolvido para caracterizar o comportamento de um protótipo de estrutura origâmica atuada por uma mola helicoidal com memória de forma a partir de carregamentos termomecânicos.

A construção e a análise experimental do protótipo foi realizada no Laboratório de Sistemas e Estruturas Inteligentes (LASEI) do CEFET/RJ. O protótipo desenvolvido é composto por uma estrutura origâmica fixada em uma das extremidades e submetida à atuação na sua extremidade oposta por um sistema de atuação antagônica capaz de resultar em um movimento de abertura e fechamento da estrutura origâmica.

A estrutura a ser atuada possui um padrão de origami conhecido como “Waterbomb” e foi escolhida devido ao seu padrão que permite a abertura e fechamento da estrutura por completo. Representada na Figura 45, a estrutura foi confeccionada a partir de papel cartão e recoberta em sua totalidade por vinil adesivo transparente com dimensão 150 mm x 150 mm. Para melhor movimentação da estrutura, foi realizado o corte de seus vincos permitindo inserir um espaçamento de 2 mm entre eles como pode ser visto na Figura 45 (c).

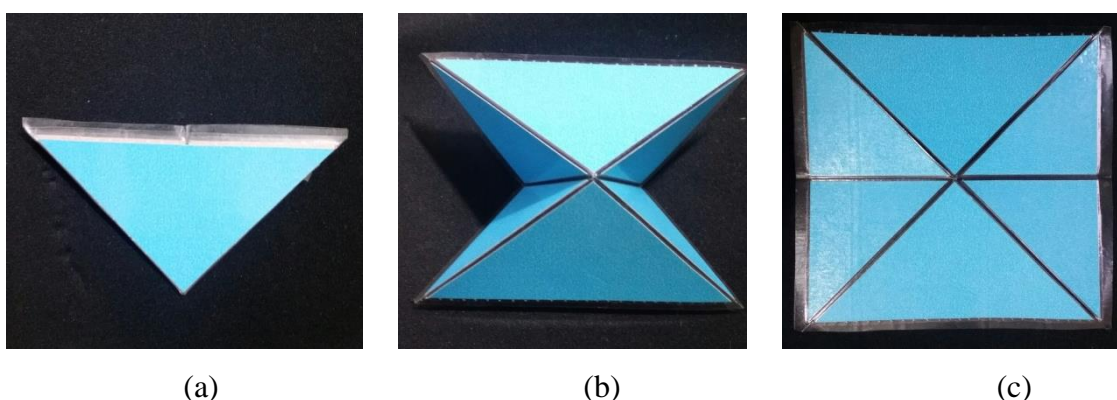


Figura 45: Estrutura origâmica com padrão “Waterbomb” (a) completamente fechada, (b) parcialmente fechada e (c) completamente aberta.

O atuador utilizado foi uma mola helicoidal de liga com memória de forma *NiTi*, conhecida comercialmente como Flexinol® do fabricante Dynalloy, devido à sua característica em que permite aplicações envolvendo baixas forças e altos deslocamentos quando comparado

ao fio com memória de forma. O sistema foi dimensionado de modo a permitir um ciclo de vida elevado quando utilizado dentro dos parâmetros corretos.

A contração da mola é ativada por meio de corrente elétrica que resulta no aquecimento do fio por efeito Joule. De acordo com o fabricante, o Flexinol possui uma temperatura associada ao início do processo de transformação da fase austenítica entre 70 °C a 90 °C com sua utilização segura até uma tensão máxima de 172 MPa. As especificações da mola utilizada no projeto estão descritas a seguir na Tabela 4:

Tabela 4: Especificação da mola de *NiTi*

Diâmetro do fio	0,8 mm
Diâmetro médio	6,4 mm
Número de Espiras	17
Coefficiente de Poisson	0,33

Foram utilizadas duas formas de cargas distintas para realizar o carregamento mecânico. O primeiro carregamento mecânico foi realizado com pesos padrões de 200 g, 400 g e 600 g e o segundo carregamento foi realizado com duas molas de aço disponíveis no laboratório montadas em paralelo, com constante elástica da mola calculada em $k_{aço} = 0,327$ N/m cada mola, resultando em uma constante elástica equivalente $k_{eq} = 0,654$ N/m.

Para realizar o retorno da mola, o acionamento é realizado com a elevação da temperatura da mola a partir da imposição de uma corrente elétrica na mola utilizando uma fonte de alimentação HY3003E-3 com uma corrente máxima de 2,53 A.

5.1 Descrição do Ensaio Experimental

Para realizar a análise do comportamento do atuador e do funcionamento do sistema mostrado na Figura 46, foi necessário o uso de um suporte para a sustentação do sistema na posição vertical através de uma braçadeira que fixou uma das extremidades da estrutura origânica. Na sua extremidade oposta foi adicionado um mecanismo de tensionamento a fim de gerar carga mecânica constante, com o objetivo de manter a estrutura origânica no estado completamente aberto para a condição de temperatura ambiente, na qual não é aplicada corrente elétrica à mola de SMA.

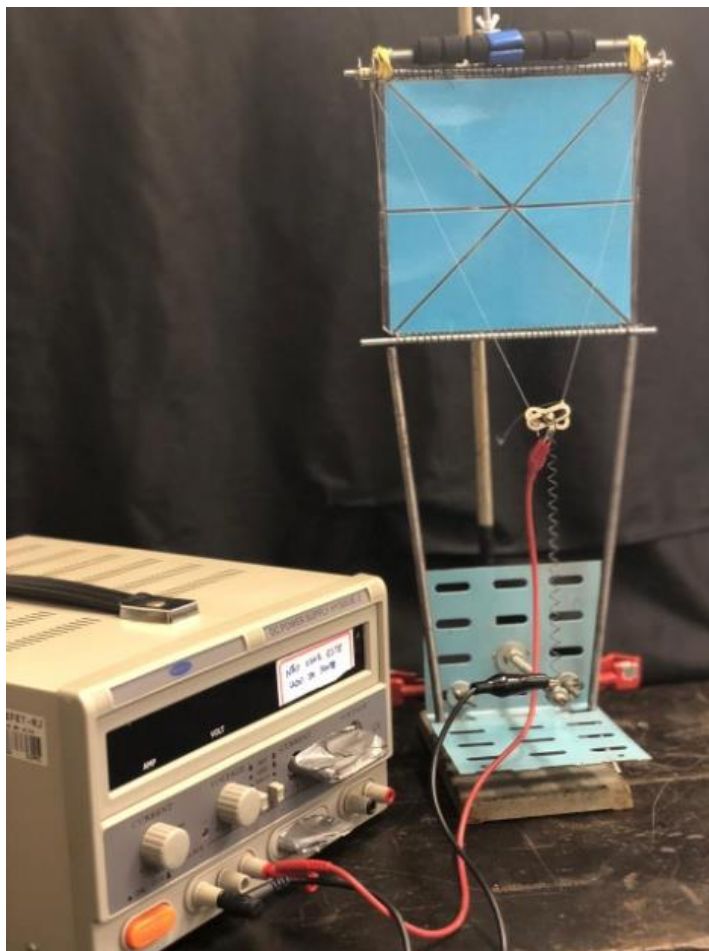


Figura 46: Estrutura Experimental montada com o carregamento mecânico realizado por duas molas de aço.

Para que a estrutura pudesse ser acionada gerando um movimento de fechamento através do atuador fixado na base do suporte do sistema, foram adicionados dois fios de nylon nas duas laterais da estrutura origêmica da extremidade de baixo onde se localizava a carga mecânica. Através de um sistema de roldanas localizado na extremidade superior fixa, os fios foram conectados ao atuador como objetivo de gerar um movimento oposto ao da carga mecânica. A Figura 47 apresenta uma descrição esquemática do sistema para as duas configurações estudadas para a aplicação da carga mecânica: molas de aço e peso morto.

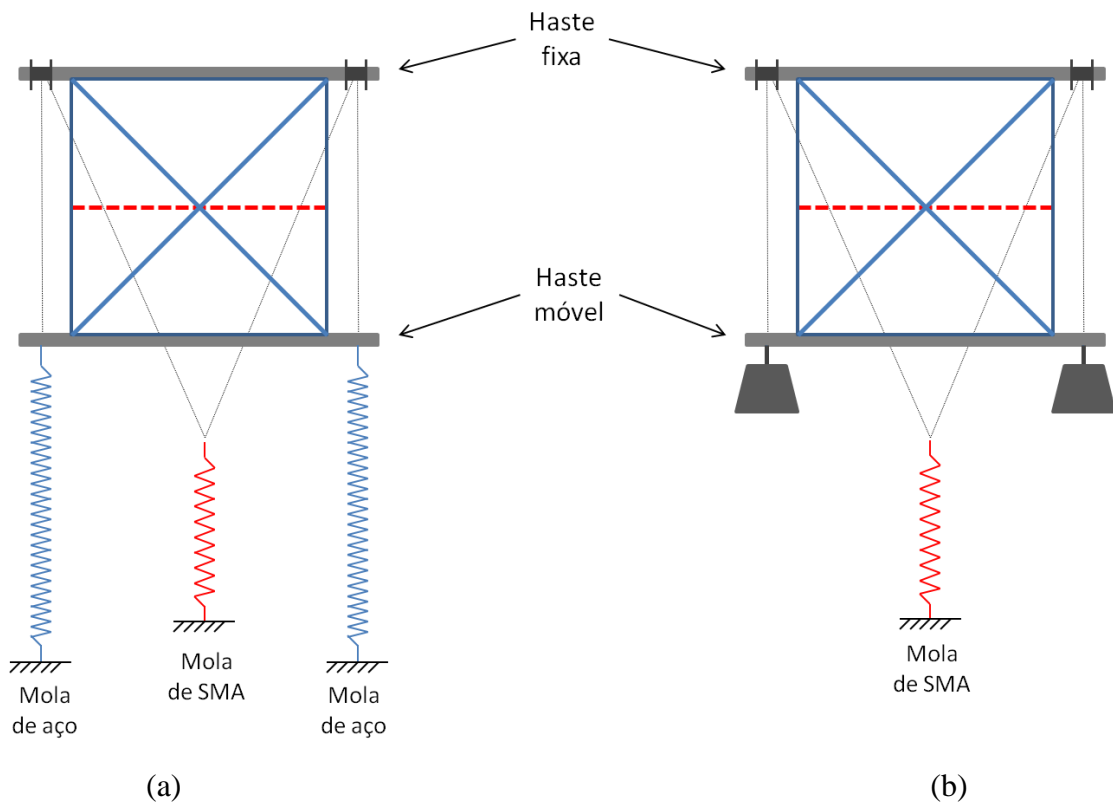


Figura 47: Diagrama esquemático do experimento para as duas configurações estudadas para a aplicação da carga mecânica: (a) molas de aço e (b) peso morto

Para realizar o acionamento do atuador, foi conectado à suas extremidades a fonte de alimentação HY-3003E-3 controlada manualmente para o fornecimento de corrente elétrica a fim de gerar o aquecimento através do efeito Joule. Durante os experimentos realizados, foi fornecido um valor máximo de corrente de 2,56 A e uma diferença de potencial elétrico de 1,9 V, observado na Figura 48.

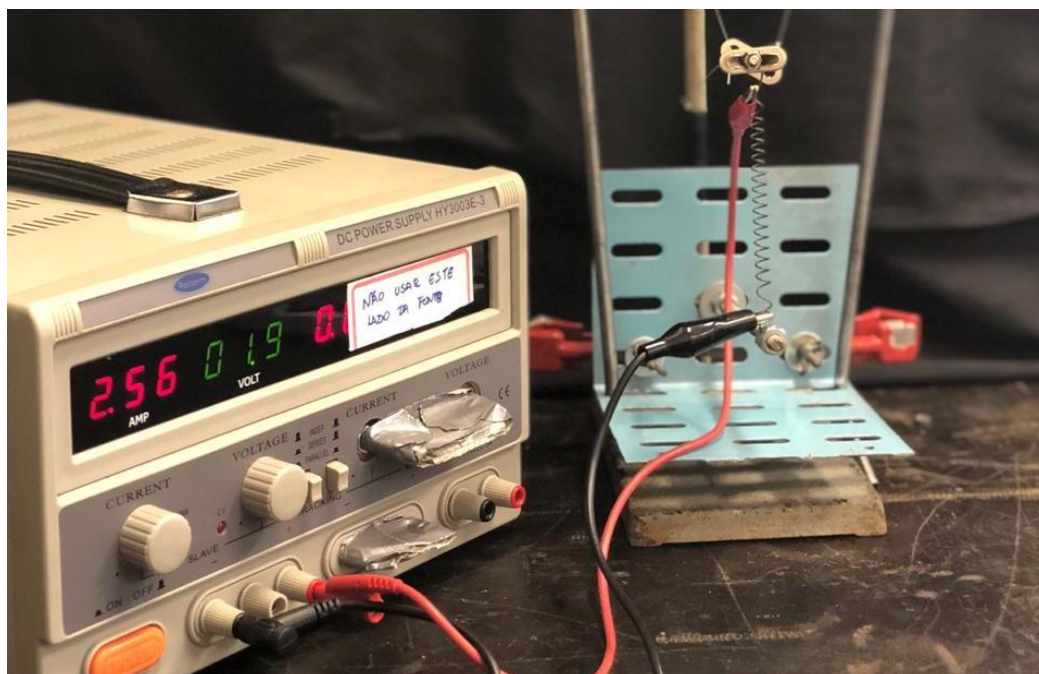


Figura 48: Fonte de alimentação HY-3003E-3 conectada a mola de memória de forma.

Do ponto de vista da análise estrutural do atuador, assim como as reações de mudanças de fases esperada pela variação de temperatura e tensão, o ensaio se inicia a uma temperatura ambiente com uma estrutura de Martensita maclada. Em seguida é aplicado o carregamento mecânico resultando na deformação da mola e sua transformação para Martensita não-maclada. Para induzir a atuação da mola é utilizada a corrente elétrica que aumenta a sua temperatura por efeito Joule, levando à sua contração através da recuperação parcial da sua forma inicial devido a um processo de transformação de fase para Austenita, conforme pode ser observado na Figura 49. Contudo, quando a corrente elétrica foi interrompida ocorre o resfriamento da mola até à temperatura ambiente, resultando na transformação de fase direta da Austenita para a variante Martensita não-maclada, devido a tensão constante que atua no sistema.

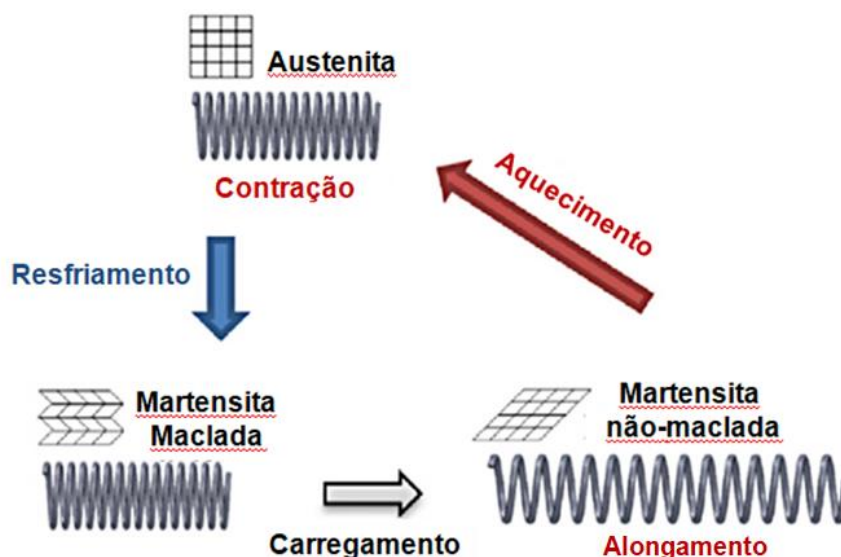


Figura 49: Transformação de fase de uma mola de liga de memória de forma (Adaptado de AN *et al*, 2012).

Com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema e a forma de atuação da estrutura origêmica a partir da posição aberta para fechada e vice-versa, foram realizados testes com diferentes cargas mecânicas.

Primeiramente foram coletados dados a partir do uso de pesos padrões como carga mecânica com três valores distintos de 200 g (1,96 N), 400 g (3,92 N) e 600 g (5,88 N). Dessa forma, foi possível coletar dados sobre a capacidade de deslocamento que a mola helicoidal com memória de forma é capaz de fornecer ao sistema quando aquecida e, em seguida, a capacidade de retorno à posição original através da ação da força resultante promovida pelos pesos, quando o fornecimento de corrente é interrompido promovendo o resfriamento da mola através de um processo de convecção com o meio. A Tabela 5 apresenta os dados coletados através dos experimentos desenvolvidos.

Tabela 5: Variação do curso de atuação d mola para diferentes forças

	1,96 N	3,92 N	5,88 N
Fase Austenítica	52 mm	63 mm	75 mm
Fase Martensítica	55 mm	99 mm	125 mm
Amplitude	3 mm	36 mm	50 mm

É importante ressaltar que foram testados valores de massa inferiores e superiores ao apresentados na Tabela 4. Contudo, valores de massa inferiores a 200 g (1,96 N) não são capazes de gerar uma força suficiente para promover transformação de fase na mola de SMA

em seu estado de martensita maclada. Em contrapartida, valores de massa superiores a 600 g (5,88 N) geram forças na mola de SMA suficientemente elevadas de modo que a aplicação da corrente não é suficiente para promover um aumento de temperatura capaz de induzir a transformação de fase de modo que ocorra a contração da mola.

Através de uma análise das forças mecânicas aplicadas e o deslocamento resultante, é possível observar que a condição associada à aplicação de uma força de 5,88 N é a que resulta em um melhor desempenho para o sistema. Apesar de representar a situação de maior carga aplicada ao atuador, o que acaba reduzindo sua capacidade de contração na fase Austenítica ao ser aquecido, foi a condição que promove o maior valor de deslocamento de retorno à posição inicial aberta da estrutura origêmica, através da transformação da variante de Martensita maclada para não maclada.

A Figura 50 mostra as configurações finais de retorno do atuador para a fase Austenítica considerando três situações: carga de peso morto de 3,92 N, carga de peso morto de 4,88 N e carga promovida por molas de aço.

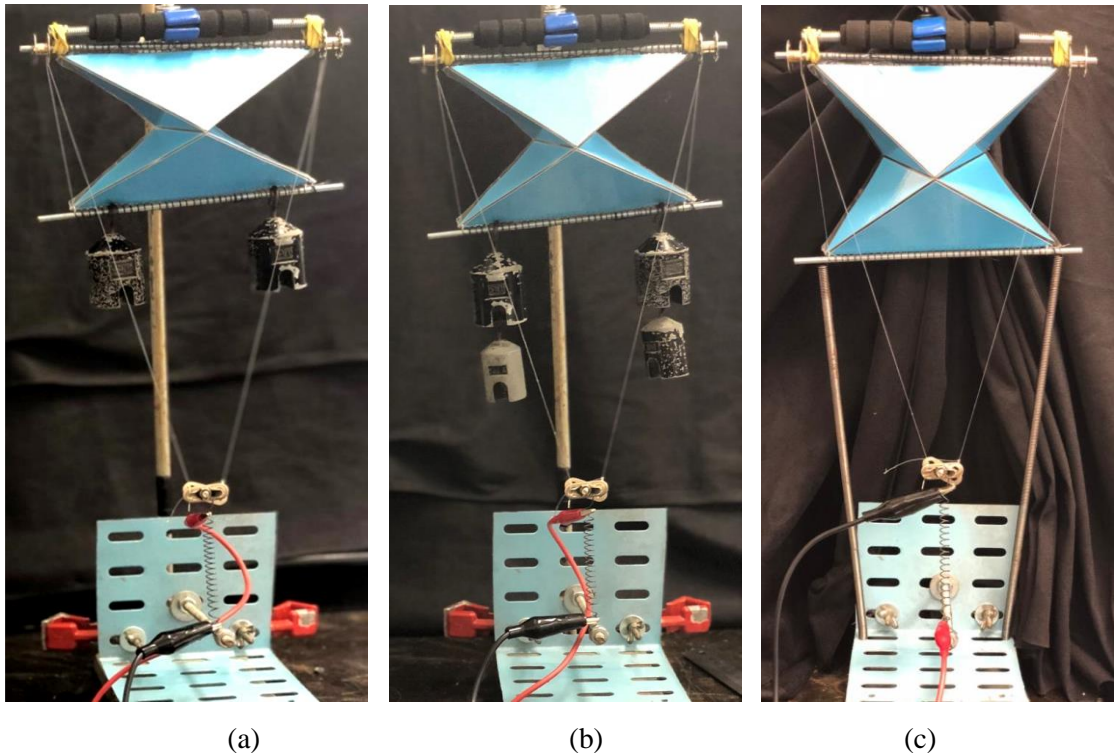


Figura 50: Estrutura atuada com três diferentes cargas mecânicas. (a) Estrutura com carga de peso morto de 3,92 N (400 g), (b) Estrutura com carga de peso morto de 5,88 N (600 g) e (c) Estrutura com carga mecânica através de molas de aço.

Analogamente ao objetivo realizado anteriormente com os pesos padrões, buscou-se uma configuração com molas convencionais de aço para funcionar como a carga mecânica do sistema. De acordo com as molas de aço utilizadas, obteve-se a melhor configuração que permitia o movimento do sistema (Figura 51 (c)), utilizando duas molas com sua constante elástica equivalente calculada igual a 0,654 N/m. Tal configuração gerou os valores apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Variações de comprimento da mola

Fase Austenítica	85 mm
Fase Martensítica	130 mm
Amplitude	45 mm

O protótipo desenvolvido permitiu avaliar a aplicação de um atuador de mola de SMA em estruturas inovadoras inspiradas em padrões de dobras de origami, sendo idealizado um sistema capaz de ser aberto e fechado pelo sistema de atuação.

As características não lineares da mola de SMA e da estrutura origâmica tornam a análise destes sistemas uma tarefa complexa. Dessa forma, a análise experimental fez-se necessária para identificar os problemas e as limitações inerentes à construção da estrutura e elementos de atuação que compõem o sistema, tendo sido necessário realizar adaptações até encontrar a melhor configuração da sua montagem em busca do seu correto funcionamento. Assim, o estudo experimental assumiu um caráter qualitativo, com o objetivo de observar a viabilidade e comportamento real da estrutura proposta.

Capítulo 6

Modelo Numérico

O modelo numérico apresentado neste capítulo é baseado no método de elementos finitos e procura representar a configuração de montagem do experimental. O objetivo do modelo numérico é estabelecer uma ferramenta que permita investigar através de uma abordagem mais precisa daquela obtida através de modelos analíticos, uma configuração eficiente para o atuador, com o intuito de se obter uma melhor resposta na movimentação do origami.

A configuração do sistema foi simplificada através de um modelo composto por um fio de SMA e um fio de aço, conforme apresentado pela Figura 51. Como ponto de partida a situação (1) apresenta um fio de SMA preso em uma das extremidades unido a um fio de aço livre que está sendo puxado por uma força F . Na situação (2), o fio de aço é preso na outra extremidade e o fio de SMA é, então aquecido. A situação (3) representa o fim do carregamento térmico. Quando o fio de SMA esfria, ele retorna para a situação (2), e assim conclui-se a execução do ciclo em (2) \rightarrow (3) \rightarrow (2), obedecendo, dessa forma, o efeito memória de forma por tensão assistida.

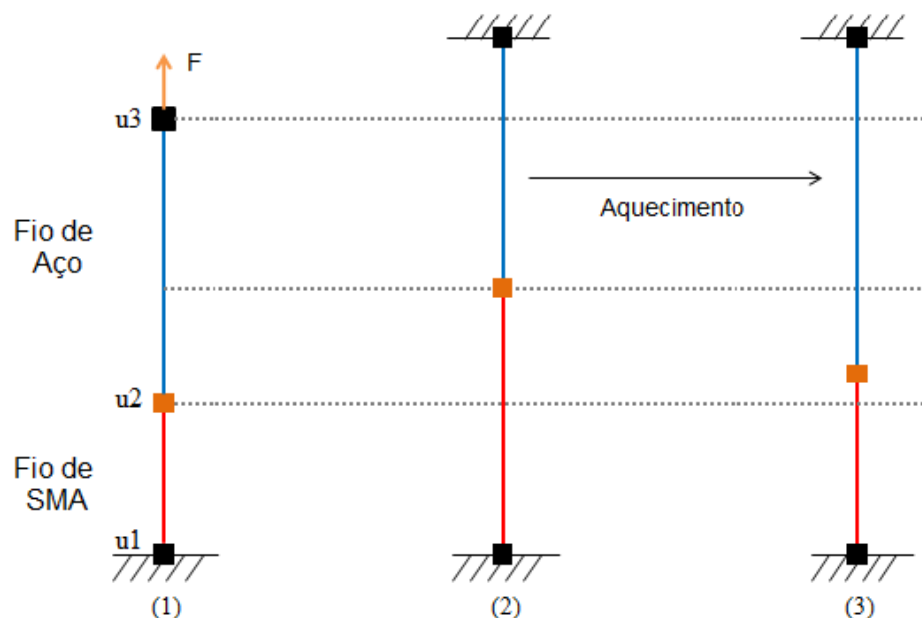


Figura 51: Esquema Atuador Modelo Numérico

Esse estudo foi realizado utilizando o pacote comercial de elementos finitos Ansys. A representação do comportamento termomecânico do fio de SMA foi modelado através de um modelo constitutivo apropriado disponível no pacote de elementos finitos, o qual é descrito na próxima seção.

6.1 Modelo Constitutivo

As ligas com memória de forma apresentam um comportamento não linear, devido a isso, faz-se necessário escolher um modelo constitutivo apropriado para definir seu funcionamento. O presente estudo utiliza o modelo constitutivo de AURICCHIO et. al. (2004), que descreve os fenômenos de pseudoelasticidade e memória de forma em um estado de tensões tridimensional. Nesse trabalho foi considerado o modelo do efeito memória de forma.

O modelo foi implementado no software comercial baseado no método de elementos finitos, *ANSYS 18.2*, a fim de simular o comportamento de um fio SMA, considerando comparando o resultado numérico com experimental. As equações do modelo surgem de uma função de densidade de energia livre apresentado por Helmholtz.

O modelo requer sete parâmetros do material que serão implementados no software *ANSYS*. Segue abaixo a definição das especificações.

- h : medida de inclinação tensão-deformação durante a transformação
- T_0 : temperatura de referência no estado livre de tensão
- R : raio de domínio elástico sem a evolução da temperatura
- β : inclinação da curva em relação à temperatura
- ε_L : representa a máxima deformação de transformação
- E_M : módulo de elasticidade da fase Martensita
- m : parâmetro de dependência de Lode, uma relação que sugere descrever a SMA como um material isotrópico devido ao comportamento assimétrico da liga em tração e compressão.

6.2 Método dos Elementos Finitos (MEF)

Normalmente o estudo de peças de geometrias simples, como barras, vigas e placas, fabricadas de materiais usuais, como aço e alumínio, no seu regime linear-elástico é uma tarefa relativamente simples que pode ser realizada através das abordagens de Mecânica de Sólidos. Porém a análise de estruturas de geometria mais complexa e/ou com materiais não lineares, normalmente requer a utilização de abordagens envolvendo métodos numéricos de análise. Um dos métodos numéricos mais utilizados em problemas de engenharia é o Método de Elementos Finitos. Este método envolve a discretização do domínio da peça ou estrutura a ser analisada em um conjunto de regiões chamadas de elementos finitos, permitindo, assim, desenvolver uma solução aproximada da forma original do problema.

Estes elementos são conectados por nós ou pontos nodais. Onde, ao se formar um conjunto de nós, uma estrutura chamada malha é gerada. Quanto maior a quantidade de nós presentes em uma malha, maior a sua aproximação com a realidade, e melhor a caracterização e conseqüentemente maior é a precisão dos resultados analisados. (FISH, 2007)

Devido a isto, torna-se necessário uma análise de convergência da malha antes de aceitar os resultados. Através da aplicação do método, torna-se possível obter parâmetros muito importantes como deslocamentos, deformações e tensões, além de possibilitar a representação de cenários com a aplicação de critérios de resistência, rigidez ou fadiga.

Em geral, os problemas de engenharia requerem um estudo relacionado com a Mecânica do Contínuo, através dela os modelos são representados através de equações diferenciais, e sob a ótica macroscópica são usados modelos constitutivos. (RIBEIRO, 2004).

A Figura 52 mostra de forma resumida, a maneira correta da sequência de utilização do método. Este método foi desenvolvido por volta de 1950, e de lá para cá o avanço tecnológico e a integração com outros softwares permitiu o crescimento de estudos nesta área e a obtenção de resultados mais eficientes e de forma mais ágil.

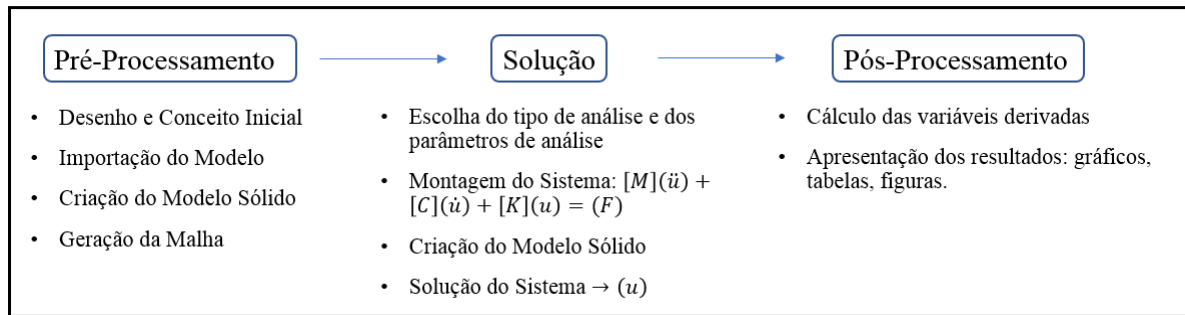


Figura 52: Forma de Utilização do MEF (ALMEIDA, 2011)

6.2.1 Pacote Comercial de Elementos Finitos Ansys

Para a realização da análise numérica do presente trabalho, foi utilizado o pacote comercial *Ansys* que é baseado no método de elementos finitos. O modelo do AURICCHIO et. al. (2009) foi implementado, com o objetivo de analisar o comportamento do fio de SMA nas condições adotadas. Para o tratamento gráfico dos resultados numéricos obtidos, utilizou-se o programa ORIGIN, que realiza plotagem e análise de gráficos e diagramas.

Para representar os fios de SMA e de aço mostrados no modelo descrito na Figura 51, foi utilizado o elemento BEAM188, que possui 6 graus de liberdade por nó, e é composto por dois nós. A teoria de TIMOSHENKO inclui os efeitos de distorção de cisalhamento na análise, e é a teoria utilizada neste elemento que é representado por deslocamentos de translação e rotação nos eixos x, y e z, como representado na Figura 53.

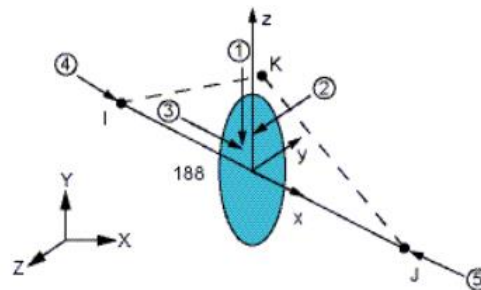


Figura 53: Elemento BEAM188 (Fonte: ANSYS 14.0)

O BEAM188 é adequado em aplicação lineares, com grande rotação ou em aplicações com não linearidades de deformação, permitindo a utilização do modelo constitutivo de AURICCHIO et. al. (2009) para representar o comportamento de SMAs. É responsável por

incluir como padrão, parâmetros como tensão e rigidez em análises com grandes deflexões. (ANSYS 18.2)

6.3 Desenvolvimento do Modelo Numérico

O desenvolvimento do modelo numérico tem como objetivo investigar o comportamento da estrutura proposta a fim de encontrar uma configuração para a atuação do sistema. Para o estudo, utilizou-se um fio de SMA com 200 mm de comprimento e 0,15 mm de diâmetro e um fio de aço com o mesmo comprimento do fio de SMA. A Tabela 7 apresenta os parâmetros adotados nesse estudo.

Tabela 7: Propriedades do fio de SMA Flexinol.

Propriedade	Símbolo	Valor
Comprimento	L	200 mm
Raio do fio	r	0,075 mm
Temperatura de referência	T_0	318 K
Parâmetro de Escala da Temperatura	β	6,1 MPa/K
Parâmetro de Endurecimento	h	1000 MPa
Limite de Elasticidade	R	100 MPa
Módulo de Elasticidade - Austenita	E_A	75 GPa
Módulo de Elasticidade - Martensita	E_M	28 GPa
Constante de Poisson	ν	0,33
Deformação Máxima de Transformação	ε_L	4 %
Parâmetro de Lode	m	0

Seguindo o conhecimento de cálculo da rigidez de uma viga, apresentado no Capítulo 4, de acordo com a Equação (4.12), a rigidez de um fio aumenta à medida que o raio aumenta. Para analisar o comportamento do sistema de atuação, foram analisadas quatro condições de rigidez do fio de aço em relação ao fio de SMA utilizando uma temperatura prescrita de 500 K. Em seguida estudaram-se quatro situações de temperatura, 400 K, 450 K, 500 K e 550 K, considerando uma relação de rigidez fixa. As condições de rigidez adotadas estão representadas a seguir:

- $k_{A\zeta O} = 1/2 k_{SMA}$
- $k_{A\zeta O} = 1/4 k_{SMA}$
- $k_{A\zeta O} = 1/6 k_{SMA}$
- $k_{A\zeta O} = 1/8 k_{SMA}$

Os resultados numéricos são apresentados no Capítulo 7.

Capítulo 7

Resultados

7.1 Modelo Analítico

Partindo da configuração e parâmetros predeterminados obteve-se os resultados de um estudo linear do comportamento do sistema a partir do modelo analítico e numérico, com propósito de realizar sua análise comparativa. Dessa forma, foi calculado pelo modelo analítico os deslocamentos a partir do k_{eq} encontrado para cada condição na fase Austenítica e Martensítica, quando uma força de 6 N atua no sistema e comparado com os dados gerados pelo modelo numérico, demonstrados nas Tabelas 7 e 8.

A Tabela 8 apresenta os resultados de deflexão nas três condições de rigidez do sistema para a fase Austenítica onde se observa resultados bem similares entre os dois métodos, apresentando um aumento da deflexão associado a redução da rigidez, vista que k_A permanece constante.

Tabela 8: Comparação dos resultados do modelo linear na fase Austenítica.

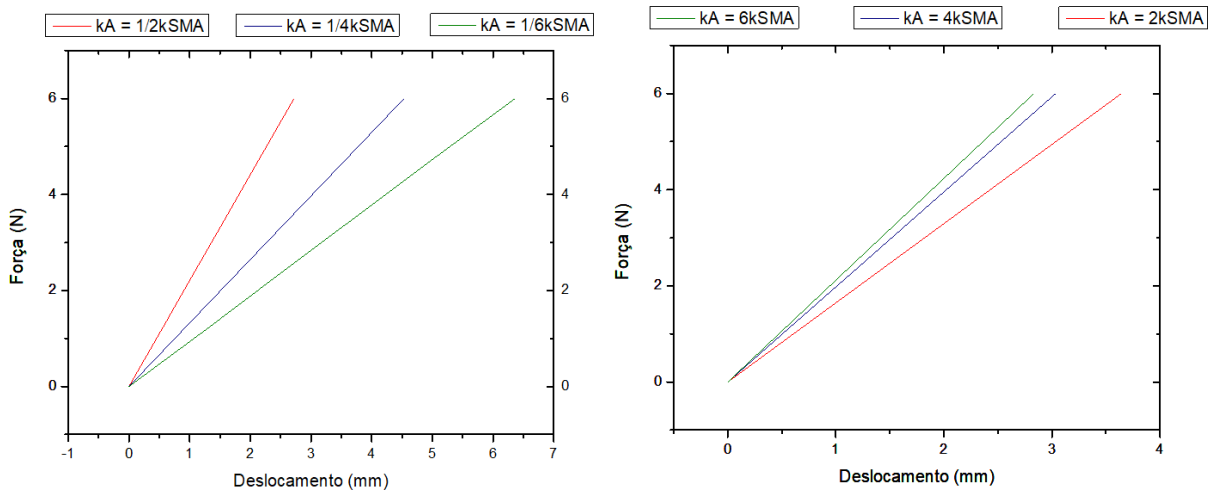
Rigidez (N/mm) $k_{aço}$ e k_A	Deflexão (mm) Numérico	Deflexão (mm) Analítico	Varição (%)
$k_{aço} = k_A/2$	2,718	2,716	0,074
$k_{aço} = k_A/4$	4,531	4,527	0,088
$k_{aço} = k_A/6$	6,343	6,338	0,079

A análise do sistema na fase Austenítica com k_M constante, apresenta uma redução da deflexão com o aumento da rigidez, como pode ser visto na Tabela 9.

Tabela 9: Comparação dos resultados do modelo linear na fase Martensítica.

Rigidez (N/mm) $k_{aço}$ e k_M	Deflexão (mm) Numérico	Deflexão (mm) Analítico	Varição (%)
$k_{aço} = 2k_M$	3,641	3,638	0,082
$k_{aço} = 4k_M$	3,034	3,032	0,066
$k_{aço} = 6k_M$	2,832	2,829	0,106

As reações de deflexão do modelo linear obtidas geraram resultados muito próximos e coerentes com o que se esperava, tendo em vista que em ambas as fases a rigidez determinou o comprimento da deflexão. A Figura 56 apresenta o gráfico comparativo das três relações de rigidez onde tanto na fase Austenítica quanto Martensítica apresentou-se um aumento do deslocamento com a redução da rigidez.

**Figura 56:** Gráfico comparativo da força por deflexão do modelo linear, (a) na fase Austenítica e (b) na fase Martensítica.

É importante ressaltar que todos os resultados apresentados nesse estudo se referem ao comportamento linear das molas helicoidais, contudo as ligas de memória de forma apresentam um comportamento não linear e sua análise necessita de desenvolvimento de modelos não lineares e simulações numéricas.

7.2 Modelo Numérico

7.2.1 Situação com Temperatura prescrita

Com o intuito de analisar o comportamento do atuador submetido a diferentes condições de relação de rigidez do fio de aço. A análise considera a aplicação de um carregamento em duas etapas conforme indicado na Figura 51. Após a etapa de fixação da extremidade, um carregamento térmico é aplicado até a uma temperatura máxima de 500 K.

A Figura 57 mostra a evolução da força e do deslocamento para as quatro condições adotadas, considerando uma temperatura máxima de 500 K. Nota-se nas Figuras 57 (a-c) um comportamento não linear, o que indica que ocorre transformação de fase de Martensita não maclada para Austenita, resultando em valores de retorno do fio de SMA elevados. No entanto, na situação mostrada na Figura 57 (d), o fio de SMA é muito rígido e não permite que o fenômeno de transformação aconteça. Isso justifica o comportamento linear apresentada no gráfico e os baixos valores de retorno do fio de SMA.

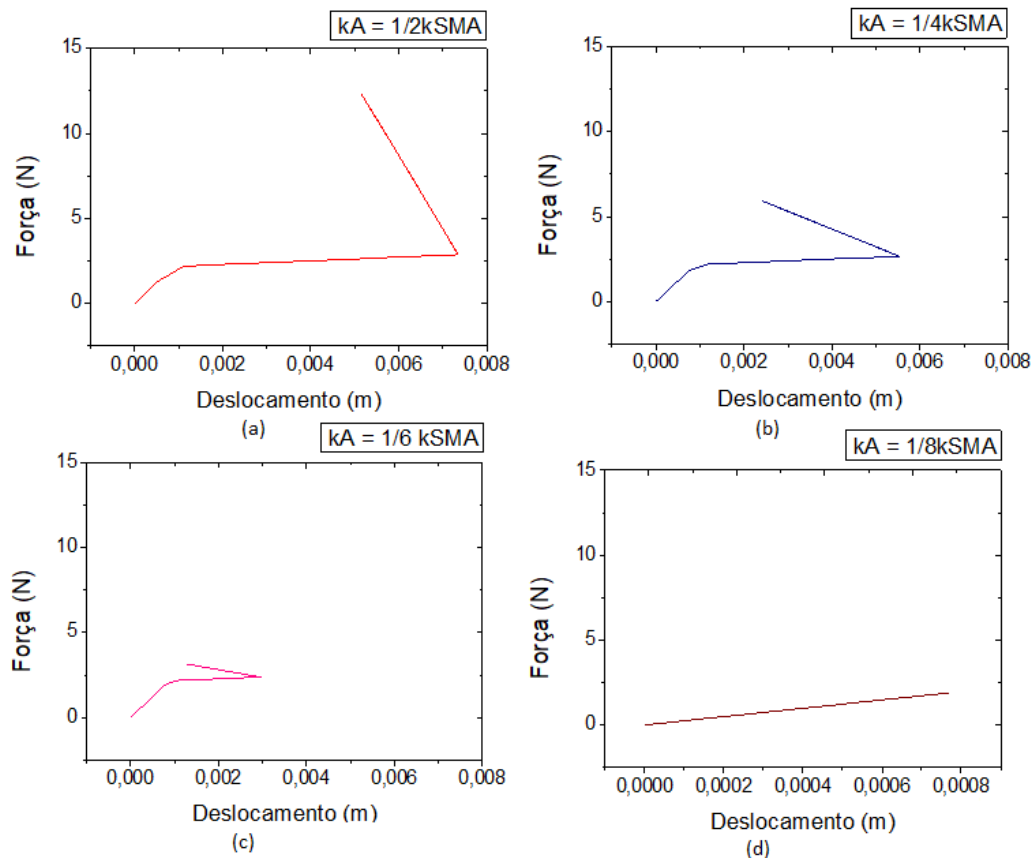


Figura 57: Gráfico Comparativo da Evolução da Força X Deslocamento.

Partindo das mesmas condições, os resultados apresentados nas Figuras 58 (a-c) mostram que a transformação de fase se desenvolve conforme a temperatura aumenta, até atingir um valor máximo de 500 K. Também pode ser observada a influência da rigidez na mudança da inclinação da curva estabelecida pelo nível de recuperação do sistema. A Figura 58 (d) mostra que para este valor de rigidez não se desenvolve transformação de fase e a deformação resultante é puramente decorrente de efeitos de dilatação térmica, sendo observados valores muito baixos de deslocamento em comparação com os três casos anteriores. As figuras mostram a influência da rigidez nas faixas de operação do sistema. Para todos os casos onde se observa transformação de fase (Fig. 58a-c), o carregamento termomecânico induz a formação de laços de histerese em função do nível de rigidez do sistema.

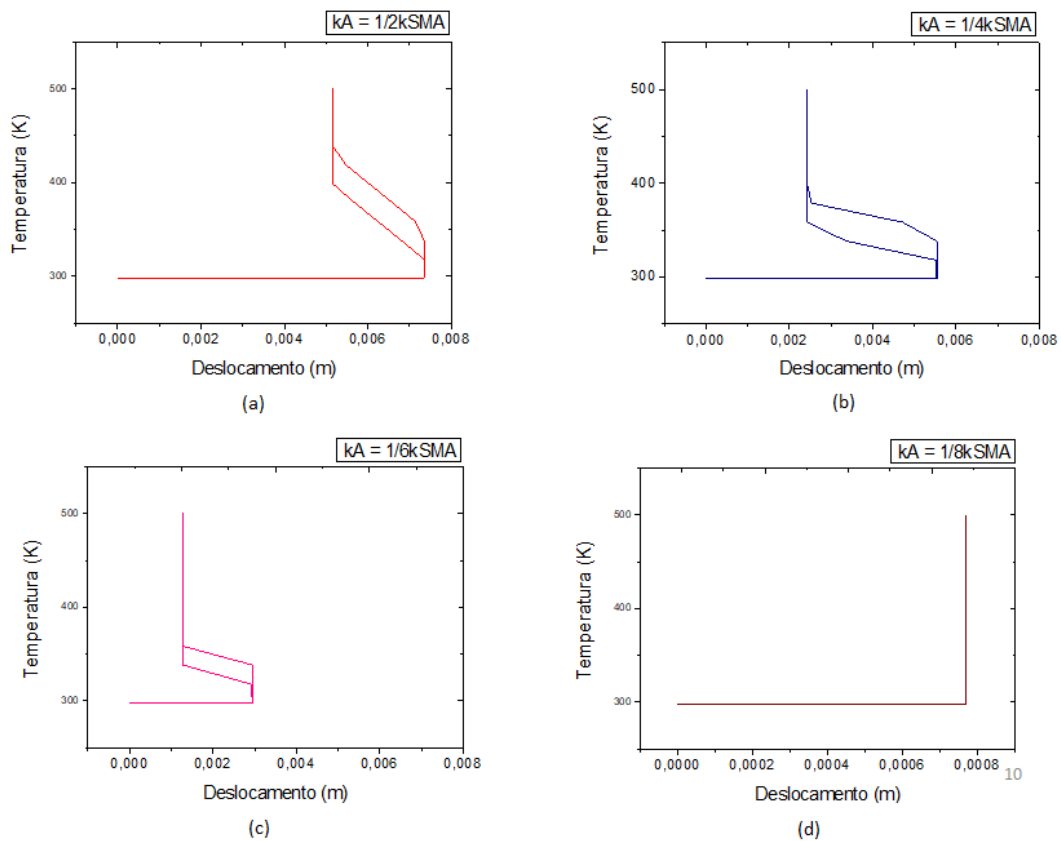


Figura 58: Relação Temperatura X Deslocamento de acordo com variações de Rigidez.

A Figura 59 apresenta os ciclos de carregamento para as três situações em que o fio de SMA realiza transformação de fase. Esses ciclos exibem o momento em que o carregamento mecânico é cessado e o início e fim do aquecimento e resfriamento do material. Nota-se que para os três casos, o carregamento térmico se inicia no tempo de 11 s, porém os tempos de

aquecimento e transformação de fase mudam de acordo com a rigidez de cada um. A Tabela 10 mostra o início e fim das transformações nas três situações adotadas.

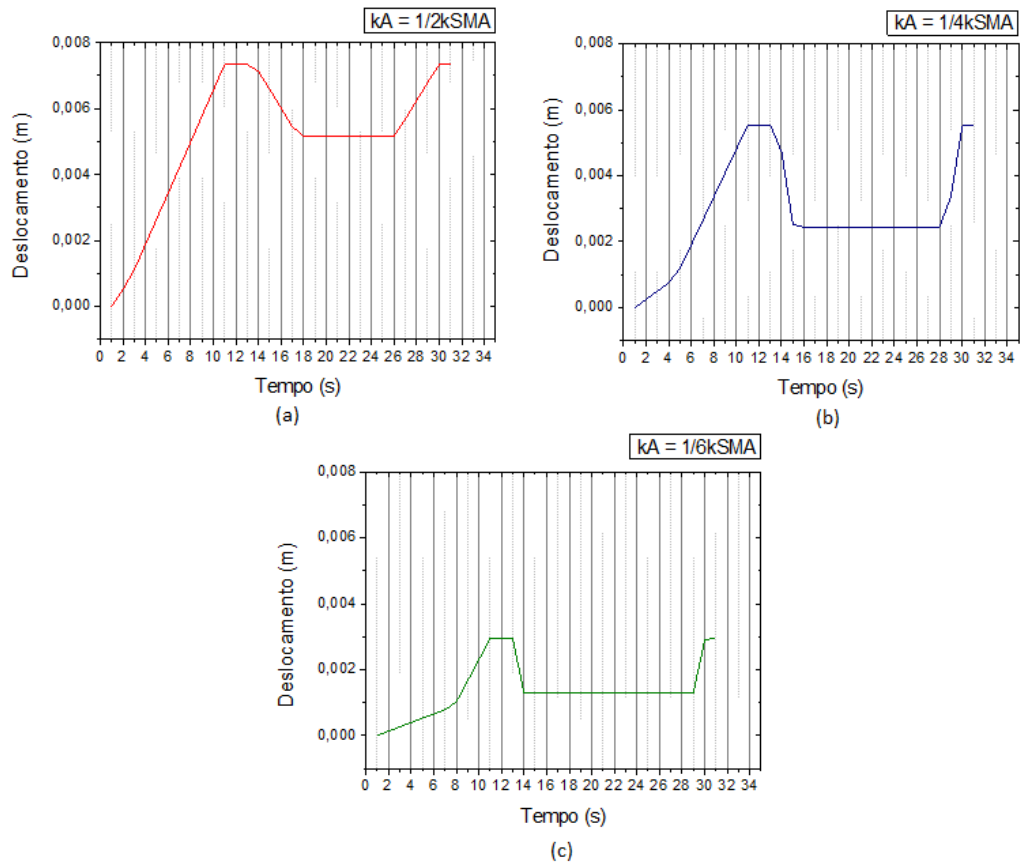


Figura 59: Relação Tempo X Deslocamento.

Pode-se observar que para cada situação há uma diferença nos tempos de aquecimento e resfriamento, isso é resultado da relação da rigidez do sistema com a temperatura. Nota-se que, conforme a condição de rigidez aumenta o intervalo de tempo entre o início e fim da transformação de fase diminui. Também é possível observar que o aumento da rigidez está associado ao aumento do tempo que o fio de SMA leva para resfriar.

Tabela 10: Tempo de acordo com a Relação de Rigidez.

k_A/k_{SMA}	$1/2$	$1/4$	$1/8$
Início da Transformação de fase: $M^+ \rightarrow A$	13 s	13 s	13 s
Fim da Transformação de fase: $M^+ \rightarrow A$	17 s	16 s	14 s
Início da Transformação de fase: $A \rightarrow M^+$	27 s	28 s	29 s
Fim da Transformação de fase: $A \rightarrow M^+$	30 s	30 s	30 s

7.2.2 Situação com relação de rigidez prescrita

Para avaliar a influência da temperatura no comportamento do atuador, foi fixada uma relação de rigidez do fio em relação à rigidez do SMA, como sendo $r_{FIO} = 1/2 r_{SMA}$ e foram estabelecidas variações de temperaturas máximas de 400 K, 450 K, 500 K e 550 K. A Figura 60 (a) e (b) exibem os carregamentos mecânico e térmico, respectivamente. O carregamento mecânico caracteriza-se pelo deslocamento inicial que o material sofre devido à força aplicada no intervalo de 0 a 11 s. Após esse efeito, o carregamento mecânico se estabelece constante e é dado início ao carregamento térmico.

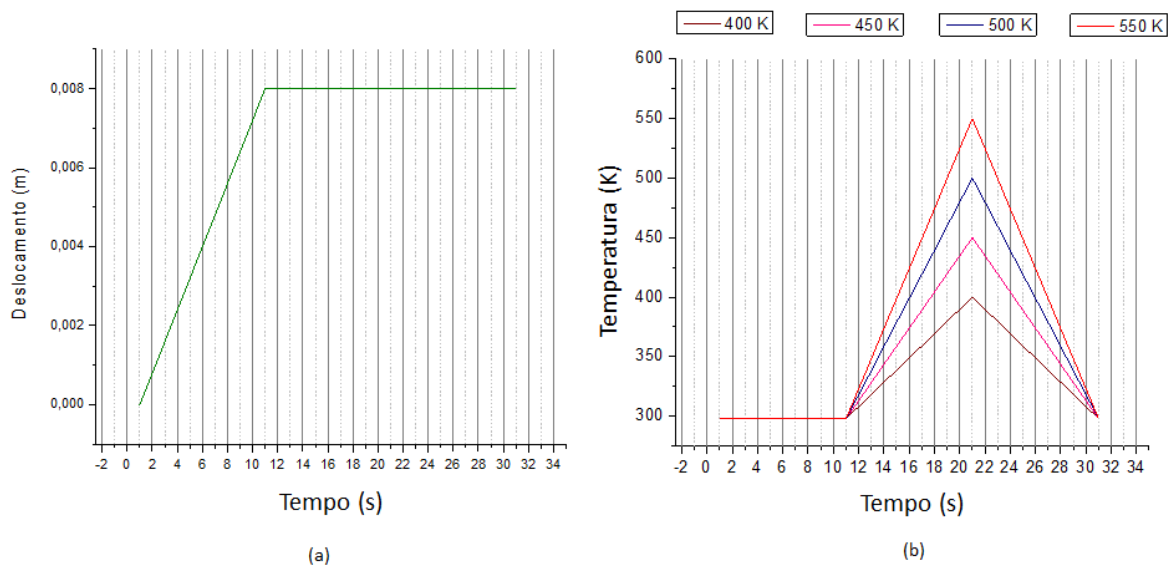


Figura 60: Representação do (a) Carregamento Térmico e (b) do Carregamento Mecânico.

Os resultados da situação com rigidez prescrita estão apresentados nas Figuras 61 (a), (b), (c) e (d) em termos da evolução da temperatura durante o carregamento termomecânico.

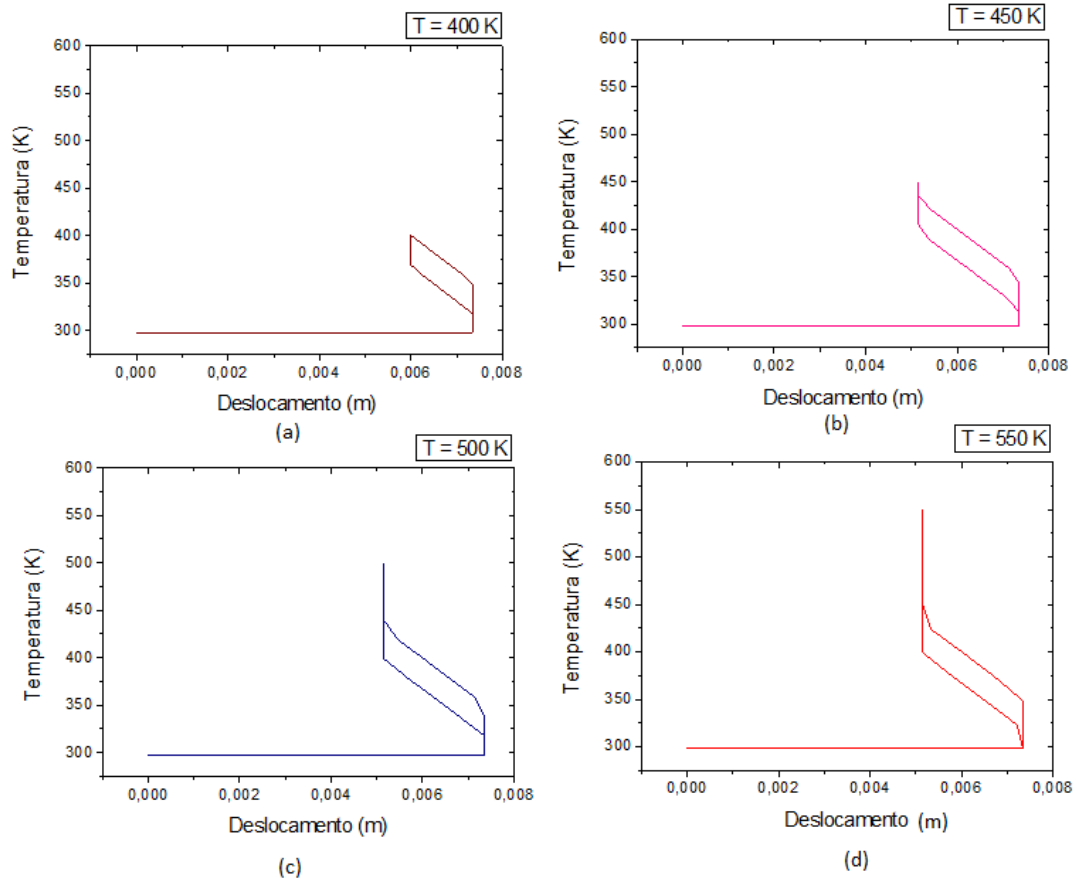


Figura 61: Relação Temperatura X Deslocamento de acordo com variações de temperaturas.

É possível observar através das Figuras 61 (a-d), que o aumento da temperatura influencia diretamente nas transformações de fase resultando na formação de laços de histerese que reagem ao acréscimo da temperatura aumentando-os. Nota-se que na temperatura de 400 K, ocorreu uma transformação de fase incompleta, já nas temperaturas de 450, 500 e 550, a transformação de fase ocorreu antes de atingir a temperatura máxima de aquecimento.

A Figura 62 apresenta os ciclos de carregamento. Fica claro que à medida que a temperatura de aquecimento máximo aumenta, o início de transformação de fase de Martensita não maclada para Austenita, diminui. Na transformação inversa, os tempos de transformação diminuem à medida que a temperatura de aquecimento máximo aumenta. Um resumo desse efeito pode ser observado na Tabela 11.

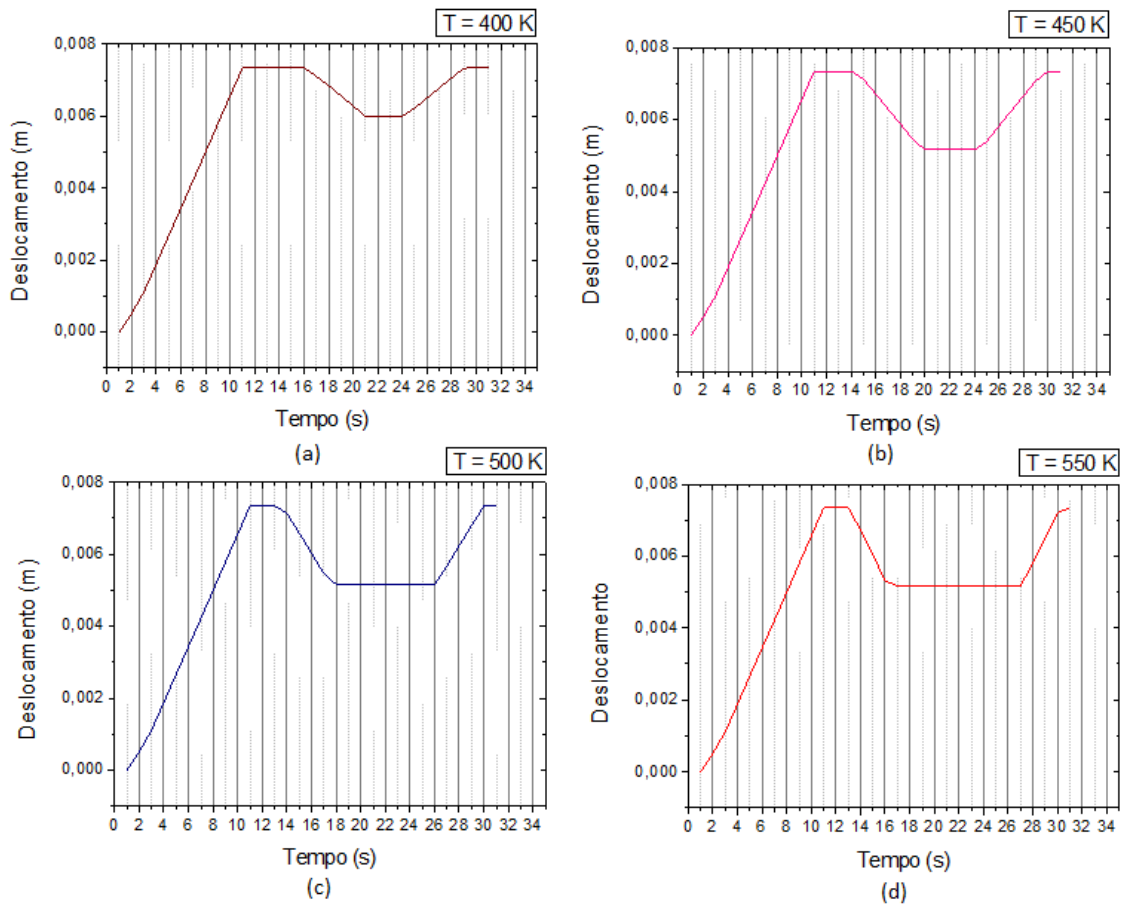


Figura 62: Relação Tempo X Deslocamento.

Tabela 11: Tempo de acordo com a Relação de Rigidez.

k_A/k_{SMA}	400 K	450 K	500 K	550 K
Início da Transformação de fase: $M^+ \rightarrow A$	16 s	14 s	13 s	13 s
Fim da Transformação de fase: $M^+ \rightarrow A$	21 s	20 s	18 s	17 s
Início da Transformação de fase: $A \rightarrow M^+$	24 s	24 s	26 s	27 s
Fim da Transformação de fase: $A \rightarrow M^+$	29 s	30 s	30 s	32 s

7.2.3 Comparativo de Atuação

O objetivo do modelo numérico proposto para as duas situações estudadas é analisar o comportamento do atuador com memória de forma por tensão assistida, a fim de buscar uma máxima resposta de atuação. Com base nos resultados apresentados anteriormente busca-se a melhor condição para um acionamento efetivo do origami. O gráfico da Figura 63 exibe uma comparação dos valores de recuperação do sistema em função das relações de rigidez e níveis de temperatura.

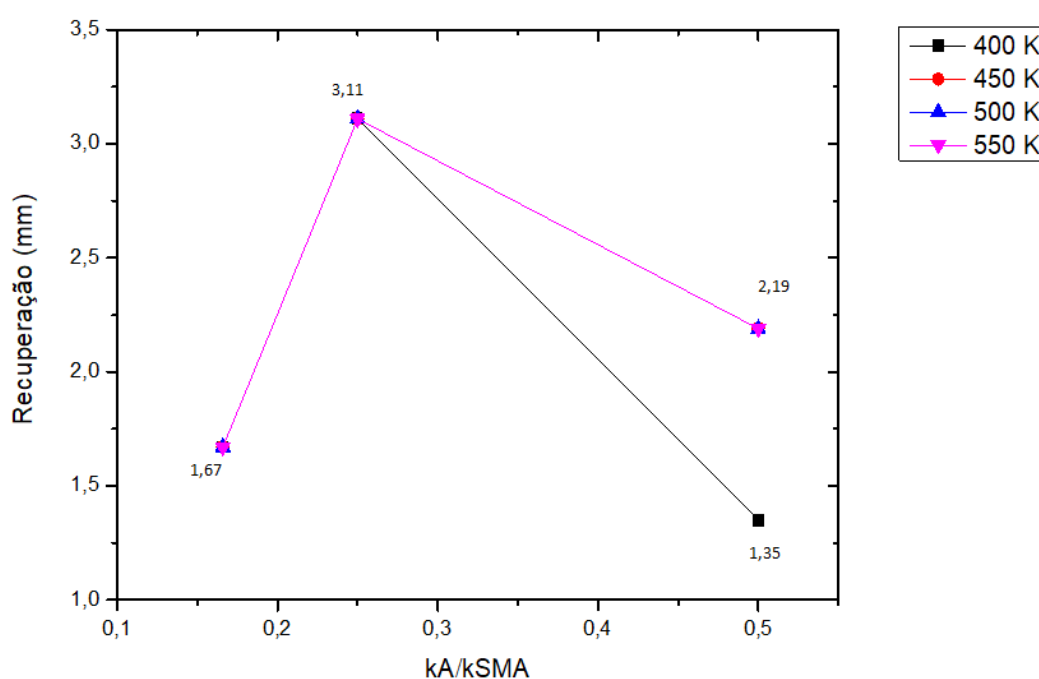


Figura 63: Gráfico comparativo da Recuperação em função da relação de Rigidez.

Nota-se, que o sistema apresenta uma recuperação máxima quando a relação é de 0,25. Nessa condição percebe-se que a transformação de fase ocorre antes do carregamento térmico atingir a temperatura máxima de aquecimento, isso justifica os valores constantes nos diferentes níveis de temperatura. Já na relação de $\frac{1}{6}$, a mola de SMA é muito rígida gerando uma transformação de fase incompleta e como consequência uma queda no efeito memória de forma.

Finalmente, na relação de rigidez $k_{AÇO} = 1/2 k_{SMA}$, observa-se uma transformação de fase incompleta na temperatura de 400 K, devido ao baixo valor de rigidez e para as demais temperaturas, percebe-se que a transformação ocorre antes do carregamento térmico atingir a temperatura máxima de aquecimento. A Tabela 12 exibe esses resultados.

Tabela 12: Comparação da Recuperação do Atuador de acordo com o Carregamento Térmico

Carregamento Térmico (K)				
k_A/k_{SMA}	400 K	450 K	500 K	550 K
1/2	1,35 mm	2,19 mm	2,19 mm	2,19 mm
1/4	3,11 mm	3,11 mm	3, 11 mm	3,11 mm
1/6	1,67 mm	1,67 mm	1,67 mm	1,67 mm

Capítulo 8

Conclusão

As ligas com memória de forma, em função de suas propriedades, são atualmente utilizadas em aplicações de diversas áreas comprovando sua relevância pelo crescente número de pesquisas envolvendo mecanismos de atuação com elementos de ligas com memória de forma, representando uma área de destaque. Na tendência de estudos inovadores, o origami, arte milenar japonesa recebe destaque ao influenciar diversos setores em função de suas características que permitem alterar sua forma e suas dimensões, permitindo assim, soluções inovadoras em diversas aplicações.

Este trabalho teve o objetivo de realizar um estudo com o intuito de identificar o potencial de aplicação de atuadores de ligas com memória de forma em um sistema de abertura e fechamento desenvolvido a partir de um padrão origâmico. Dessa forma, foi desenvolvido um modelo experimental, um modelo analítico e um modelo numérico.

No procedimento experimental foi desenvolvido um protótipo com um sistema origâmico para ser atuado de forma antagônica com uma mola helicoidal de liga com memória de forma e o carregamento mecânico com peso morto e mola de aço. Dessa forma, o modelo experimental permitiu avaliar o desempenho do sistema em diferentes configurações além de demonstrar sua viabilidade ao apresentar um movimento esperado.

Para analisar as condições lineares, foi desenvolvido um modelo analítico a partir da simplificação do sistema composto por duas molas de aço em paralelo e em série com uma mola de SMA para um sistema equivalente de fios. Foi adotada a condição de transformações constantes e a partir dos resultados analíticos obtidos pôde-se comparar com resultados numéricos lineares que foram desenvolvidos a partir do software Ansys, levando a resultados muito próximos onde a variação de erro entre os dois métodos ficou abaixo de 0,1%. Assim, a partir dos resultados obtidos constatou-se a coerência nos resultados respeitando as condições adotadas o que permitiu o avanço do estudo para uma análise do modelo numérico.

Partindo do sistema com uma configuração simplificada, foi desenvolvido um modelo numérico baseado no método de elementos finitos a fim de investigar de forma mais precisa o comportamento do atuador, tendo em vista seu comportamento não linear. Para isso, o modelo

foi implementado no software Ansys onde se determinou condições envolvendo os parâmetros de rigidez e temperatura.

Na primeira condição foi fixada a temperatura em 500 K variando a rigidez, onde pôde-se observar a influência na transformação de fase e na amplitude do deslocamento com o aumento da rigidez. Até a relação de rigidez de $k_{AÇO} = 1/4 k_{SMA}$ é possível observar que o deslocamento aumenta, contudo ao se aumentar para relação de $k_{AÇO} = 1/6 k_{SMA}$ o deslocamento diminui e com a relação de $k_{AÇO} = 1/8 k_{SMA}$ o sistema se torna muito rígido não permitindo a transformação de fase. Dessa forma, o estudo se desenvolve dentro das três primeiras relações de rigidez.

Na segunda condição em que foi fixada a rigidez variando a temperatura obteve-se como resultado a influência da temperatura com a transformação de fase incompleta quando submetido a uma temperatura de 400 K, contudo com o aumento da temperatura a partir de 450 K a transformação de fase é realizada por completo antes de atingir a temperatura máxima e o aumento subsequente não oferece influência nesse resultado.

A partir das análises considerando todas as condições foi realizado um comparativo da atuação baseado na amplitude onde foi concluído que a relação de rigidez $k_{AÇO} = 1/4 k_{SMA}$ se destacou apresentando melhor resultado ao realizar a transformação completa de fase em todas as condições de temperatura com amplitude de 3,11 mm, sendo este valor o maior quando comparado às outras condições de rigidez.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se indicar desenvolver o modelo numérico com o uso de parâmetros da mola helicoidal e realizar a instrumentação do modelo experimental através da utilização de transdutores para realizar a comparação com o modelo numérico, afim de se obter uma melhor resposta de abertura e fechamento do origami.

Capítulo 9

Referências Bibliográficas

AN, SUNG-MIN; RYU, J.; CHO, M., CHO, KYU-JIN, “**Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state model**”. Smart Materials and Structures, 2012, v. 21.

AZEVEDO, A.J.M., “**Análise de Fadiga em Fios com Memória de Forma Submetidos a Ciclos Termomecânicos**”, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais) – CEFET/RJ, 2016

AURICCHIO, F.; CODA, A.; REALI, A., et al., “**SMA Numerical Modeling Versus Experimental Results: Parameter Identification and Model Prediction Capabilities**”, Journal of Materials Engineering and Performance, n. 5-6, Março 2009.

AURICCHIO, F.; PETRINI, L., “**A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformations. Part I: solution algorithm and boundary value problems**”, International Journal for Numerical Methods in Engineering, n. 6, Outubro 2004.

BARBARINO, S.; FLORES, E. I. S.; AJAJ, R. M. et al. “**A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft**”. Smart Materials and Structures, 2014. n. 6, v. 23. p. 063001.

BIRMAN, V., 1997, “**Review of Mechanics of Shape Memory Alloys Structures**”, Applied Mechanics Rev., Vol. 50, n.11, p. 629-645.

BORTONCELLO, O.M., 2015, “**Projeto e Controle de um Atuador Linear Baseado em Par Antagônico de Nitinol**” Departamento de Engenharia Mecânica- Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre

CHOPRA, INDERJIT; SIROHI, JAYANT, “**Smart structures theory**”, Cambridge University Press, 2013.

COUTON, L. & SERRERO, D. **L'enveloppe comme production énergétique, filtre lumière et système de chauffage**, Anais Outurquin, 2012. Disponível em: <<http://intelligentskins.serero.com/?p=1025>>, Acesso em: 15 set. 2018.

CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S. **“Shape Memory Alloy Valves: Basics, Potentials, Design”**. Remcheid, Germany: Springer, 2015.

D. Y. LEE, G. P. JUNG, M. K. SIN, S. H. AHN AND K. J. CHO, **"Deformable wheel robot based on origami structure,"** 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Karlsruhe, 2013, p. 5612-5617.

DELAEY, L.; KRISHNAN, R. V.; WARLIMONT, H. and TAS, H., 1974. **“Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations”**. Journal of Materials Science, 9 ed.

DOLCE, M., & CARDONE, D. (2001). **“Mechanical behavior of shape memory alloys for seismic applications 2. Austenite NiTi wires subjected to tension”**. International Journal of Mechanical Sciences (43), 2657-2677.

E. YOUSSEF, **“Interactive Movement in Kinect Architecture”**, Journal of Engineering Sciences, Faculty of Engineering, Assiut University, 2014.

FACHADA VARIABLE, **Sistema de Fachada- Origami Mixto Teselación -Arcodeón**, Curso Diseño Experimental de Fachadas, 2018. Disponível em: <<http://www.fachadavariabile.cl/2018/07/12/sistema-de-fachada-origami-mixto-teselacion-acordeon>> Acesso em: 20 set. 2018

FARIA, V, A., **“Análise Numérica de Frequência Natural de Materiais Compósitos Híbridos com Memória de Forma”**, Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Universidade de Brasília, 2007.

FISH, J., BELYTSCHKO, T., **“A first course in finite elements”**, Rensselaer Polytechnic Institute, USA, Northwestern University, USA, 2007.

FLOR, L. S., “**Simulation Numérica y Correlacion Experimental de las Propiedades Mecánicas em las Aleaciones com Memoria de Forma**”, Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras em Ingeniería, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña, 2005.

FERNANDES, G. F., “**Construção e caracterização de mola helicoidal com memória de forma aplicada em um atuador linear termoativado**”, Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014. Disponível em: <<https://sistemas.eel.usp.br/bibliotecas/monografias/2014/MEM14002.pdf>>, Acesso em: 12 de Maio de 2018.

FOX, M., & KEMP, M., “**Interactive Architecture**”, New York: Princeton Architectural Press, 2009

HODGSON DE, WU MH & BIERMANN RJ, “**Shape Memory Alloys**”, Metals Handbook. Vol. 2. ASM International, Ohio, 1990, p. 897-902.

HUANG, W., 2002. “**On the selection of shape memory alloys for actuators**”. Materials & Design 23.

IKUTA, K., TSUKAMOTO. M. E HIROSE S., 1988, “**Shape Memory Alloy servo actuator system with electric resistance feedback and application for active endoscope**” In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, v. 1, p. 427-430.

INTELLIGENT SKINS, **Enveloppes Intelligentes**, Un système de pliage en façade, 2013. Disponível em: <<http://intelligentskins.serero.com/?p=1363>> Acesso em: 21 set. 2018

JANI, J.M., LEARY, M., SUBIC, A. E GIBSON, M.A. “**A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**”, Materials & Design, Volume 56, p. 1078-1113, 2014

JANOCHA, H., “**Actuators: Basic and Application**”. Springer Science & Business Media, 2004.

KAPLANOGLU E., “**Design of shape memory alloy-based and tendon-driven actuated fingers towards a hybrid anthropomorphic prosthetic hand**”, International Journal Advanced Rob System, 2012, vol. 9, p. 1-6.

K. ANDRIANESIS, Y. KOVEOS, G. NIKOLAKOPOULOS, A. TZES, “**Experimental Study of a Shape Memory Alloy Actuation System for a Novel Prosthetic Hand**”, Shape Memory Alloys Edited by Corneliu Cismasiu. Published by Sciyo, p. 81-105, 2010.

K. CHAI, “**The Design and Construction of Interactive Architectural Environments: The Digital Mile**”, Department of Mechanical Engineering, MIT, USA, 2006.

K. WADA, Y LIU. “**Factors affecting the generation of stress-assisted two-way memory effect in NiTi shape memory alloy**”. Journal of Alloys and Compounds, p. 163-170

KIM, S., HAWKES, E., CHO, K., JOLDAZ, M., FOLEYZ, J., AND WOOD, R., “**Micro artificial muscle fiber using NiTi spring for soft robotics**”, presented at the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS 2009), p. 2228–2234, 2009.

KOH, J., AND CHO, K., “**Omega-Shaped Inchworm-Inspired Crawling Robot With Large-Index-and-Pitch (LIP) SMA Spring Actuators**”, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 18, No. 2, p. 419–429, 2013.

KOH J., KIM S., CHO K., “**Self-Folding Origami Using Torsion Shape Memory Alloy Wire Actuators**”, ASME, International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Buffalo, New York, USA, 2014.

LIGNARALO L., LILIEVELD C., TEUFFEL PATRICK., “**Shape Morphing wind-responsive Façade Systems realized with Smart Materials**”, Delft University of Technology, The Netherlands.

L.G. MACHADO E M.A. SAVI. “**Medical application of Shape Memory Alloy**”. Brazilian Journal of Medical and Biological Research (2003) 36: p. 683-691

LA CAVA, C.A.P.L., PACHECO, MACHADO, L.G E SILVA, E.P. ; **“Modelagem de Dispositivos Mecânicos Fabricados de Ligas com Memória de Forma”** , Projeto Final, *Departamento de Engenharia Mecânica, CEFET/RJ*, 1999

LAGOUDAS D C, **“Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications”**, Springer, New York, NY, 2008.

LELIEVELD, C.M.J.L. AND A.I.M. VOORBIJ, **“Dynamic Material Application for Architectural Purposes”**. *Advances in Science and Technology* 56, 595-600, 2008.

LES BLOG PARTY, HelioTrace. Disponível em: <www.sites.google.com/site/lesbloqparty/heliotrace>, Acesso em: 28 set. 2018

M. AHMED, K. ALI, B. MAHMOUD, **“Optimum Energy Consumption by using Kinect Shading System for residential buildings in Hot Arid Areas”**, *International Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 2016

MAESTA, M. F. **“Controle nebuloso aplicado em asas adaptativas utilizando ligas de memória de forma”**, dissertação (pós-graduação em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2012.

MAJED J. **“Design strategy for adaptive kinetic patterns : creating a generative design for dynamic solar shading systems”**, Master thesis. University of Salford. Manchester, UK; 2013.

MAVROIDIS, C., **“Development of Advanced Actuator Using Shape Memory Alloys and Electroheological Fluids”**, Springer-Verlag, New York, NY, 2002.

MIKOVÁ, S. MEDVECKÁ-BEŇOVÁ, M. KELEMEN, F. TREBUŇA, I. VIRGALA, **“Application of Shape Memory Alloy (SMA) as Actuator”**, *Journal Metalurgia*, n.54, p. 69-172, 2015.

MONTEIRO JR., P. C. C., 2007, **“Análise do acoplamento termomecânico em ligas com memória de forma”**. 147 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – COPPE, Rio de Janeiro.

MONTEIRO P.C.C, MONTEIRO L.L.S., SAVI M.A., NETTO T.A., PACHECO P. M. C. L. and PAIVA T. **“A comparative analysis of different shape memory alloy actuator configurations”**. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, p.1–13, 2016.

MORGAN, N. B. **“Medical Shape memory alloy applications -the market and its products”**. Materials Science & Engineering, Arvada, 2004, p. 16-23.

MIYAZAKI, S. et al., **“Medical and dental applications of shape memory alloys”**. Shape memory materials, v. 12, p. 267-281, 1999.

OTSUKA, K., and REN, X., 2005, **“Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys”**, Progress in Materials Science, 50, p. 511-678.

PAIVA, A; **“Modelagem do comportamento de Ligas com Memória de forma”**, Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Mecânica, PUC-RIO, 2004

PAIVA, A., SAVI, M. A., BRAGA, A. M. B., PACHECO, P. M. C. L., **“Overview of Constitutive Models for Shape Memory Alloys”**, Mathematical Problems in Engineering, Hindawí Publishing Corporation, ID 56876, p. 1-30, 2006.

PEDRO M.C.L. PACHECO, PAULA S.F. OLIVEIRA, RICARDO A.A. AGUIAR E SILVIO DE BARROS. **“Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Elemente Method”**. The Journal of Adhesion (2015) 91: p. 10-11

PEREIRA, JULIANA, **“Um estudo sobre atuadores lineares com molas helicoidais de ligas com memórias de forma”**, 2009

ROBERT L. NORTON, **“Projeto de Máquinas - Uma abordagem integrada”**, 4ª Edição, 2013

S. D. GUEST AND S. PELLEGRINO, **“Inextensional wrapping of flat membranes”**, in Proc. International Seminar on Structural Morphology, Montpellier, p. 203 –215, 1992.

SHIGLEY, J. E., MISCHKE C. R. E BUDYNAS R. G., **“Projeto de Engenharia Meannica”**, 2005

SIMO, J. C., TAYLOR, R. L., **“A Return Mapping Algorithm for Plane Stress Elastoplasticity”**, International Journal of Numerical Methods in Engineering, Vol. 22, p. 649-670, 1986.

SOLOMOU, ALEXANDROS. **“Development and validation of thermo-mechanically coupled finite elements for the simulation of the nonlinear time response of multi-layered shape memory alloy beams”**, 2016.

SOUZA, A. C.; MAMIYA, E. N.; ZOUAIN, N., **“Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations”**, European Journal of Mechanics - A/Solids, n. 5, Setembro 1998.

TAKEZAWA T, SATO S., 1976, Proc 1st JIM Int Symp on New Aspects of Martensitic Transformations, Suppl. Trans JIM, Vol. 17, p. 233.

TAMITA D, TAMITA D, BOLCU D. IN, **“Biomedical engineering – from theory to applications”**, 2011.

THOMPSON SA., **“An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry”**, Int Endod J 1999, 3: p. 287-310.

VAN HUMBEECK, J. **“Damping capacity of thermoelastic martensite in shape memory Alloys”**. Journal of Alloys and Compounds, v. 355, p. 58-64, 2003.

VON FLOTOW, A.H.; BEARD, A.H. & BAILEY, D., **“Adaptive tuned vibration absorbers: tuning laws, tracking agility, sizing and physical implementation”**, Proc. Noise-Con 94, pp. 81-101, Florida, USA, 1994

WARLIMONT, H.; KRISHNAN, R.V.; DELAEY, L, 1974.; et al. **“Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations,**

Part. 1 Structural and microstructural changes". Journal of Materials Science, vol. 9, p. 1521-1535

WAYMAN, C. & DUERIG, T. W., 1990. **"Engineering aspects of shape memory alloys"**.

K. WILLIAMS, G. CHIU, AND R. BERNHARD, **"Adaptive-passive absorbers using shape memory alloys"**, Journal of Sound and Vibration 249 (2002), no. 5, 835–848.

YAN, X. J.; YANG, D. Z.; LIU, X. P. **"Influence of heat treatment on the fatigue life of a laser-welded NiTi alloy wire"**. Materials Characterization, v. 58, p. 262-266, 2007.