CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO - DIPPG

ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Tamara Leite de Paiva

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

Orientadores:

Luciana Loureiro da Silva Monteiro
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Rio de Janeiro
Abril de 2017

ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pósgraduação de Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiaisdo Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da FonsecaCEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia dos Materiais

Tamara Leite de Paiva

Aprovada por:

_____
Prof. D.Sc. Luciana Loureiro da Silva Monteiro (Orientadora)

_____
Prof. D.Sc. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco (Co - orientador)

_____
Prof. D.Sc. Sérgio de Almeida Oliveira – CEFET/RJ

_____
Prof. D.Sc. Marcelo Amorim Savi – COPPE/UFRJ

_____
Prof. D.Sc. Paulo Cesar da Camara Monteiro Junior – COPPE/UFRJ

Rio de Janeiro
Abril 2017

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

P149 Paiva, Tamara Leite de
Análise numérica de diferentes configurações de atuadores com memória de forma / Tamara Leite de Paiva.—2017.
77f. : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Dissertação (Mestrado) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.
Bibliografia : f. 73-77
Orientadores : Luciana Loureiro da Silva Monteiro
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

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

CDD 620.16

Dedico este trabalho a Deus em primeiro lugar, autor da vida, socorro presente em todas as horas e minha fortaleza, ao meu marido Fagner Vitor que sempre me apoiou em todos os momentos de dificuldade, à minha família tão especial e amada.

AGRADECIMENTOS

Meu Deus, pela graça da vida e por me conceder a graça de concretizar mais um sonho. Sou eternamente grata.

Ao meu marido Fagner Vitor, pelo apoio, auxílio, orientação em todas as horas e por tudo que representa em minha vida que palavras não expressam.

Aos meus pais, pelo exemplo de seres humanos que são para mim, pelo direcionamento de vida e suporte moral, cujo apoio constante tem sido fundamental em todos os momentos de minha vida.

À minha orientadora Luciana Loureiro, pela orientação, dedicação, apoio, paciência e por acreditar no meu potencial. Sou eternamente grata.

Ao meu coorientador Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, pela dedicação e todo auxílio na realização desta dissertação.

“Todo mundo deveria se dedicar a um grande

projeto pelo menos uma vez na vida”.

Sakichi Toyoda, pai de Kiichiro Toyoda, fundador da Toyota.

RESUMO

ANÁLISE NUMÉRICA DE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ATUADORES COM MEMÓRIA DE FORMA

Tamara Leite de Paiva

Orientadores:

Luciana Loureiro da Silva Monteiro
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

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

As ligas com Memória de Forma, do inglês Shape Memory Alloys (SMAs) são materiais bastante atraentes devido ao seu potencial para aplicações como atuadores usando a sua habilidade de memorizar formas através de carregamentos termomecânicos. Este trabalho tem como objetivo desenvolver uma investigação numérica de diferentes configurações considerando arranjos com molas elásticas e sistemas antagônicos. Simulações numéricas foram realizadas usando o método de elementos finitos junto com um modelo constitutivo para as SMAs. Uma análise paramétrica é realizada para verificar a performance de cada configuração de atuador baseada nas informações de tensão e deformação. Basicamente, quatro configurações são estudadas: Fio com memória de forma, um fio com memória de forma conectado a uma mola elástica, duas molas elásticas conectadas a um fio com memória de forma e dois fios com memória de forma conectados a uma mola elástica.

Palavras-chave: Materiais Inteligentes, Ligas com Memória de forma, Atuadores, Modelagem Constitutiva, Métod de Elementos finitos.

Rio de Janeiro
Abril de 2017

ABSTRACT

NUMERICAL ANALYSIS OF DIFFERENT CONFIGURATIONS OF ACTUATORS WITH SHAPE MEMORY

Tamara Leite de Paiva

Advisors:

Luciana Loureiro da Silva Monteiro
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca CEFET/RJ as partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Mechanical Engineering and Materials Technology

Shape memory alloys (SMAs) are attractive engineering materials due to their potential application as actuators using the ability to memorize shapes through a thermomechanical loading. This paper develops a numerical investigation of different SMA actuator configurations considering bias and antagonistic arrangements. Numerical simulations are carried out using the finite element method together with a constitutive model for SMAs. Parametric analysis is carried out evaluating the performance of each actuator configuration based on stress and strain. Basically, four representative configurations of general actuators are treated: SMA wire; linear spring connected to an SMA wire; two elastic springs connected by an SMA wire; and two SMA wires connected by a spring.

Keywords: Intelligent Materials, Shape Memory Alloys, Actuators, Constitutive Modeling, Finite Element Method.

Rio de Janeiro
April 2017

LISTA DE FIGURAS

FIGURA II-1: DIAGRAMA DE DENSIDADE DE ENERGIA DE ATUAÇÃO (LAGOUDAS, 2008) 14
FIGURA II-2: FREQUÊNCIA DE ATUAÇÃO (HZ) (LAGOUDAS, 2008) 15
FIGURA II-3: RELAÇÃO DESEMPENHO/PESO DE DIFERENTES ATUADORES (NESPOLI *ET AL.,* 2010) 16
FIGURA II-4: MODELO DE DISPOSITIVO COM SMA (NESPOLI *ET AL.*, 2010) 17
FIGURA II-5: ESQUEMA DE FUNCIONAMENTO DO DISPOSITIVO COM SISTEMA DE ATUAÇÃO PNEUMÁTICO. (A) O DISPOSITIVO NOVINTERIOR DO CORPO HUMANO, (B) UMA VISÃO INTERNA DO CONTROLE PNEUMÁTICO EXISTENTE (CARROZZA *ET AL.*, 2003) 17
FIGURA II-6: CORTES TRANSVERSAIS DO DISPOSITIVO DESENVOLVIDO POR CARROZZA *ET AL.* (2003) COM SISTEMA DE ATUAÇÃO UTILIZANDO UMA MOLA DE SMA 18
FIGURA II-7: ATUADOR DESENVOLVIDO POR STRITTMATTER E GÜMPEL (2004) 19
FIGURA II-8: ESQUEMA DE UM ATUADOR LINEAR GERANDO FORÇA EM UM SENTIDO DESENVOLVIDO POR PULNEV *ET AL*. (2004). (1) ELEMENTO SMA, (2) ELEMENTO DE SAÍDA DO SISTEMA E (3) MOLA DE AÇO. 19
FIGURA II-9: GRÁFICO F(X) GERADO PELA SOLUÇÃO NUMÉRICA (PULNEV *ET AL*., 2004) 19
FIGURA II-10: MINI-ATUADOR DA *STARSYS RESEARCH AND APPLIED PHYSICS LABORATORY.* UM PINO MÓVEL É MOVIMENTADO POR UM FIO SMA QUE TRABALHA CONTRA UMA MOLA (DONNELLAN, 2005). 20
FIGURA II-11: ESQUEMA DO ATUADOR DE DONNELLAN PARA MODELAGEM NUMÉRICA (DONNELLAN, 2005). 20
FIGURA II-12: RELAÇÃO FUNDAMENTAL ENTRE OS DIÂMETROS DOS ELEMENTOS ELÁSTICOS NO MODELO DE DONNELLAN (2005) 21
FIGURA II-13: MINI-ATUADOR DO DONNELLAN (2005) 21
FIGURA II-14: RESULTADOS ANALÍTICOS PARA DIFERENTES NÚMEROS DE SEGMENTOS (ELWALEED *ET AL.*, 2007) 22
FIGURA II-15: REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ATUADOR DESENVOLVIDO POR ELWALEED *ET AL.* (2007) 22
FIGURA II-16: RESULTADOS DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA E EXPERIMENTAL COM FIOS SMA (ELWALEED *ET AL,*2007) 22
FIGURA II-17: DIMENSÕES FORÇA-VELOCIDADE E FORÇA-DEFORMAÇÃO NOS MÚSCULOS ESQUELÉTICOS (A, B), E RESULTADOS EXPERIMENTAIS PARA UM FIO SMA (C, D) (ZHANG; YIN, 2012). 23
FIGURA II-18: MODELO PROPOSTO POR ZHANG E YIN (2012) 24
FIGURA II-19: PROTÓTIPO EXPERIMENTAL PARA ANÁLISE DE ATUADORES COM ELEMENTO SMA (MONTEIRO *ET AL.*, 2013) 25
FIGURA II-20: FIGURA ESQUEMÁTICA DO EXPERIMENTO (MONTEIRO *ET AL.,* 2013) 25
FIGURA II-21: PROCESSO DE AQUECIMENTO: (A) APLICAÇÃO DE VOLTAGEM E (B) RESPOSTA DA TEMPERATURA (MONTEIRO *ET AL*., 2013) 26
FIGURA II-22: TENSÃO E DEFORMAÇÃO EM FUNÇÃO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR (MONTEIRO *ET AL.,* 2013) 26
FIGURA II-23: EFICIÊNCIA DO ATUADOR DE MONTEIRO *ET AL.* (2013) 27
FIGURA II-24: REFLEXO DE TAVAMENTO DA MÃO HUMANA POR GAO *ET AL.* (2014) 28
FIGURA II-25: ATUADOR HÍBRIDO PROPOSTO POR GAO *ET AL.* (2014) 29
FIGURA II-26: PROTÓTIPO DO MODELO DE GAO *ET AL.* (2014) 29
FIGURA III-1: ESTRUTURA CRISTALINA DAS FASES MARTENSITA E AUSTENITA DAS LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LA CAVA *ET AL.*, 1999) 32
FIGURA III-2: TERMOGRAMA PARA UMA LIGA NITINOL (SHAW & KYRIAKIDES, 1995 *APUD* AGUIAR, 2011) 33
FIGURA III-3: COMPORTAMENTO TERMOELÁSTICO DA SMA (LA CAVA *ET AL*., 1999) 33
FIGURA III-4: TRANSFORMAÇÃO DE FASE DEVIDO À VARIAÇÃO DE TEMPERATURA 35
FIGURA III-5: EFEITO PSEUDOELÁSTICO (LAGOUDAS, 2008) 36
FIGURA III-6: EFEITO MEMÓRIA DE FORMA (LAGOUDAS, 2008) 36
FIGURA IV-1: REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DA RESTRIÇÃO PARA COEXISTÊNCIA DAS FASES (PAIVA *ET AL.,* 2005) 39
FIGURA V-1: EFEITO MEMÓRIA DE FORMA: (A) CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO MOSTRANDO UMA COMPARAÇÃO ENTRE RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS; (B) EVOLUÇÃO DA FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA MARTENSITA (MONTEIRO *ET AL*., 2013) 44
FIGURA V-2: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DAS CONFIGURAÇÕES DE ATUADOR 44
FIGURA V-3: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ATUADOR F 45
FIGURA V-4: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ATUADOR MF 46
FIGURA V-5: DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO ATUADOR MFM 47

Figura V-6: Diagrama esquemático do atuador FMF 48
Figura VI-1: Atuador F (a) carregamento mecânico e (b) processo de carregamento térmico 50
Figura VI-2: Atuador F: Evolução da deformação durante o ciclo térmico 51
Figura VI-3: Atuador F: Evolução da fração volumétrica durante o ciclo térmico 51
Figura VI-4: Tensão-deformação-temperatura para diferentes níveis de tensão aplicados 52
Figura VI-5: Deformação recuperável para diferentes níveis de tensão aplicados 53
Figura VI-6: Carregamento mecânico (esq.) e térmico (dir.) 53
Figura VI-7: Evolução da deformação durante os ciclos térmicos 54
Figura VI-8: Evolução da fração volumétrica durante o ciclo térmico. 55
Figura VI-9: Deformação recuperável para diferentes níveis de carregamentos térmicos aplicados 56
Figura VI-10: Tensão-deformação-temperatura para diferentes ciclos térmicos aplicados 56
Figura VI-12: Atuador MF: Evolução das curvas de tensão (a) e deformação (b) para diferentes rigidezes de mola durante o ciclo térmico 57
Figura VI-13: Atuador MF: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a) e austenita (b) para diferentes rigidezes de mola durante o ciclo térmico 58
Figura VI-14: Atuador MF: Curvas de Tensão-deformação-temperatura para o processo de carregamento completo considerando diferentes valores de rigidez da mola durante o ciclo térmico 58
Figura VI-15: Atuador MF: Curvas tensão SMA e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez das molas. 59
Figura VI-16: Atuador MFM: Evolução das curvas de tensão (a) e deformação (b) para diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico 60
Figura VI-17: Atuador MFM: deslocamento das duas extremidades do fio SMA durante o ciclo térmico 60
Figura VI-18: Atuador MFM: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a) e austenita (b) para diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico 61
Figura VI-19: Atuador MFM: Curvas de Tensão-deformação-temperatura considerando diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico 62
Figura VI-20: Atuador MFM: Curvas tensão SMA e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez das molas 62
Figura VI-21: Atuador FMF: Ciclo térmico 63
Figura VI-22: Atuador FMF: Evolução da tensão SMA durante o ciclo térmico e considerando diferente rigidezes de mola 64
Figura VI-23: Atuador FMF: Evolução da deformação durante dois ciclos térmicos para o fio esquerdo (a) e direito (b) 65
Figura VI-24: Atuador FMF: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a), austenita (b), martensita não maclada (c) e austenita (d) durante o ciclo térmico para os fios esquerdo e direito, respectivamente 66
Figura VI-25: Atuador FMF: Curvas de tensão-deformação-temperatura para diferentes valores de rigidez de mola 66
Figura VI-26: Atuador FMF: Curvas de tensão e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez de mola 67
Figura VII-1: Gráfico comparativo da tensão SMA resultante das diferentes configurações de atuadores com valores distintos de rigidez de mola 68
Figura VII-2: Comparativo da deformação recuperável resultante nas diferentes configurações de atuadores com valores distintos de rigidez de mola 69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: PARÂMETROS DO MODELO (MONTEIRO *ET AL.*, 2013) 43
TABELA 2: QUADRO COMPARATIVO DA TENSÃO SMA MÁXIMA E DEFORMAÇÃO RECUPERÁVEL RESULTANTE 70

SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO 12

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 14

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 31

IV. MODELAGEM CONSTITUTIVA 38

V. METODOLOGIA 42

V.1 Procedimento Numérico 42

V.2 Verificação do Modelo 42

V.3 Fio de SMA (Atuador F) 45

V.4 Fio de SMA conectado a uma mola elástica linear (Atuador MF) 46

V.5 Duas molas elásticas lineares conectadas a um Fio de SMA (Atuador MFM) 47

V.6 Dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear (Atuador FMF) 48

VI. RESULTADOS 50

VI.1 Fio de SMA (Atuador F) 50

VI.2 Fio de SMA conectado a uma mola elástica linear (Atuador MF) 57

VI.3 Duas molas elásticas lineares conectadas a um Fio de SMA (Atuador MFM) 59

VI.4 Dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear (Atuador FMF) 63

VII. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE OS ATUADORES 68

VIII. CONCLUSÕES 71

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 73

I. Introdução

Com a crescente utilização da automação e mecanização das atividades promovidas pela inovação tecnológica, faz-se necessário a focalização em atividades de melhorias que maximizem a eficiência das entradas de sistemas de operação, de modo a aumentar os níveis de produtividade em atendimento às necessidades de projetos.

As decisões são cada vez mais sensíveis, e inúmeros fatores e indicadores são aliados na mensuração e quantificação do desempenho da operação para promover melhorias estratégicas. A demanda por produtos mais complexos desafia os padrões da engenharia atuais, que buscam qualidade, confiabilidade e segurança no desenvolvimento de estruturas e máquinas para redução de ocorrências de falhas, assumindo assim uma postura preventiva se antecipando também à ocorrência de custos indevidos.

Assim, o entendimento acerca das restrições de operação e questões relevantes que impactam a equação da produtividade é essencial no processo de otimização, no qual a identificação dos problemas representa oportunidade, o que é indispensável para o processo de melhoria contínua e redução de custos. São inúmeras as ferramentas de apoio a esse objetivo que, basicamente, envolvem a incorporação de processos e/ou tecnologias. No âmbito da tecnologia, os sistemas utilizando materiais inteligentes têm se tornado uma tendência nos projetos de engenharia aplicados às estruturas e máquinas em geral para redução da variabilidade de processos, e são encontrados na forma de sensores e atuadores, possibilitando atender a demandas por produtos mais leves, eficientes, silenciosos e com menores custos associados (STRITTMATTER et al., 2004; SPAGGIARI, 2012; AGUIAR, 2013; PACHECO et al., 2015).

Essa classe de materiais possui características adaptativas podendo modificar suas propriedades físicas mediante a aplicação de um estímulo adequado. Dentre os chamados materiais inteligentes, destacam-se as ligas com memória de forma (SMAs) (OTSUKA *et al.*, 1998). As propriedades singulares das SMAs estão associadas com as transformações de fase martensíticas responsáveis por diferentes comportamentos termomecânicos complexos dessas ligas. Além da pseudoelasticidade e do efeito da memória forma, as SMAs podem apresentar ainda comportamentos como o efeito de memória de forma reversível (do inglês, *two-way shape memory effect*), obtido através de treinamentos termomecânicos (LAGOUDAS, 2008; LIU et al., 1999; ATLI et al., 2013). É possível também explorar o efeito memória de forma assistida por tensão, do inglês *Stress Assisted Two Way Memory Effect* (SATWME) para desenvolver dispositivos que possam ser atuados de maneira reversível através de carregamentos térmicos

(BO and LAGOUDAS, 1999; WADA and LIU, 2005; LAGOUDAS, 2008; MONTEIRO et al., 2013, MONTEIRO et al., 2016).

Esses fenômenos dão uma idéia geral da complexidade do comportamento termomecânico das SMAs. Neste contexto, a modelagem e a simulação do comportamento termomecânico das ligas de memória de forma são objetos de muitas pesquisas, em busca de melhor descrever os principais aspectos do comportamento das ligas. A busca por novos atuadores inteligentes com elemento de SMA tem motivado diversos autores a desenvolverem trabalhos para caracterizar o seu comportamento (MONTEIRO *et al.,* 2016; SOFLA *et al*., 2008). Neste trabalho é apresentado um estudo numérico baseado no método de elementos finitos de diferentes configurações de atuadores considerando arranjos de fios com memória de forma e elementos elásticos. Para este fim, são utilizados os efeitos de memória de forma e memória de forma assistida por tensão (LAGOUDAS*,* 2008). Este estudo se apóia em um modelo constitutivo para SMAs desenvolvido por SAVI *et al*. (PAIVA *et al.,* 2005; SAVI *et al.*, 2005; BAÊTA-NEVES *et al.,* 2004; MONTEIRO *et al.,* 2009) e implementado como uma sub-rotina UMAT (*User Material*) no software comercial ABAQUS por BANDEIRA *et al*. (2006).

Por meio de simulações numéricas e análises paramétricas é possível verificar o desempenho alcançado de quatro tipos de arranjos de atuadores em relação ao seu comportamento em termos de tensão e deformação, ou seja, a capacidade deles em produzir força e de se deslocar, respectivamente, bem como o melhor elemento elástico a ser utilizado, para máxima eficiência do dispositivo em alguns casos. Inicialmente é explorado o comportamento de um fio de SMA submetido a carregamentos mecânicos constantes; em seguida; uma mola linear conectada a um fio de SMA; duas molas elásticas conectadas a um fio SMA; e, por fim, dois fios SMA interligados por uma mola. Todos os sistemas são atuados através de carregamentos térmicos de aquecimento e resfriamento. Os quatro arranjos de atuadores foram selecionados pela aplicabilidade notável na literatura ao longo da última década. O presente estudo verifica então a potencialidade de cada um para um estudo comparativo e, portanto, tem como objetivo principal apoiar as próximas pesquisas no tema consolidando as melhores práticas de atuadores desenvolvidos recentemente, fornecendo assim uma metodologia que pode ser empregada para o estudo e desenvolvimento de atuadores para diferentes aplicações.

II. Revisão Bibliográfica

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço no projeto de sistemas mecânicos. Essa classe de materiais possui características adaptativas, isto é, modificam suas propriedades físicas quando há um estímulo adequado. Em linhas gerais, pode-se dizer que, atualmente, alguns dos materiais inteligentes mais conhecidos são os materiais magnetoestrictivos, piezoelétricos, as ligas com memória de forma e as ligas magnéticas com memória de forma (LAGOUDAS, 2008; ERKUT and INMAN, 2011; SILVA et al., 2015(a)).

A capacidade de atuação de um material inteligente é normalmente avaliada através da densidade de energia disponível, e que guarda estreita relação com a sua capacidade de desenvolver forças e deformações de atuação, conforme mostrado na Fig. II.1 (LAGOUDAS, 2008).

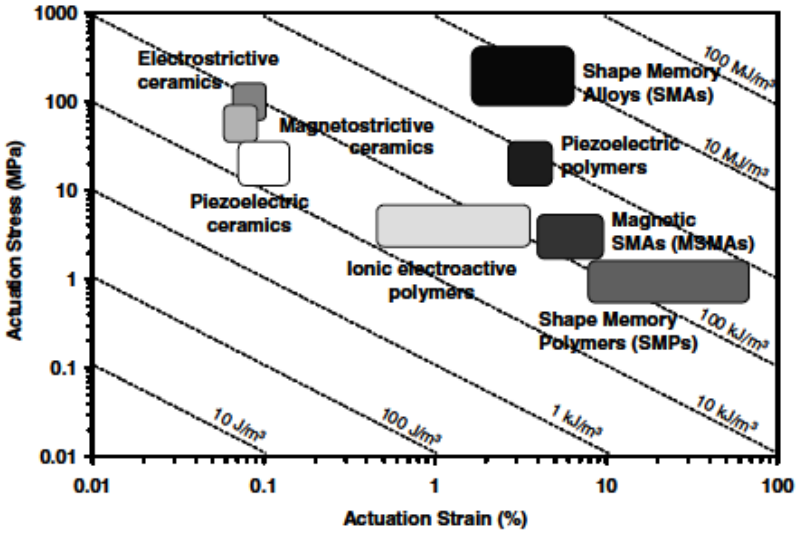


Figura II-1: Diagrama de densidade de energia de atuação (LAGOUDAS, 2008)

Contudo, conforme como pode ser oservado na Fig. II.2, as SMAs exibem uma baixa freqüência de atuação, em comparação com outros tipos de atuadores, visto que o processo de atuação é função do processo de troca de calor do atuador com o ambiente. Essa característica pode não comprometer o desempenho em um dado projeto, a depender do tipo de atuador a ser desenvolvido. Mas se a freqüência de resposta for relevante ao projeto, requer-se um sistema de controle e resfriamento forçado com o objetivo de reduzir o tempo de resposta do atuador com elemento SMA (ROMANO, 2008).

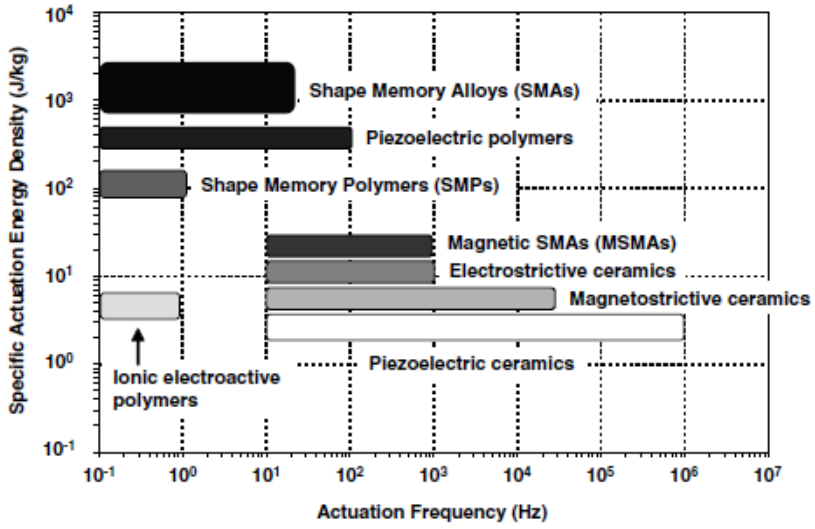


Figura II-2: Frequência de atuação (LAGOUDAS, 2008)

As ligas de memória de forma (SMAs) têm sido usadas como sensores/atuadores inteligentes em uma ampla variedade de aplicações em vários campos, tais como nas áreas de engenharia civil, automotiva, médica, aeroespacial e de comunicação (ANDREASEN *et al*. 1971; CRAGG *et al*., 1983; WILDE *et al.*, 2000, DESROCHES and DELLEMONT; 2002; KOHL *et al.,* 2002; DONG *et al.,* 2008). Diversos materiais apresentam o comportamento termomecânico geral das ligas de memória de forma e, entre eles, é importante destacar: NiTi; Ligas à base de Cu como CuAlNi, CuZnAl; as ligas à base de Fe como FeCrNiMnSi, FeMnSiCrNi e FeCrNiMnSiCo (SATO *et al*.; 1982, KIKUAKI *et al*.; 1986, MORUYA *et al*.; 1991; CINGOLANI *et al*.; 1999, BHUNIYA *et al*., 2005). Materiais tais como películas finas, compósitos e espumas são outras possibilidades que exibem propriedades de liga de memória de forma (LESTER *et al*., 2015).

As ligas a base de NiTi são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas, além de apresentar biocompatibilidade. O Nitinol (termo usado para ligas à base de NiTi) pode ser usado em dispositivos de alto desempenho com deformações recuperáveis na faixa de 6%, ao passo que a liga CuZnAl apresenta deformações recuperáveis de aproximadamente 2%, por exemplo (LAGOUDAS, 2008).

As SMAs possuem características notáveis que são exploradas em atuadores através de diversos efeitos, como o SME (Shape Memory Effect), a superelasticidade ou pseudoelasticidade, e a SATWME (Stress Assisted Two Way Memory Effect). Os dispositivos baseados em ligas de memória de forma podem estar relacionados à produção de pequenas forças ou deslocamentos como micro-atuadores, tais como micro-bombas, micro-válvulas, micro-garras, micro-interruptores e micro-posicionadores (HUANG et al., 2004, NESPOLI et al. 2010);

mas também podem estar associados a sistemas que requerem grande força ou torque de atuação (JANSEN *et al.,* 2004, STRITTMATTER *et al.,* 2004, DONG *et al*, 2008, ZHANG *et al.,* 2012, PAIK *et al.,* 2012; SPAGGIARI *et al*., 2012).

Conforme explica NESPOLI *et al.* (2010), um típico atuador de SMA é normalmente composto de diversas partes, tais como: a estrutura mecânica, o elemento de SMA, um elemento que atua sobre o elemento de SMA como força restituidora, uma unidade de controle elétrica responsável pelo aquecimento do sistema, e um conjunto de outros elementos para acoplar o atuador à estrutura.

O número crescente de pesquisas e publicações sobre atuadores evidencia a busca contínua pela miniaturização de dispositivos que aliam alto desempenho com baixo volume (dimensões), em atendimento à demanda também crescente do mercado por projetos mecânicos mais eficientes e, portanto, de produtos mais leves, compactos, simples, silenciosos e com menores custos associados (KIM *et al.*, 2006; PICCINI and TOWE, 2006; NAMAZU *et al.*, 2007; OLIVEIRA, 2008; MONTEIRO et al., 2013; SILVA et al., 2015(b)). A figura II-3 mostra que as SMAs apresentam boa relação desempenho/peso, o que significa que essa classe de materiais tem alto potencial de miniaturização, razão esta pela qual têm sido tão empregadas no desenvolvimento de atuadores (NESPOLI *et al.*, 2010).

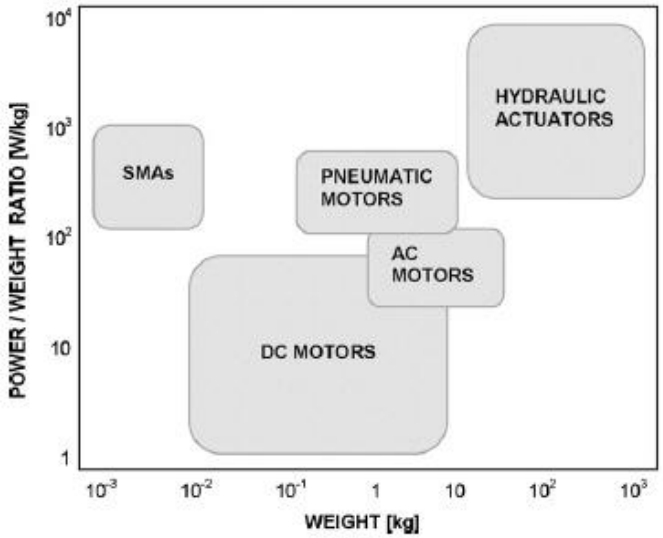


Figura II-3: Relação desempenho/peso de diferentes atuadores (NESPOLI *et al.,* 2010)

Em linhas gerais, um elemento de SMA pode se apresentar a forma de um fio, mola ou combinação de ambos, e que normalmente é conectado a um eixo de saída que transfere o movimento para fora do dispositivo a partir de um ciclo térmico adequado, conforme figura II-4 (NESPOLI *et al.,* 2010). Diferentes tipos de atuadores podem ser projetados considerando o

efeito SATWME que foi explorado nesse trabalho, sendo assim apresentam-se em seguida alguns atuadores encontrados na literatura que utilizam este efeito.



Figura II-4: Modelo de dispositivo com SMA (NESPOLI *et al.*, 2010)

Na área médica, a miniaturização de dispositivos tem sido uma tendência, em busca de soluções cirúrgicas menos invasivas como forma de reduzir os riscos inerentes e que atendam de igual forma, ou superior, aos padrões de confiança e performance quando comparados aos tradicionais. Neste contexto, CARROZZA *et al.* (2003) desenvolveram um micro-dispositivo regulador de pressão com elemento de SMA a ser integrado em um sistema robótico para endoscopia, em substituição ao sistema de atuação pneumático existente. Na figura II-5(a), o dispositivo existente se desloca entre os tecidos do cólon através do controle pneumático mostrado na figura II-5(b).

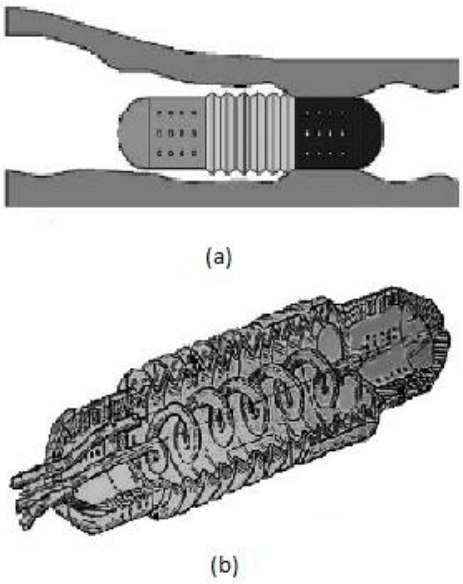


Figura II-5: Esquema de funcionamento do dispositivo com sistema de atuação pneumático. (a) o dispositivo no interior do corpo humano, (b) uma visão interna do controle pneumático existente (Carrozza *et al*., 2003)

Os autores optaram por incluir então uma mola helicoidal de SMA ao sistema pneumático (figura II-6), que possibilitou redução do peso para 30g aproximadamente, ou seja, dez vezes menor e mais leve se comparado ao anterior. A pressão é regulada pelo elemento 6 que obstrui os orifícios de ar empurrando em um selo (7). O elemento 6 é atuado pela mola SMA (2) através do efeito memória de forma e age contra a mola de aço (8). O diâmetro do fio SMA, diâmetro médio da mola SMA e número de espiras foram selecionados para gerar força superior à pressão no interior e da mola de aço. O aquecimento é proporcionado por uma corrente elétrica. Já o resfriamento é um dos diferenciais do estudo, já que ele é feito sempre que é aplicada uma pressão no interior do dispositivo. O fluxo de refrigeração entra pelo canal (1), e é otimizado por (3) e (4) com o objetivo de uniformizar o resfriamento do fio e obter uma resposta mais rápida do sistema.

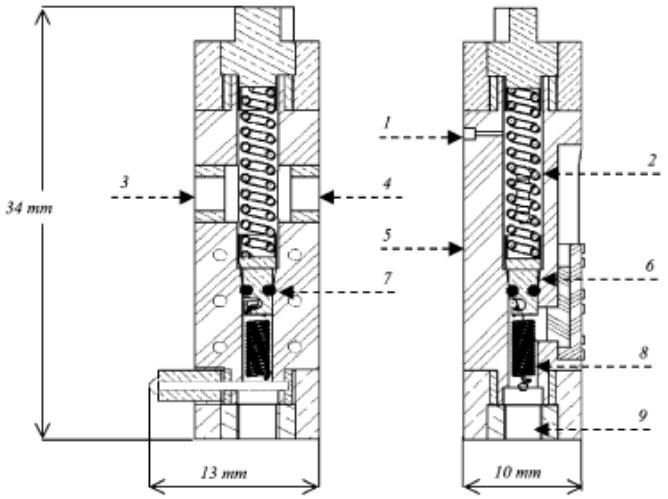


Figura II-6: Cortes transversais do dispositivo desenvolvido por Carrozza *et al.* (2003) com sistema de atuação utilizando uma mola de SMA

Um modelo matemático foi desenvolvido, cujos resultados foram implementados em um modelo já existente para sintonizar a temperatura da mola SMA e alcançar a performance desejada. As simulações numéricas foram satisfatórias, o que motivou os procedimentos experimentais. Os resultados foram novamente convergentes e o dispositivo foi patenteado para aplicação na indústria de biomedicina.

STRITTMATTER e GÜMPEL (2004 apud NESPOLI *et al.*, 2010) criaram um atuador linear para acionamento de uma válvula hidráulica, composto por um parafuso fechado, um eixo, uma chapa metálica, flange e dois fios de SMA. A figura II-7 é uma representação esquemática do princípio de funcionamento, e depois um protótipo do atuador desenvolvido. Basicamente, quando uma corrente elétrica é aplicada, os fios de SMA se contraem e provocam o movimento do flange que, por sua vez, está conectado a um eixo e transfere o movimento para fora do

parafuso. Quando o aquecimento é interrompido, uma mola externa, e que não está demonstrada no esquema, atua como força restituidora empurrando o flange para o interior do dispositivo e, consequentemente, puxando o eixo do atuador no mesmo sentido. Resultados experimentais com fios de Nitinol demonstraram que o atuador é capaz de produzir deslocamento de 0,8 mm contra uma força de 98 N produzida pela mola. O tempo de atuação foi de 0,4s, e o processo reverso completou em 3s (NESPOLI *et al.*, 2010).

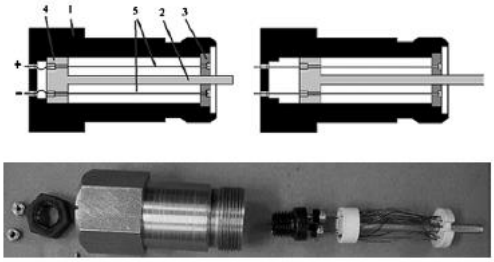


Figura II-7: Atuador desenvolvido por Strittmatter e Gümpel (2004)

PULNEV *et al*. (2004) propuseram um atuador linear com elementos de SMA atuando por flexão e composto da liga CuAlNi. A figura II-8 mostra o esquema do princípio de funcionamento do atuador: o aquecimento provoca a recuperação da forma original do elemento de SMA, o que causa o deslocamento de A para B, e provoca a deformação da mola de aço. Durante o resfriamento, a mola atua como força restituidora sobre o elemento de SMA que retorna à posição inicial em A.

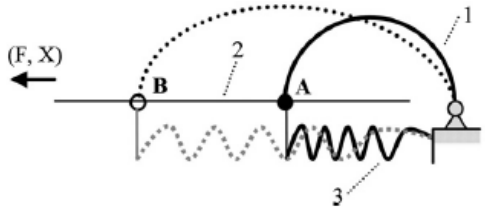


Figura II-8: Esquema de um atuador linear gerando força em um sentido desenvolvido por Pulnev *et al*. (2004). (1) elemento de SMA, (2) elemento de saída do sistema e (3) mola de aço.

Baseados no princípio de design do atuador em estudo, os autores desenvolveram um modelo matemático para prever e calcular o deslocamento e força produzida a partir de relações trigonométricas, diâmetro e deformação máxima. Duas restrições foram adicionadas para calibrar o modelo e atestar a eficácia do atuador antes de sua fabricação: o deslocamento do atuador foi restrito a 85-90% do deslocamento máximo do elemento de saída; e a força da mola deve ser superior à força de retorno do elemento de SMA, a fim de caracterizá-la como restituidora no resfriamento. Os resultados da solução numérica indicaram para esse atuador deslocamento máximo de 9,7 mm e força produzida de 69 N.

DONNELLAN (2005) sugeriu a otimização de um mini-atuador linear desenvolvido pela ALP (do inglês *Starsys Research and Applied Physics Laboratory*) para aplicação em satélites. O projeto original do atuador ALP prevê o deslocamento de um pino móvel através de um fio SMA com diâmetro de 0,076 mm e acoplado em uma mola de aço (figura II-9).

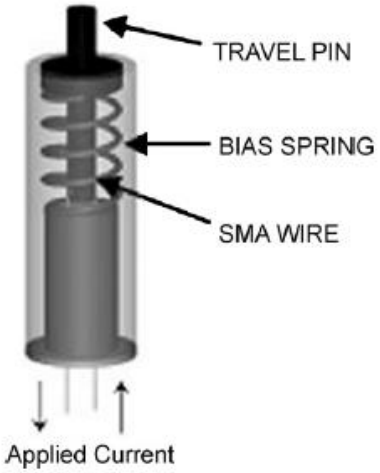


Figura II-9: Mini-atuador da *Starsys Research and Applied Physics Laboratory.* Um pino móvel é movimentado por um fio SMA que trabalha contra uma mola (DONNELLAN, 2005).

O conceito do atuador de Donnellan consistiu em substituir o fio SMA por uma mola SMA de compressão para obter maior deslocamento. Foi necessário então desenvolver inicialmente um modelo numérico capaz de prever precisamente as dimensões do elemento mola com SMA em atendimento a tal objetivo. Os critérios de diâmetro, comprimento e deflexão das molas foram considerados para as relações matemáticas. Também foi levado em consideração que os elementos de mola são concêntricos e que, portanto, compartilham do mesmo eixo de deflexão, visto que se trata de um sistema linear (figura II-10).

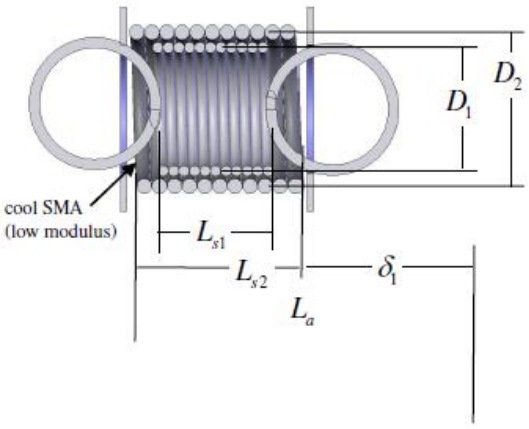


Figura II-10: Esquema do atuador de Donnellan para modelagem numérica (DONNELLAN, 2005).

O objetivo do modelo estava em investigar e definir uma equação que indicasse o comprimento total da mola SMA em função dos dados conhecidos da mola de aço interna. O autor considerou também a condição de que a mola de aço interna deveria ter diâmetro de menor valor em relação à mola SMA, estabelecendo assim uma distância entre os diâmetros, parâmetro este fundamental para assegurar a não transferência de calor para a mola de aço no aquecimento. A figura II-11 mostra um esquema dessas condições importantes na construção do modelo numérico.

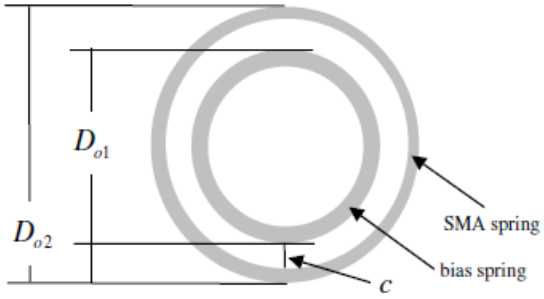


Figura II-11: Relação fundamental entre os diâmetros dos elementos elásticos no modelo de DONNELLAN (2005)

A figura II-12 mostra a solução proposta pelo autor a partir das dimensões calculadas pelo modelo: uma mola de aço é inserida dentro da mola SMA de compressão de comprimento 7,6 mm e 6 mm de diâmetro. As extremidades da mola de aço forçam e mantêm a mola SMA deformada. Com o aquecimento, a mola SMA recupera sua forma original se expandindo, deformando assim a mola de aço.

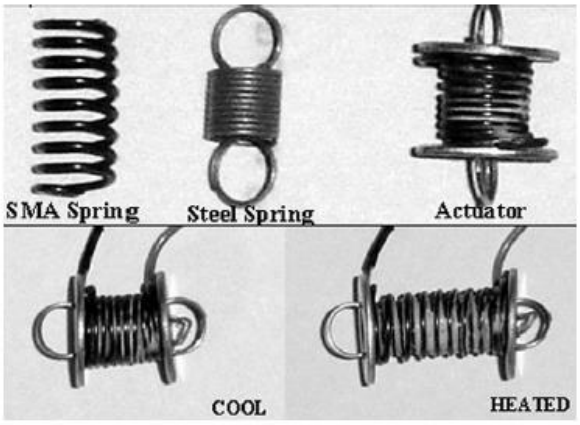


Figura II-12: Mini-atuador do DONNELLAN (2005)

Com esta alteração, o atuador do DONNELLAN (2005) alcançou mais 4 mm de deslocamento, totalizando 7,112 mm tanto na simulação quanto experimental, o que comprovou também a eficácia do modelo em descrever o comportamento do atuador.

ELWALEED *et al.* (2007) desenvolveram um atuador SMA linear capaz de aumentar a deformação com a utilização de vigas elásticas. Os autores propuseram a instalação de dois fios SMA com 150 mm de comprimento e 0,7 mm de diâmetro presos a duas vigas flexíveis através de sete conectores fio-viga, determinando assim seis espaços segmentados nas vigas de igual distância entre os furos, o que foi provado analiticamente pelos autores como o número de segmentos ideal para aumentar o deslocamento do fio em 280% quando comparado com o máximo deslocamento obtido por um segmento na viga.

As vigas são conectadas ainda a duas chapas que permitem movimento vertical, sendo uma fixa e outra móvel interligada a um eixo que, por sua vez, transfere o movimento para fora do dispositivo, conforme mostra a figura II-13.

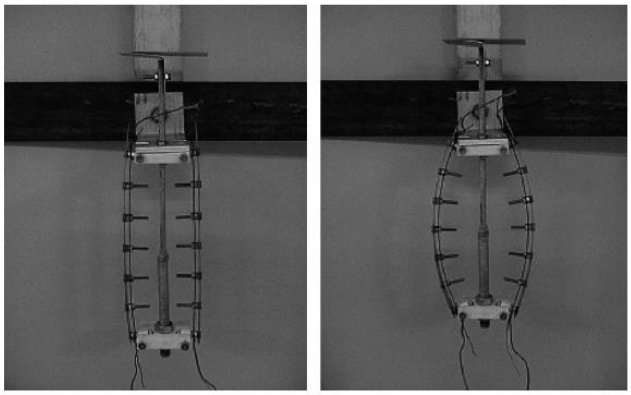


Figura II-13: Representação esquemática do atuador desenvolvido por ELWALEED *et al.* (2007)

O estudo inicialmente desenvolveu um modelo numérico a partir da observação do comportamento do sistema em resposta aos estímulos aplicados, capaz de descrever os dois estágios de aquecimento e resfriamento. Em seguida, um aparato experimental foi montado, composto pelo atuador, um sistema de controle, sensor a laser para medição do deslocamento e uma fonte de energia. Esta configuração de atuador considerou elementos de SMA totalmente engastados e uma extremidade da estrutura submetida a carregamento constante, o que resultou em uma maior deformação do elemento SMA: o sistema promoveu deslocamentos de até 20 mm, ou seja, 280% a mais quando comparado a fios SMA não engastados. Basicamente, o seu princípio de funcionamento se baseia no efeito memória de forma. Durante o aquecimento, o fio SMA se contrai e a viga elástica sofre deflexão. Após o resfriamento, as vigas atuam como força restituidora e deformam novamente os fios SMA. Os autores observaram uma convergência da simulação numérica com os resultados experimentais obtidos.

ZHANG e YIN (2012) desenvolveram um atuador SMA a partir das propriedades observadas nos músculos esqueléticos do corpo humano. Outros autores já haviam publicado trabalhos semelhantes para a mesma aplicação, mas utilizando dispositivos hidráulicos e

pneumáticos, por exemplo. Contudo, no decorrer do tempo, esses tipos de atuadores passaram a serem pouco eficientes em imitar os músculos, em função da baixa densidade de energia, dimensões consideráveis, necessidade de uma fonte de energia extra e consumo relativamente alto associado, condições estas que motivaram estudos com fios SMA.

Neste sentido, buscaram compreender inicialmente as propriedades mecânicas dos músculos, e dois parâmetros de análise foram selecionados para condução dos testes experimentais em um único fio de SMA: força-velocidade e força-deformação. O primeiro avaliou a velocidade do fio no estágio de contração para uma temperatura *T>Af* e submetido a diferentes carregamentos, conforme mostra figura II-14(a). A curva no gráfico revelou que o fio de SMA tem a mesma tendência que os músculos esqueléticos para as propriedades de força-velocidade.

Após a contração, ou seja, transformação de fase completa para Austenita, os mesmos autores observaram que com o aumento da força produzida, a deformação do fio também aumentava. Conforme mostra a figura II-14(c), a curva força-deformação do fio SMA tem a forma de uma parábola e, portanto, semelhante à curva força-deformação dos músculos em estudo, o que aumenta as chances de sucesso no desenvolvimento de atuador com SMA para este fim.

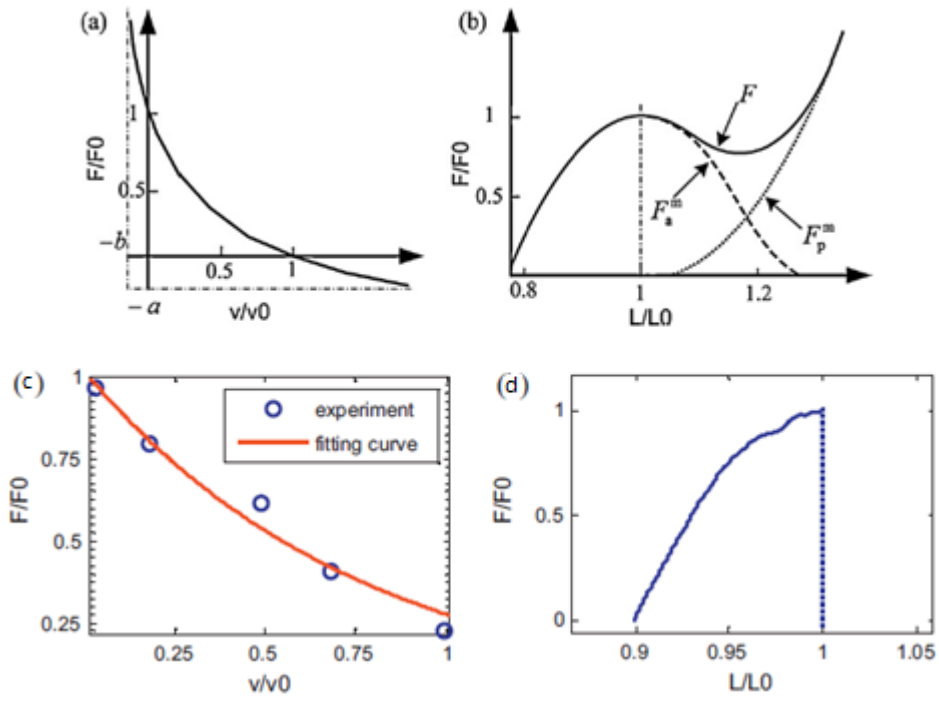


Figura II-14: Dimensões força-velocidade e força-deformação nos músculos esqueléticos (a, b), e resultados experimentais para um fio SMA (c, d) (ZHANG; YIN, 2012).

A partir do modelo de Hill (1938 *apud* ZHANG e YIN, 2012), os autores desenvolveram um atuador SMA composto por 16 fios de SMA com diâmetro de 0,15 mm, comprimento de 250 mm e deformação máxima de 20 mm (figura II-15). A mesma arquitetura proposta por Hill para

os músculos esqueléticos com três componentes principais foi aplicada: o elemento de contração (CE) representando as fibras dos músculos responsáveis pela contração do movimento; o elemento paralelo (PE) atuando no controle do alongamento para evitar deformação plástica,o que prejudicaria o efeito memória de forma; e o elemento em série (SE) representando os tendões que, por sua vez, são responsáveis por transmitir força ao músculo e armazenar energia para o movimento, ou seja, atua como força restituidora.

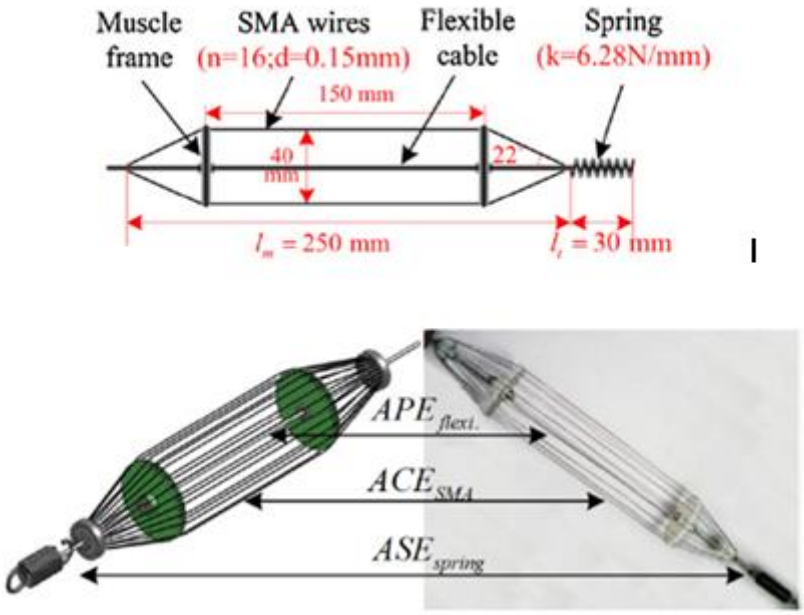


Figura II-15: Modelo proposto por Zhang e Yin (2012)

No modelo de ZHANG e YIN (2012), os fios SMA são os elementos de contração (CE). Como elemento paralelo (PE), definiu-se um cabo flexível, para controle do alongamento e redução de danos ao material por plasticidade, conectado ainda a dois frames que, por sua vez, têm como funcionalida de melhorar o resfriamento de cada fio SMA e, consequentemente, diminuir o tempo de resposta do atuador ao sistema. O elemento de série (SE) está representado por uma mola. Quando o fio SMA se contrai recuperando sua forma original (Austenita), o cabo assume força passiva igual zero, o que significa dizer que ele não afeta o parâmetro força-deformação do atuador. Quando o fio deforma e se alonga (Martensita), o cabo é então tensionado e produz uma força passiva que aumenta rapidamente devido a sua alta rigidez. Como resultado, a força produzida pelos fios de SMA e que impulsiona o movimento de alongamento reduz-se de forma correspondente ao cabo.

Outro trabalho de relevância foi publicado por MONTEIRO *et al.* (2013) que consiste em um protótipo experimental para avaliar a influência da taxa de aquecimento na performance do atuador sob dois aspectos principais: força-deslocamento e energia de deformação. Adicionalmente, investigou-se também a eficiência do dispositivo do ponto de vista de energia

aplicada ao sistema, medida a partir das curvas de força-deslocamento ou tensão-deformação para identificar uma tendência geral do comportamento termomecânico de atuadores com SMA em relação à influência da taxa de calor. A figura II-16 mostra um esquema do protótipo experimental. Os autores utilizaram um fio de Nitinol (54.8% Ni e 45.2% Ti) com 1,71 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento preso a uma célula que mede os carregamentos que, por sua vez, tem um dispositivo acoplado para medir os deslocamentos. Esta célula é conectada ainda a uma mola helicoidal de aço que é responsável por atuar como força restituidora ao elemento de SMA no sistema.

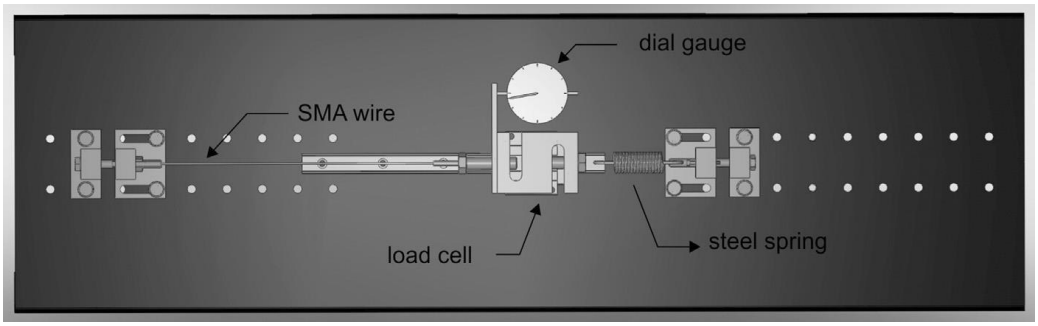


Figura II-16: Protótipo experimental para análise de atuadores com elemento SMA (Monteiro *et al.*, 2013)

Inicialmente, o fio de SMA foi submetido a carregamentos com o objetivo de apresentar-se já deformado em temperatura ambiente. Desta forma, o atuador proposto inicia-se com o elemento de SMA em sua fase martensita não-maclada. Na sequencia, o aquecimento é feito com a aplicação de uma corrente elétrica e o material experimenta a tranformação de fase austenítica, a qual configura o estágio de atuação no sistema, visto que o fio recupera sua forma original e, portanto, gera deslocamento. O resfriamento é por convecção natural e pode induzir à fase martensita maclada ou não-maclada, dependendo do nível de tensão exercido pela mola (figura II-17).

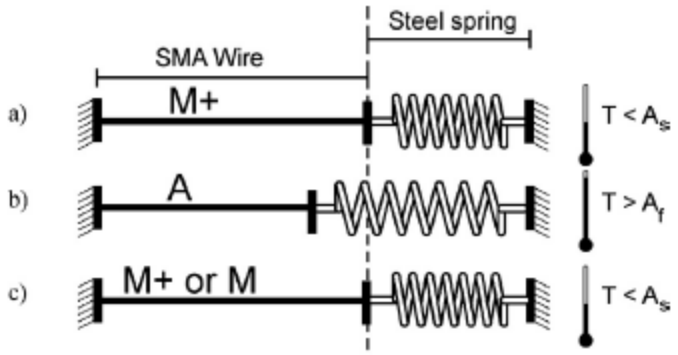


Figura II-17: Figura esquemática do experimento (MONTEIRO *et al.,* 2013)

O estudo explorou o processo de aquecimento para verificar a influência da transferência de calor ao sistema. Basicamente, observou a resposta da temperatura ao aumento gradativo da voltagem, o que possibilitou calcular a taxa de aquecimento, conforme mostra a figura II-18. Na sequencia, os autores conduziram diversos testes para determinar seu impacto na performance do atuador. Os resultados para as curvas de tensão-deformação sob diferentes valores de taxas de transferência de calor não apresentaram diferença relevante. Contudo, verificou-se que apesar da área total das curvas de tensão-deformação permanecer constante, significando que há pequena variação na energia de deformação para diferentes carregamentos, os comportamentos para tensão e deformação são afetados pela a taxa de aquecimento, como mostra a figura II-19.

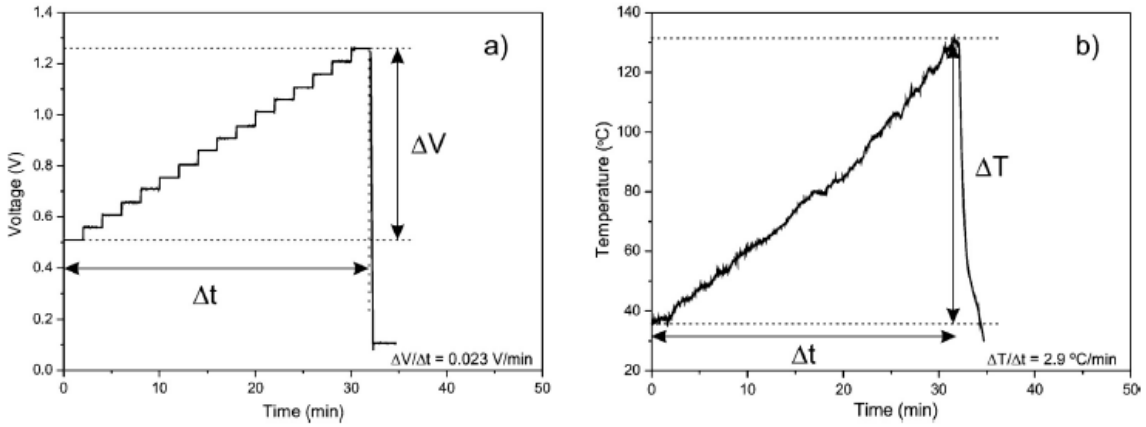


Figura II-18: Processo de aquecimento: (a) Aplicação de voltagem e (b) resposta da temperatura (MONTEIRO *et al*., 2013)

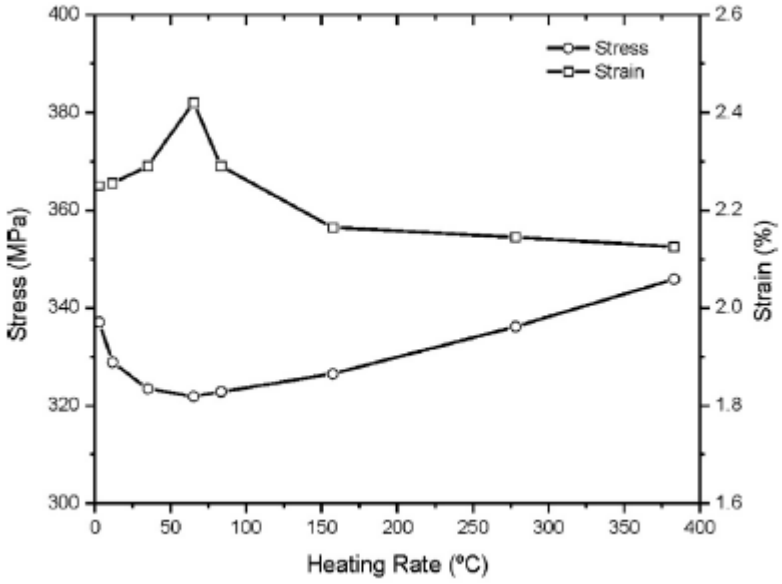


Figura II-19: Tensão e deformação em função da taxa de transferência de calor (MONTEIRO *et al.,* 2013)

A figura II-20 mostra que quando a deformação alcança seu valor máximo de 2,42%, ou 2,42 mm de deslocamento, o valor de tensão é o mínimo, o equivalente a 321 MPa ou 735 N de força. Estes valores correspondem a uma taxa de aquecimento em torno de 65°C/min, o que a caracteriza como ideal para maximizar o deslocamento do atuador, embora a força produzida seja reduzida. Para medir o segundo aspecto do estudo, isto é, a quantidade de energia associada ao processo de atuação, optou-se pela densidade de energia de deformação, que é calculada através da integração da curva de tensão-deformação obtida no experimento durante o processo de aquecimento. Alguns gráficos em função da temperatura confirmaram que a temperatura de 65°C como de início para transformação de fase. Na sequencia, os autores avaliaram a eficiência do atuador através da relação entre a energia térmica suportada e a energia de deformação gerada em função da taxa de aquecimento. Os resultados também convergiram com a análise experimental já mencionada, destacando uma taxa máxima de 65°C/min, conforme mostra a figura II-20.

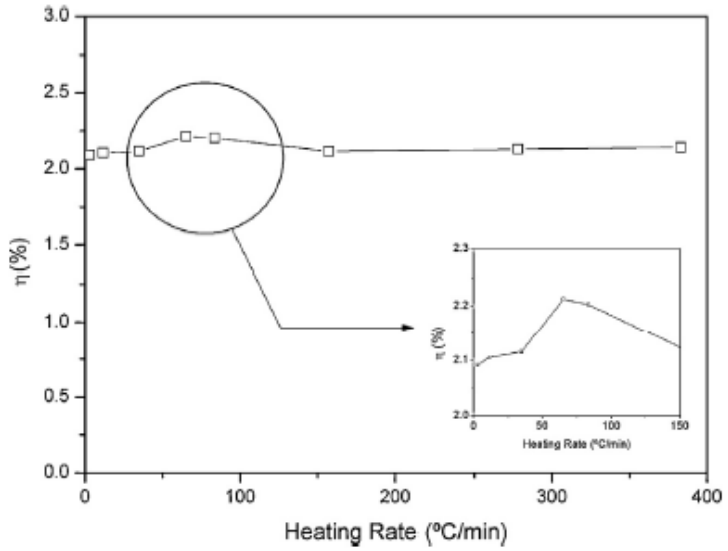
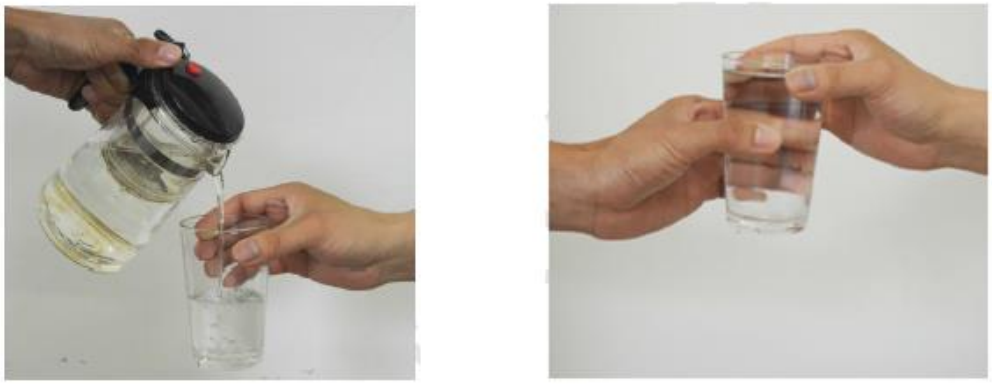


Figura II-20: Eficiência do atuador de MONTEIRO *et al.* (2013)

Motivados pelo aumento crescente da demanda por próteses no mercado, GAO *et al.* (2014) desenvolveram um atuador híbrido para a prótese de mãos, com objetivo de melhorar a força de travamento exercida por elas quando há uma perturbação no meio externo, evitando assim deslizamentos de objetos durante o funcionamento (figura II-21). Um motor de corrente contínua foi empregado para produzir os deslocamentos necessários, por apresentar uma boa relação força-peso, além de serem comumente utilizados pelos pesquisadores no desenvolvimento de próteses em geral. O desafio estava então em reduzir o volume e peso do

sistema de controle desse tipo de motor, e os autores optaram por integrar um atuador SMA ao atuador por motor para aumentar também a taxa de força produzida no reflexo das mãos.



(a) Movimento de colocar água em um copo travado

(b) Movimento de passar um copo

Figura II-21: Reflexo de tavamento da mão humana por GAO *et al.* (2014)

A figura II-22 apresenta um desenho esquemático do atuador híbrido de GAO *et al.* (2014), após testes experimentais para verificação de tensão, temperaturas de transformação de fases, deformação máxima e voltagem para aquecimento e, portanto, recuperação da forma. O atuador de motor compreende um motor de corrente contínua, uma polia e um par de engrenagens helicoidais que, por sua vez, tem como objetivos: segurar os objetos quando o motor não funcionar; e prevenir que o motor trabalhe com rotação reversa quando a força produzida pelo atuador SMA for maior que a do atuador de motor. Quando este rotaciona no sentido horário, a corda é ajustada na polia e a prótese flexiona. Já o atuador SMA consiste de uma polia 6, dois fios SMA e uma barra de oscilação fixos à polia 6, e uma polia 5 fixa na barra de oscilação. O fio SMA 1 é aquecido pelo motor e se contrai, e então a barra rotaciona no sentido anti-horário. O fio SMA 2 é então acionado da mesma forma e se contrai, o que provoca a rotação da barra agora no sentido horário. Dois blocos de polias são utilizados para melhorar a deformação dos fios, visto que o espaço é limitado. A fim de reduzir a liberação do fio e, portanto, restringir o movimento, os fios são fixados ainda a dois parafusos que giram reduzindo o comprimento dos fios.

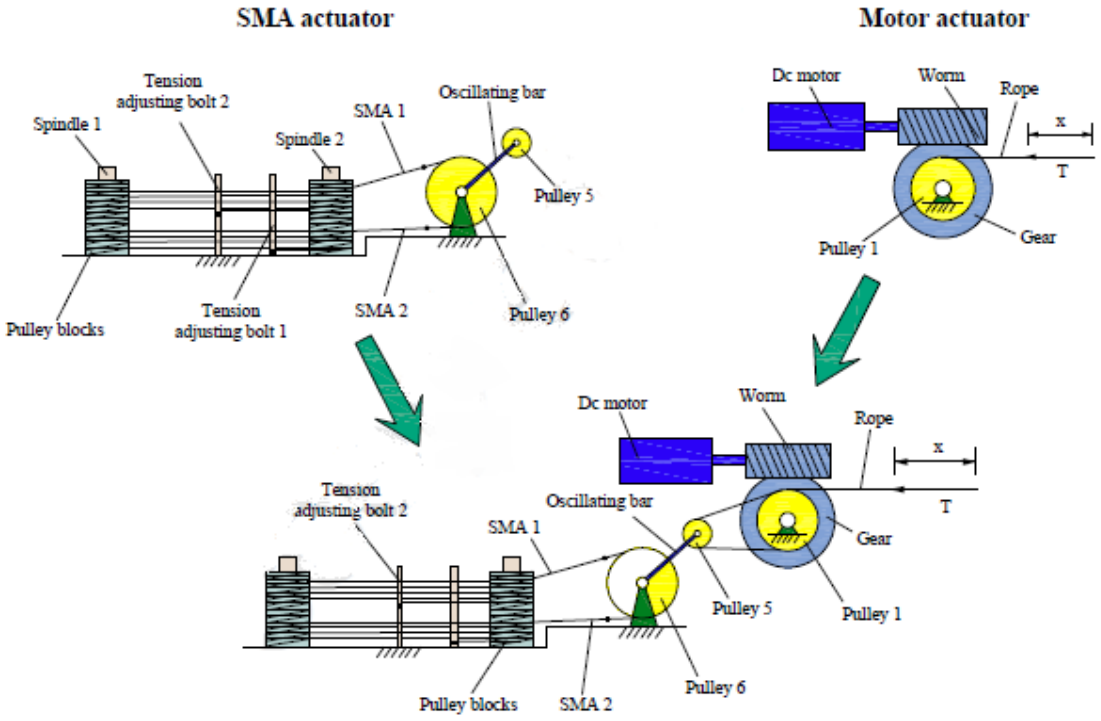


Figura II-22: Atuador híbrido proposto por GAO *et al.* (2014)

Com o uso combinado de dois atuadores, obtêm-se vantagens correspondentes de cada tipo e se complementam para minimizar as limitações existentes no âmbito da robótica. O atuador de motor realiza os deslocamentos para as iniciativas de movimento e, principalmente, a força de trava que mantém os objetos seguros, pois neste objetivo o fator velocidade não é relevante. Neste contexto, o atuador SMA tem a funcionalidade de acelerar a taxa de força e evitar que os objetos deslizem. A figura II-23 mostra o protótipo do modelo de GAO *et al.* (2014).

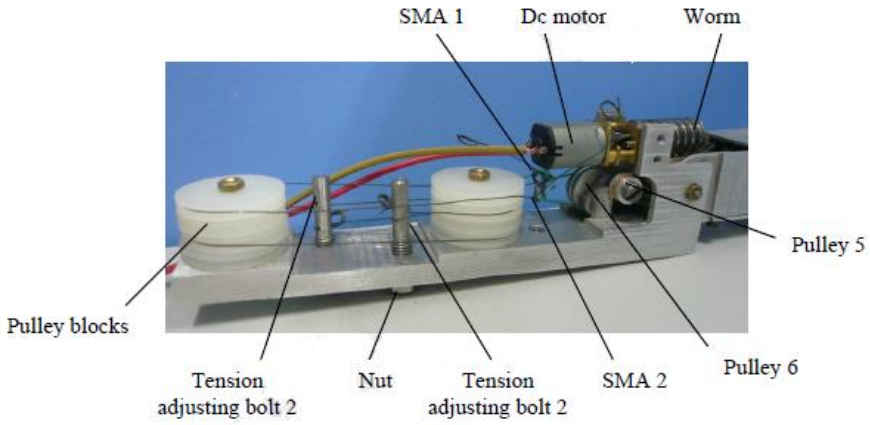


Figura II-23: protótipo do modelo de GAO *et al.* (2014)

Nesta seção, foi realizada uma revisão na literatura para entender as motivações das principais pesquisas publicadas sobre atuadores e seus objetivos. Em linhas gerais, todos os autores têm em comum a busca contínua pela inovação como forma de melhorar o desempenho de padrões estabelecidos, visto que, dentre tantos parâmetros em projetos, esses são os mais criteriosos para qualificação dos mesmos, o que significa viabilidade técnica. Já a contribuição deste trabalho está diretamente relacionada com a redução de custos associados na fase de concepção dos dispositivos, ao investigar e consolidar as principais variáveis das soluções de *design* com as quais pode se deparar, de forma a otimizar tempo de desenvolvimento, bem como de aplicação das ligas com memória de forma em projetos de atuadores e, portanto, favorecendo a sinergia necessária da viabilidade técnico-econômica.

Não foi levado em consideração se os modelos citados atingiram seus propósitos declarados inicialmente nas pesquisas, ou mesmo se encontraram aplicação no mercado ou não. Mas ficou claro que as ligas com memória de forma têm alto potencial na forma de atuadores e os resultados obtidos experimentalmente evidenciaram que são correspondentes às necessidades atuais por produtos menos volumosos, mais leves e silenciosos.

Sabe-se ainda que as SMAs possuem alguns pontos frágeis, mas que devem ser conhecidos e dimensionados para o sucesso do projeto. A taxa de deformação e, por conseguinte, as faixas de temperaturas, que devem ser respeitadas, a fim de se preservar as propriedades termomecânicas são um exemplo. Ou ainda, a depender do tipo de atuador e objetivo, a velocidade de aquecimento do material para conversão em energia mecânica pode não ser rápida o suficiente, tampouco a de resfriamento, mas existem soluções disponíveis que, se combinadas, podem controlar essas condições do material, ou até mesmo melhorá-las.

Em resumo, em meios a tantas configurações de atuadores e combinações de recursos com o único objetivo de torná-lo mais eficiente para uma determinada aplicação, faz-se necessário o entendimento detalhado das ligas com memória de forma e suas propriedades, além de um trabalho que consolide as melhores práticas de atuadores desenvolvidos recentemente, o que apoia o objetivo principal desta pesquisa.

III. Fundamentação Teórica

As propriedades das SMAs são conhecidas desde a década de 30 e foi observado primeiro em amostras de ouro-cádmio em 1932, depois no bronze (cobre-zinco) em 1938. No entanto, somente a partir de 1963 é que as SMAs começaram a despertar interesse tecnológico. Neste período, Buehler e colaboradores do *U.S. Naval Ordnance Laboratory* (NOL), descobriram o efeito de memória de forma numa liga equiatômica de Ni-Ti que passou a ser conhecida como Nitinol, termo este cunhado como uma alusão às iniciais do laboratório. A descoberta do Nitinol se tornou alvo de muitas pesquisas desde então, que buscam investigar os efeitos associados quanto à composição e análise microestrutural, difundindo suas aplicações em diversos campos da ciência, indústrias as engenharias (RIAGUSOFF, 2012).

As ligas a base de NiTi são as mais utilizadas em aplicações comerciais por combinar as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas, além de apresentar biocompatibilidade. O Nitinol pode ser usado em dispositivos de alto desempenho com deformações recuperáveis na faixa de 6%, ao passo que a liga CuZnAl apresenta deformações recuperáveis de aproximadamente 2%, por exemplo (LAGOUDAS, 2008).

Neste contexto, o fenômeno de transformações de fase é o responsável pelas propriedades das SMAs. Estas transformações são processos orientados, envolvendo fases sólidas que ocorrem a velocidades muito elevadas. Atribui-se a causa dessas transformações à diferença de energia livre entre as estruturas constituintes envolvidas no processo, o que induz modificações nas ligas químicas, tornando as transformações de fase de caráter essencialmente cristalográfico (PAIVA et al., 2003).

Para que se possa entender como ocorre o fenômeno de memória de forma, torna-se necessário observar a estrutura cristalina das ligas com memória de forma, visto que todas as ligas com memória de forma possuem pelo menos duas fases ou estruturas cristalinas bastante distintas. Essas fases dependem da temperatura e da tensão a que as ligas SMA são submetidas (LA CAVA *et al*., 1999).

Basicamente, as ligas com memória de forma apresentam duas fases cristalográficas: a austenita (A) e a martensita (M). As transformações de fase ocorrem da fase austenítica, no estado livre de tensões e altas temperaturas, para as diversas variantes da fase martensítica estáveis a baixas temperaturas. A transformação martensítica que ocorre nas ligas com memória de forma produz uma martensita termoelástica e pode apresentar até vinte e quatro variantes e sua estrutura depende do tipo de transformação sofrida pelo material (AGUIAR, 2013; PAIVA *et al.*, 2003).

Isso ocorre porque as arestas da estrutura da martensita indicadas por a, b, e c, são todas de comprimentos diferentes (figura III-1), o que caracteriza sua estrutura cristalina como monoclínica. Quando a tensão é aplicada à estrutura cristalina, estas arestas têm o comprimento alterado para compensar o aumento da tensão. O ângulo indicado por γ pode também ser alterado em função da carga aplicada. Devido à variação destes parâmetros da rede cristalina, as ligas com memória de forma podem ser facilmente deformadas quando se encontram na fase martensítica, o que a torna a fase cristalográfica responsável pela deformação. Contudo, e devido à sua alta ductibilidade, as ligações moleculares não são quebradas, o que torna o processo reversível e o elemento SMA pode recuperar sua forma anterior quando aquecido e retorna à fase austenítica (LA CAVA *et al*., 1999).

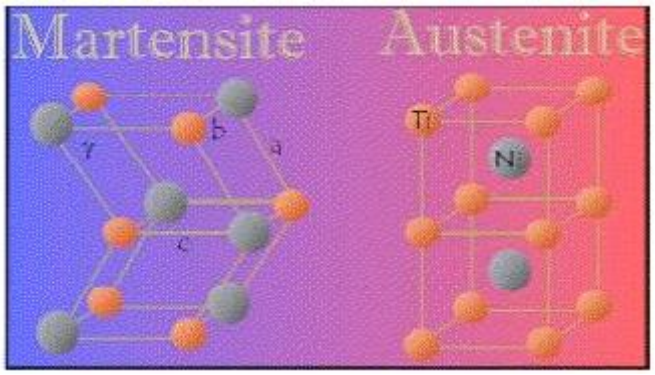


Figura III-1: Estrutura cristalina das fases martensita e austenita das ligas com memória de forma (LA CAVA *et al.*, 1999)

A transformação não ocorre a uma única temperatura, e sim numa faixa de temperatura que varia de acordo com a composição química de cada liga e que são normalmente obtidas experimentalmente utilizando um calorímetro DSC (do inglês *Differential Scanning Calorimeter*), o qual apresenta a evolução do fluxo de calor em função da temperatura.

A partir do termograma da figura III-2 para uma liga de Nitinol, é possível verificar quatro temperaturas bem definidas com relação às transformações de fase, são elas: a temperatura inicial de formação da martensita M_S, a temperatura final de formação de martensita M_f, a temperatura de inicio de formação da austenita A_s e, por fim, a temperatura que corresponde à temperatura final para formação da fase austenita A_f (AGUIAR, 2011).

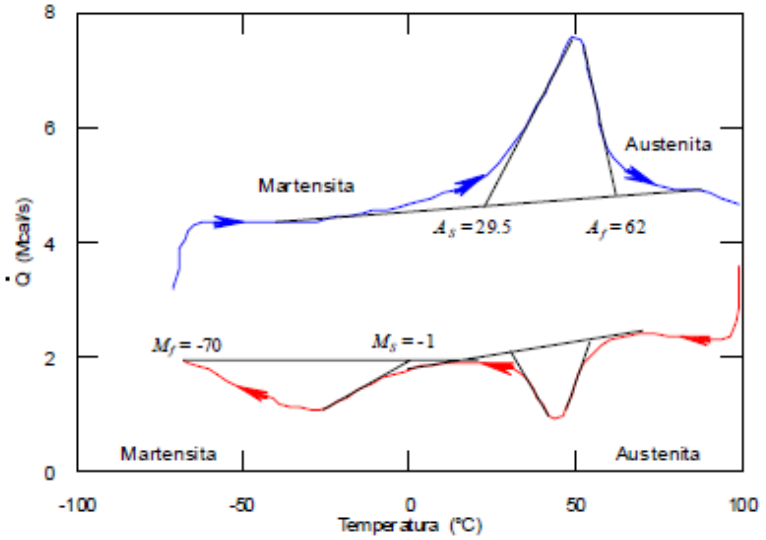


Figura III-2: Termograma para uma liga Nitinol (SHAW & KYRIAKIDES, 1995 *apud* AGUIAR, 2011)

Assim, grande parcela da transformação ocorre sobre uma faixa relativamente estreita de temperatura, embora o início e o fim da transformação nas etapas de aquecimento e resfriamento na verdade se estendem sobre uma faixa muito maior de temperatura.

A figura III-3 mostra que a reversão de sentido entre as fases cria um ciclo de histerese, indicando que as transformações que ocorrem durante o aquecimento e o resfriamento não coincidem, e que também pode ser entendida como a tendência do material em conservar suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou. Esta histerese de transformação também varia com cada sistema de liga (LA CAVA *et al*., 1999; REGO, 2013).

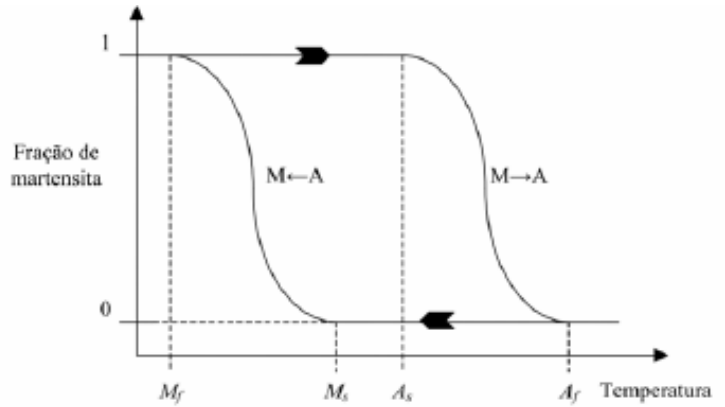


Figura III-3: Comportamento termoelástico da SMA (LA CAVA *et al*., 1999)

Neste capítulo são apresentadas as características principais das ligas com memória de forma, as quais são foco de inúmeras pesquisas nos últimos anos por possibilitarem o

desenvolvimento de sistemas e estruturas inteligentes com maiores níves de eficiência e menores custos associados.

O termo memória de forma é dado ao grupo de materiais metálicos que possuem a habilidade de retornar a uma forma previamente definida quando submetidos a um procedimento termomecânico apropriado. Existe uma variedade de ligas, contudo poucas despertam interesse comercial que, por sua vez, está relacionado à capacidade de recuperação substancial da deformação ou de produzir força. As ligas de NiTi (ou Nitinol, como alusão às iniciais do laboratório em que foi descoberta na década de 60) são as mais utilizadas em aplicações comerciais porque combinam as propriedades associadas às ligas com memória de forma com boas propriedades mecânicas. Apresentam deformações recuperáveis na faixa de 6%, experimentam comportamentos de efeito de memória de forma e pseudoelásico, além de apresentarem resistência à corrosão e biocompatibilidade (OLIVEIRA, 2008).

A austenita é estável a altas temperaturas e livre de tensões, e apresenta apenas uma variante simples com uma estrutura de cúbica de corpo centrado. Já a segunda é estável a baixas temperaturas, e pode ser induzida por temperatura ou por tensão (OLIVEIRA, 2008).

Quando induzida por temperatura, a martensita é maclada (ou do inglês, *twinned*). Esta não apresenta alteração na forma, somente em nível microscópico, onde se verifica a "autoacomodação" de até vinte e quatro variantes que, por sua vez, apresentam orientações cristalográficas de igual número. Quando submetidas a uma tensão, essas variantes tornam-se apenas uma com a orientação cristalográfica alinhada com a da tensão. Esta variante é a martensita não-maclada, ou do inglês *detwinned* (LAGOUDAS, 2008).

Portanto, a transformação da fase martensítica é o que justifica a recuperação da forma que ocorre nas ligas com memória de forma, porque exibe uma estrutura cristalina monoclínica e dúctil. Embora haja uma alteração em um dos ângulos da estrutura para compensar a tensão aplicada, não há quebra das ligações moleculares, o que possibilita a recuperação à forma original. Assim, a existência de duas estruturas cristalográficas é a base para uma transformação de fase sólido-sólido reversível (OLIVEIRA, 2008).

Existem quatro temperaturas que definem os domínios de cada fase e são em função de temperatura, tensão, composição do material e tratamento termomecânico. Uma mistura austenita-martensita também é possível no intervalo de temperatura entre A_f e M_f. Em geral, A_f e M_f dependem da composição do material bem como do tratamento termomecânico, e as temperaturas também são influenciadas pelo nível de tensão a que o corpo está submetido (OLIVEIRA, 2008).

As transformações de fase constituem a base para o entendimento dos aspectos fenomenológicos das ligas de memória de forma. Elas podem ser induzidas por temperatura,

tensões, ou ainda pela combinação de ambos. A seguir, apresenta-se uma descrição dos três fenômenos fundamentais (LAGOUDAS, 2008).

Tomando-se uma amostra de SMA na fase martensítica sem tensões mecânicas (ponto D) e aquecendo-a (figura III-4), observa-se uma transformação gradual para a fase austenítica (trecho AB) até à temperatura $T=A_f$, acima da qual a austenita é estável. Diminuindo-se a temperatura a partir do ponto B (trecho BC) e quando $T=M_S$, observa-se uma transformação de fase inversa, isto é, da fase austenita para martensita e que persiste até que M_f (ponto D) seja alcançada. Esta é a transformação de fase por variação da temperatura (LAGOUDAS, 2008).

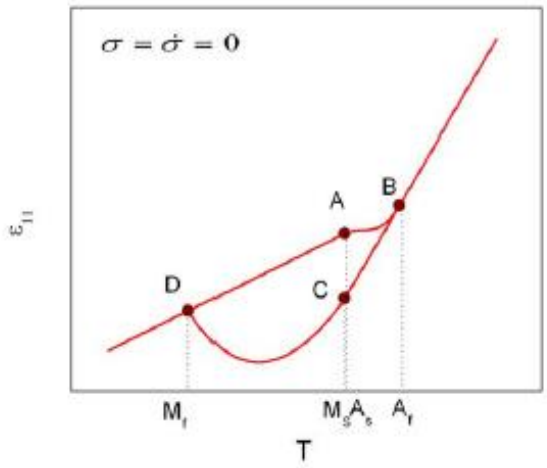


Figura III-4: Transformação de fase devido à variação de temperatura (OLIVEIRA, 2008)

Considere agora uma amostra com $T>A_f$ e submetida a um campo de tensão uniaxial (Figura III-5). Nesta situação, a fase austenítica é estável. Assim, com a aplicação de um carregamento mecânico, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada e ocorre a transformação de fase austenita para martensita não-maclada ou *detwinned* (M+). Nesta etapa, a fase martensita não-maclada constitui-se de somente uma variável induzida pela tensão. Ao descarregar o sistema, o material sofre uma transformação inversa para A_f, visto que a fase martensítica é instável em $T>A_f$. Esse comportamento do material é chamado de efeito pseudoelástico (LAGOUDAS, 2008; PAIVA *et al.,* 2003).

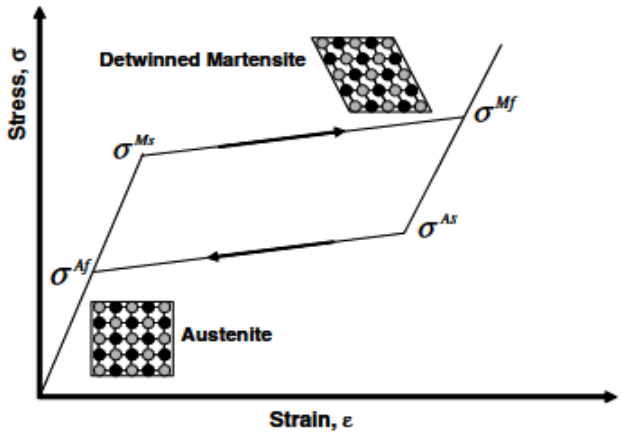


Figura III-5: Efeito Pseudoelástico (LAGOUDAS, 2008)

Considere agora uma amostra de SMA resfriada com $T<M_f$, na qual a fase martensítica é estável. Com a aplicação de um carregamento mecânico, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada, e então se dá início a uma transformação para a fase martensita não-maclada (martensita associada à tração, M+). No descarregamento, não há nova conversão de variantes cristalográficas, ou seja, a fase martensita não-maclada se mantém havendo apenas uma recuperação elástica. A deformação residual resultante é recuperada através do aquecimento da amostra acima de A_f, visto que nessa faixa de temperatura a amostra assume a sua geometria inicial, apresentando assim o efeito de memória de forma (Figura III-6) (LAGOUDAS, 2008; PAIVA *et al.,* 2003; PEREIRA, 2009).

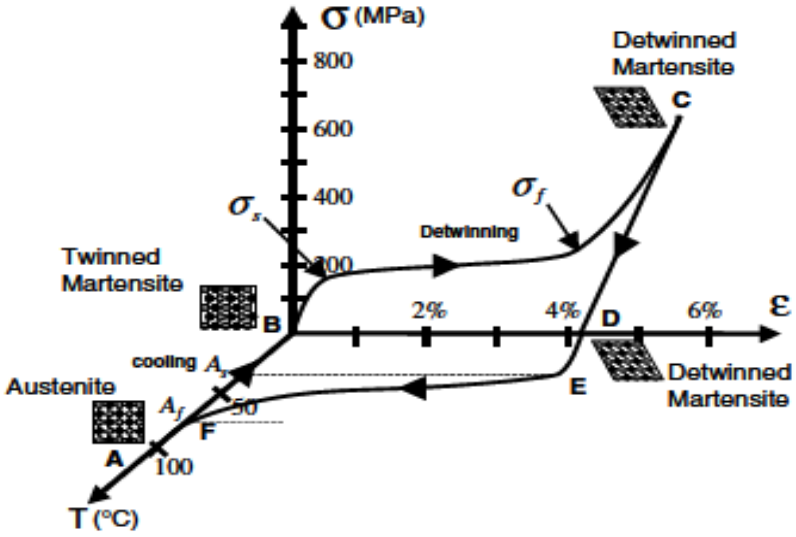


Figura III-6: Efeito Memória de Forma (LAGOUDAS, 2008)

Quando o efeito memória de forma se manifesta apenas durante o aquecimento, diz-se tratar de memória de forma não reversível SME (do inglês, *One way Shape Memory Effect*). Contudo, se este mesmo efeito se manifestar também durante o resfriamento, o mesmo passa a chamar-se efeito de memória de forma reversível (do inglês, *Two Way Shape Memory Effect*). Este efeito pode ser obtido após a liga SMA ser submetida a um processo de treinamento termomecânico que permite associar uma forma a cada fase em função da variação de temperatura, após induzir, através de carregamentos e número de ciclos elevados, mudanças na microestrutura que, por sua vez, causam mudanças permanentes e macroscópicas no comportamento do material (LAGOUDAS, 2008).

Outro efeito similar ao efeito de memória de forma reversível é o efeito de memória de forma com tensão assistida, pois também é ativado através de ciclos de aquecimento e resfriamento. Todavia, não há necessidade de treinamento da liga, pois uma tensão é acrescentada ao sistema para atuar como força restituidora e provocar a deformação do material durante os ciclos térmicos (BO and LAGOUDAS, 1999; WADA and LIU, 2005; LAGOUDAS, 2008; MONTEIRO et al. 2013; MONTEIRO et al., 2016).

IV. Modelagem constitutiva

A modelagem do comportamento das SMAs pode ser feita dentro do escopo dos materiais padrão generalizado. Neste contexto, o comportamento termomecânico pode ser descrito a partir da energia livre de Helmholtz, Ψ, e do pseudo-potential de dissipação, φ. Desta forma, o estado termodinâmico é completamente definido por um número finito de variáveis de estado (BAÊTA-NEVES *et al.*, 2004; PAIVA *et al*., 2005).

Em 1996, Fremond propôs um modelo tridimensional para verificação do comportamento termomecânico das SMAs, considerando as frações volumétricas de duas variantes da martensita, M+ e M-, ambas induzidas por tração e compressão, respectivamente. O modelo apresentou ainda restrições para coexistência das três fases: Martensita induzida por Tensão (M+), Martensita induzida por Compressão (M-) e Austenita (A) (SAVI *et al.*, 2002; BAÊTA-NEVES *et al.,* 2004; PAIVA *et al.*, 2005).

Em 2002, SAVI *et al.* apresentaram um modelo constitutivo baseado no modelo de Freemond com o objetivo de contribuir para uma melhor descrição do comportamento termomecânico das SMAs. Uma das inovações estava na inclusão de uma terceira fração volumétrica referente à martensita maclada (M), induzida por variação da temperatura, o que permitiu também a descrição da fase estável quando o material está à baixa temperatura e na ausência de carregamento. Expansão térmica e deformação plástica também foram consideradas na nova formulação. Além disso, o efeito de endurecimento foi representado por uma combinação de comportamentos cinemáticos e isotrópicos (SAVI *et al.*, 2002).

Mais tarde, BAÊTA-NEVES *et al*. (2004) revisitaram o modelo e acrescentaram o enlargamento horizontal da histerese de tensão-deformação. Os modelos disponíveis consideravam que a largura horizontal do laço de histerese para tensão-deformação era proporcional à vertical, o que gerava discrepâncias em relação aos resultados experimentais. A correção da formulação considerando esse novo parâmetro contribuiu para uma melhor descrição do comportamento termomecânico das SMAs (PAIVA *et al.,* 2006).

Resultados experimentais demonstraram ainda que as ligas com memória de forma apresentam um comportamento assimétrico quando submetidas a carregamentos de tensão ou compressão. Quando deformadas por compressão, por exemplo, apresenta menor recuperação da deformação, tensão crítica de transformação de fase elevada e, portanto, uma histerese diferenciada. Segundo os mesmos estudos, esse comportamento assimétrico tem origem na assimetria de cada cristal da liga, a qual favorece a deformação do material (GALL *et al.,* 1999; PAIVA *et al.,* 2005; PAIVA *et al.,* 2006).

Neste contexto, PAIVA *et al*. (2005) identificaram a oportunidade de aprimorar o modelo acrescentando o fator de assimetria de tensão-deformação à formulação, com o objetivo de obter dados numéricos tão apurados quantos os experimentais e, consequentemente, melhor descrever o comportamento termomecânico das SMAs. Além da deformação (ε) e temperatura (*T*), o modelo considera as frações volumétricas das fases macroscópicas como variáveis internas. Basicamente, β_1 e β_2, associadas à martesita não-maclada, induzida por tração e compressão, respectivamente, e a austenita como β_3. A quarta variante martensitica está relacionada com a martensita maclada e esta fração volumétrica é inserida na formulação como β_4. Da restrição referente à coexistência das quatro fases, $\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 + \beta_4 = 1$, é possível usar a condição $\beta_4 = 1 - \beta_1 - \beta_2 - \beta_3$ a fim de definir uma densidade de energia livre em termos de somente três variáveis (figura IV-1).

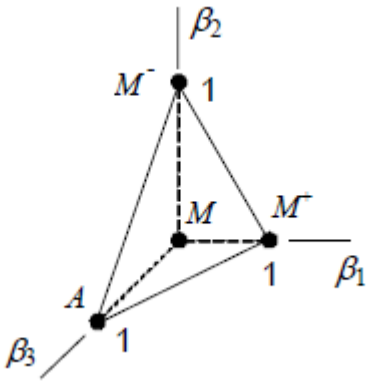


Figura IV-1: Representação geométrica da restrição para coexistência das fases (PAIVA *et al.,* 2005)

Considerando essas premissas, o presente estudo utiliza o modelo constitutivo de SAVI *et al.* (2005), por ser capaz de descrever diversos fenômenos complexos que ocorrem com as SMAs. Contudo, desconsidera as parcelas referentes à plasticidade e assimetria de tensão-deformação para simplificação das simulações numéricas. Em resumo, o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma é descrito a partir do seguinte conjunto de equações:

$$\sigma = E\varepsilon + (\alpha + E\alpha_h)(\beta_2 - \beta_1) - \Omega(T - T_0) \qquad (1)$$

$$\dot{\beta}_1 = \frac{1}{\eta_1}\{\alpha\varepsilon + \Lambda_1(T) + (2\alpha_h\alpha + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) + \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_1}J_\pi\} + \partial_{\dot{\beta}_1}J_\chi \quad (2)$$

$$\dot{\beta}_2 = \frac{1}{\eta_2}\{-\alpha\varepsilon + \Lambda_2(T) - (2\alpha_h\alpha + E\alpha_h^2)(\beta_2 - \beta_1) - \alpha_h[E\varepsilon - \Omega(T - T_0)] - \partial_{\beta_2}J_\pi\} + \partial_{\dot{\beta}_2}J_\chi \quad (3)$$

$$\dot{\beta}_3 = \frac{1}{\eta_3}\left\{-\frac{1}{2}(E_A - E_M)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)]^2 + \Lambda_3(T) + (\Omega_A - \Omega_M)(T - T_0)[\varepsilon + \alpha_h(\beta_2 - \beta_1)] - \partial_{\beta_3}J_\pi\right\} + \partial_{\dot{\beta}_3}J_\chi \quad (4)$$

Onde σ é a tensão e T_0 a temperatura de referência. Diferentes propriedades do material são consideradas para cada fase e, portanto, os subscritos A and M são empregados na formulação para representar austenita e martensita, respectivamente. O módulo de elasticidade é dado por $E = E_M + \beta_3(E_A - E_M)$, e $\Omega = \Omega_M + \beta_3(\Omega_A - \Omega_M)$ representa o coeficiente de expansão térmica. Os parâmetros η_1, η_2 e η_3 estão associados à dissipação interna de cada fase do material. O termo α_h define a largura horizontal do laço de histerese para tensão-deformação, enquanto que o parâmetro α controla a altura do mesmo laço de histerese. A função indicatriz J_π é relacionada ao conjunto convexo π que pode ser interpretado geometricamente por um tetraedro no espaço (figura IV-1). Já o termo J_χé uma função indicatriz do conjunto convexo χ, que define as restrições associadas com a evolução das fases, isto é, considerando a história do carregamento para $\dot{\sigma} \neq 0$. Fisicamente, a função indicatriz relata as restrições para os sub-laços internos devidos às transformações de fases incompletas e também para a formação da martensita maclada (M). $\Lambda_1(T) = \Lambda_2(T) = \Lambda(T)$ e $\Lambda_3(T)$ são funções escalares da temperatura que definem o nível de tensão da transformação da fase e são definidas da seguinte forma (SAVI *et al.*, 2002; OLIVEIRA, 2008):

$$\Lambda = \begin{cases} -L_0 + \dfrac{L}{T_M}(T - T_M), & \text{if } T > T_M \\ -L_0\,, & \text{if } T \leq T_M \end{cases} \tag{5}$$

$$\Lambda_3 = \begin{cases} -L_0^A + \dfrac{L_A}{T_M}(T - T_M), & \text{if} T > T_M \\ -L_0^A\,, & \text{if} T \leq T_M \end{cases} \tag{6}$$

onde T_M é a temperatura abaixo da qual a fase martensítica se torna estável para um estado livre de tensões. Os parâmetros $L_0, L,\ L_0^A$ e L_A, são relacionados com as tensões críticas nas transformações de fases.

Para lidar com as não linearidades existentes na formulação do problema, a solução do conjunto de equações constitutivas, representadas pelas equações de (1) a (4), é resolvida empregando a técnica de partição do operador (ORTIZ et al., 1983) em conjunto com um procedimento iterativo.

V. Metodologia

V.1 Procedimento Numérico

O modelo constitutivo apresentado foi implementado por BANDEIRA et al. (2006) como uma sub-rotina UMAT (do inglês, User Material Routine) para ser usado em conjunto com o programa de elementos finitos ABAQUS. Esta ferramenta permite adicionar modelos constitutivos de diferentes materiais ao software de elementos finitos.

Conforme explicado por PAULA REIS (2014), a UMAT é solicitada para cada ponto de integração do material em cada iteração de todos os incrementos da análise mecânica. A sub-rotina fornece as informações no início do incremento, como tensão, deformação, temperatura e variáveis de estado (frações volumétricas) além dos incrementos de temperatura, deformação e tempo. Esta sub-rotina também fornece a definição da tensão e variáveis de estado mostradas nas equações (1) e (4). Adicionalmente à atualização dos valores das tensões e variáveis de estado para seus valores ao fim de cada incremento no tempo, deve-se fornecer à subrotina UMAT a matriz do Jacobiano do material, $\partial\Delta\sigma/\partial\Delta\varepsilon$, para modelos constitutivos mecânicos. Esta matriz depende também do esquema de integração escolhido, e, embora não afete os resultados da simulação, tem uma forte influência sobre sua taxa de convergência, e, como consequência, na eficiência computacional.

V.2 Verificação do Modelo

As simulações numéricas são executadas pelo ABAQUS e consideram um elemento de treliça com dois nós, o T2D2. Este elemento é uma barra unidimensional e que permite deformação axial. Os parâmetros dos materiais foram determinados por MONTEIRO *et al.* (2013) a partir de testes experimentais utilizando um fio SMA com composição de 54.8% Ni e 45.2% Ti, 1,71 mm de diâmetro e 200 mm de comprimento. Segundo o mesmo estudo, a caracterização do fio SMA considera dois testes: DSC e de tração mecânica usando uma máquina de testes servo hidráulica (MONTEIRO *et al*., 2013).

Através de testes de DSC (do inglês, *Digital Scanning Calorimeter*) foi possível determinar as temperaturas de transformações de fases utilizando o equipamento NETZCH 200 F3 Maia. Ao definir M_s e M_f, respectivamente, como temperatura de início e fim da formação da martensita, e A_s and A_f, respectivamente, como temperatura de início e fim da formação da austenita, o teste DSC realizado forneceu os seguintes resultados: M_f = 310.5K, M_s= 329.2K, A_s= 381.4K e

A_f=400.9K. Os testes de caracterização mecânica são realizados por uma máquina de teste universal, INSTRON (Modelo 9000), com uma câmara térmica para controle da temperatura, e uma taxa de deformação prescrita de $\dot{\varepsilon} = 4\times10^{-4}\mathrm{s}^{-1}$. Uma temperatura constante de 303K, abaixo de $\mathrm{M_f}$, é adotada para condução dos testes (MONTEIRO *et al*., 2013).

Com essas premissas, os resultados experimentais são utilizados para calibrar o modelo. Os parâmetros apresentados na Tabela 1 são aplicados em todas as simulações numéricas do presente estudo, sendo o parâmetro α_h calculado pelo modelo. Considere $T_M = M_s$ (MONTEIRO *et al*., 2013).

Tabela 1: Parâmetros do modelo (MONTEIRO *et al*., 2013)

E_A (GPa)	49.4	α_h	0.046
E_M (GPa)	23	L_0 (MPa)	0.35
Ω_A (kPa/K)	740	L_0^A (MPa)	0.63
Ω_M(kPa/K)	170	α (MPa)	90
T_M (K)	329.2	η_1 (MPa.s)	4.5
L (MPa)	4.15	η_2 (MPa.s)	4.5
L^A (MPa)	4.15	η_3 (MPa.s)	4.5

A figura V-1 apresenta o resultado da simulação numérica para um ensaio de tração. A curva tensão-deformação estabelece uma comparação entre os resultados numéricos e experimentais obtidos através de uma média entre três amostras de fio de SMA, mostrando assim uma boa concordância entre os resultados. Também é apresentado um gráfico da evolução no tempo da fração volumétrica martensita maclada (β_4) para não maclada (β_1), onde o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada, e então se dá início a uma reorientação para martensita não-maclada (martensita associada à tração, β_1). Assim, a intersecção no gráfico da fração volumétrica compreende o domínio da tensão critica ($\sigma_\mathrm{s} \leq \sigma \leq \sigma_\mathrm{f}$) até que a transformação de fase esteja completa (β_1=100%).

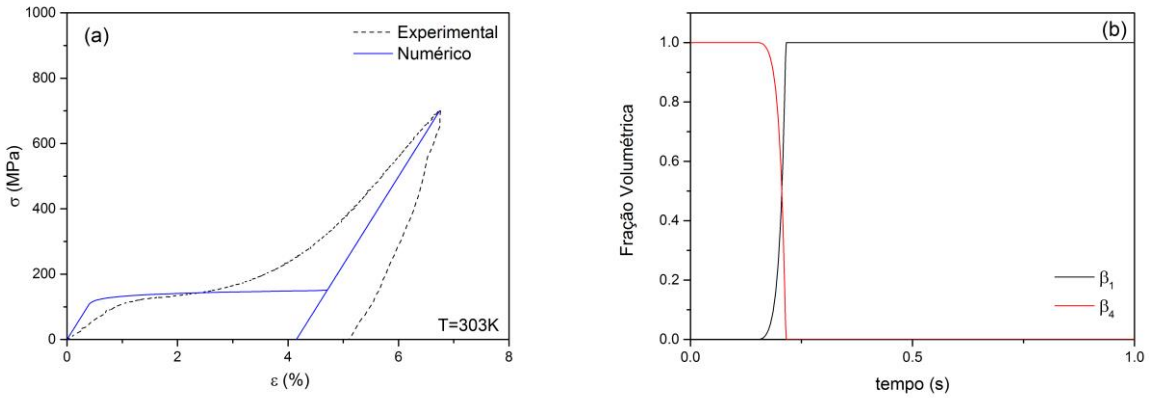


Figura V-1: Efeito memória de forma: (a) curva tensão-deformação mostrando uma comparação entre resultados numéricos e experimentais; (b) evolução da fração volumétrica da martensita (MONTEIRO *et al*., 2013)

Tendo sido o modelo verificado por MONTEIRO *et al*. (2013), diferentes configurações de atuadores são investigadas neste trabalho. Eles se diferenciam por assumirem objetivos distintos, bem como diferentes condições operacionais de funcionamento. A figura V-2 apresenta os quatro principais tipos de arranjos e que serão abordados no presente estudo. Inicialmente é explorado o comportamento de um fio de SMA submetido a cargas constantes (F: Fio). Em seguida, uma mola linear conectada a um fio de SMA (MF: Mola-Fio). Depois duas molas elásticas conectadas a um fio SMA (MFM: Mola-Fio-Mola). E, por fim, dois fios de SMA interligados por uma mola (FMF: Fio-Mola-Fio). Em todas as análises serão realizados carregamentos térmicos para ativação dos atuadores, conforme será explicado à frente.

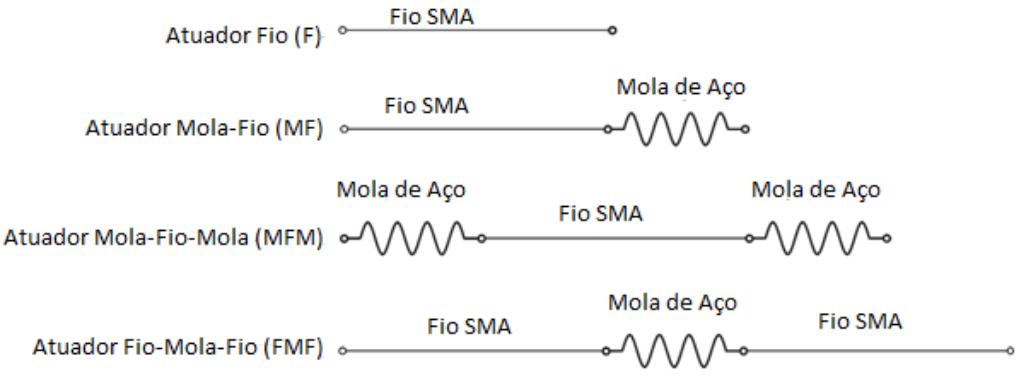


Figura V-2: Diagrama esquemático das configurações de atuador

V.3 Fio de SMA (Atuador F)

Nesta seção inicia-se o estudo da primeira configuração de atuador proposta com fio de SMA. O desenho esquemático da figura V-3 apresenta o processo termomecânico de carregamento, definindo as condições de operação do atuador em destaque. Para o atuador F, o estágio de instalação é representado pelas etapas de fixação da extremidade direita (1) e aplicação de um carregamento mecânico na extremidade esquerda (2). Já o estágio de atuação compreende o ciclo térmico de aquecimento e resfriamento.

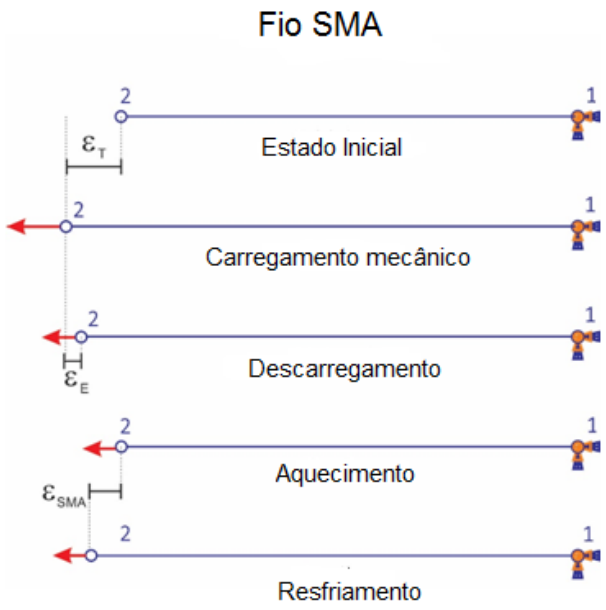


Figura V-3: Diagrama esquemático do atuador F

O carregamento de 0 a 700 MPa é aplicado e produz uma reorientação da martensita induzida por tensão (martensita não maclada, ou *detwinned*), onde ε_T representa a deformação total do material, isto é, a elástica mais a gerada pela reorientação martensítica, assegurando assim que o elemento de SMA seja submetido a um processo de transformação de fase completo. Na sequencia, o material é descarregado para diferentes valores de tensão e recupera os valores referentes à deformação elástica (ε_E). Então, sob um carregamento mecânico constante, o atuador F é submetido a um carregamento térmico prescrito, produzindo uma recuperação efetiva da deformação inelástica ε_{SMA} do atuador. Os detalhes de carregamentos termomecânicos serão mostrados em detalhes na seção VI.

V.4 Fio de SMA conectado a uma mola elástica linear (Atuador MF)

A segunda configuração de atuador proposta neste trabalho consiste em um fio de SMA conectado a uma mola elástica linear. O *design* do atuador envolve a avaliação de diferentes valores quanto à rigidez da mola. O desenho esquemático da figura V-4 apresenta o processo termomecânico de carregamento, definindo as condições de operação do atuador agora em destaque. Para o atuador MF, o estágio de instalação é representado pelas etapas de fixação da extremidade direita do fio (1) e aplicação de um carregamento mecânico, que é incrementado até o valor de 700 MPa, na extremidade esquerda (2). Na sequencia, a condição fixa da extremidade direita do fio (1) e o carregamento mecânico na outra extremidade (2) são completamente removidos. Então, a extremidade esquerda do fio é fixada (2) e o atuador é submetido ao ciclo térmico de aquecimento e resfriamento, configurando assim o seu estágio de atuação.

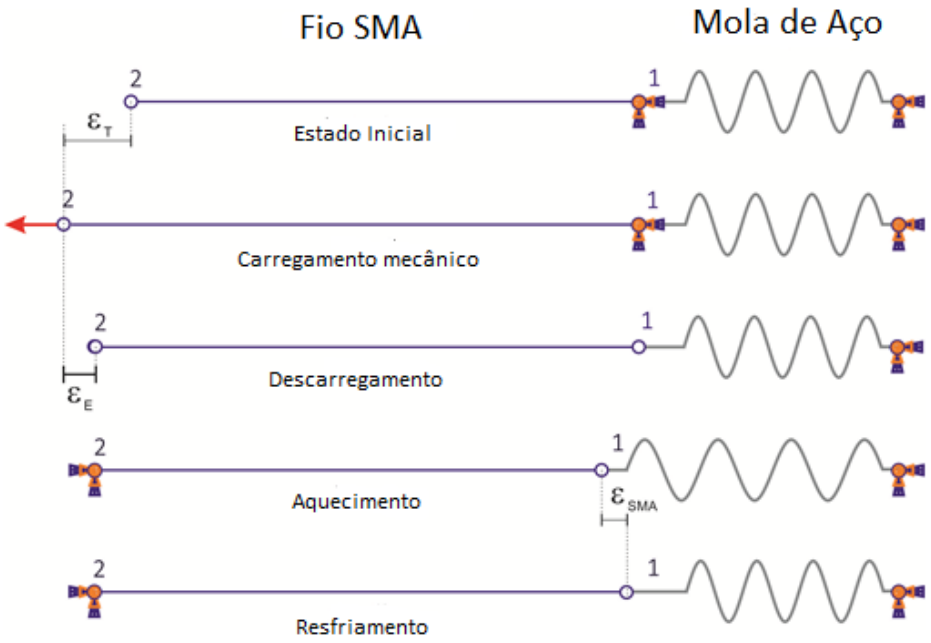


Figura V-4: Diagrama esquemático do atuador MF

O carregamento mecânico é aplicado e produz uma reorientação da martensita induzida por tensão (martensita não maclada, ou *detwinned*), onde ε_T representa a deformação total do fio, isto é, a elástica mais a gerada pela reorientação martensítica. Na sequencia, o material é totalmente descarregado e recupera inicialmente os valores referentes à deformação elástica (ε_E). Durante o estágio de atuação, o aquecimento produz uma recuperação efetiva da deformação inelástica ε_{SMA} do fio de SMA e puxa a mola, a qual desenvolve uma força de

resistência e armazena energia potencial elástica. No resfriamento, esta energia é liberada e atua como força restituidora no atuador, deformando assim o fio de SMA de volta à sua posição inicial. Nesta configuração de atuador, a constante elástica da mola é fundamental no processo de atuação e, portanto, determinante na performance do mesmo. Os detalhes de carregamentos termomecânicos com diferentes constantes de mola serão abordados na seção VI.

V.5 Duas molas elásticas lineares conectadas a um Fio de SMA (Atuador MFM)

Outra configuração de atuador agora em focoestá considerando a combinação de duas molas elásticas lineares conectadas por um fio de SMA. O desenho esquemático da figura V-5 apresenta o processo termomecânico de carregamento, definindo as condições de operação do atuador em destaque. A sequência de carregamento é conduzida da seguinte forma: inicialmente um pré-carregamento de até 700 MPa é aplicado no ponto 2 com o ponto 1 fixado, depois é feito o descarregamento e o fio SMA recupera a deformação elástica. Nesta condição, as molas ainda não estão submetidas a esforços mecânicos. Após essa etapa, as duas extremidades das molas são fixadas, e a fixação do ponto 1 é removida. O estágio de atuação tem então início com a aplicação de um ciclo térmico de aquecimento e resfriamento do fio de SMA.

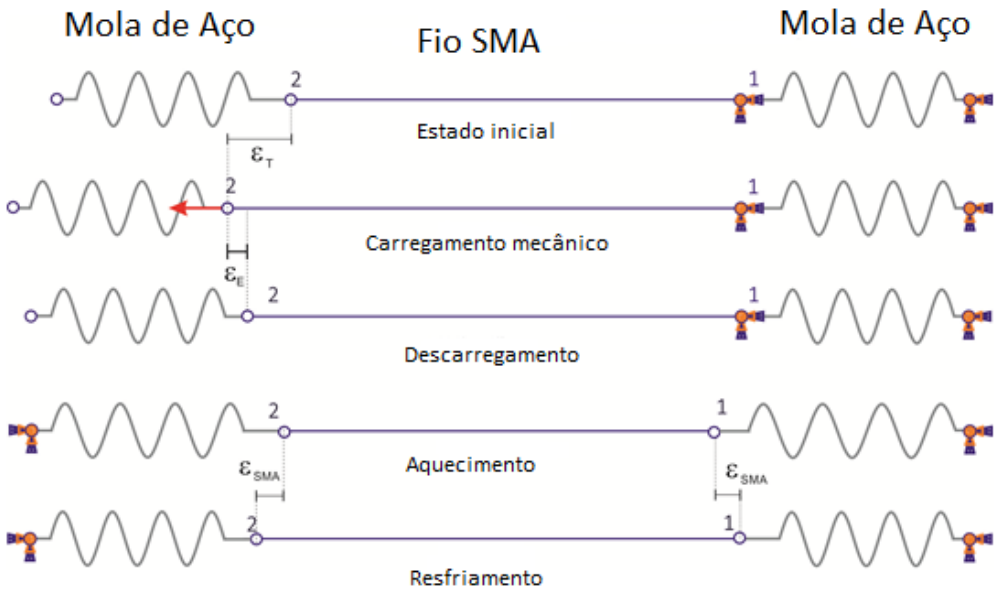


Figura V-5: Diagrama esquemático do atuador MFM

O carregamento mecânico é aplicado e produz uma reorientação da martensita induzida por tensão (martensita não maclada, ou *detwinned*), onde ε_T representa a deformação total do fio, isto é, a elástica mais a gerada pela reorientação martensítica. Na sequencia, o material é totalmente descarregado e recupera inicialmente os valores referentes à deformação elástica (ε_E). Durante o estágio de atuação, o aquecimento produz uma recuperação efetiva da deformação inelástica ε_{SMA} do fio de SMA que, por sua vez, puxa as molas, as quais se opõem à força do fio e armazenam energia potencial elástica. No resfriamento, esta energia é liberada e atua como força restituidora no atuador, deformando assim o fio de SMA de volta à sua posição inicial. Nesta configuração de atuador, a constante elástica da mola é fundamental no processo de atuação e, portanto, determinante na performance do mesmo. Os detalhes de carregamentos termomecânicos com diferentes constantes de mola serão abordados na seção VI.

V.6 Dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear (Atuador FMF)

Nesta seção aborda-se a quarta configuração de atuador proposta que consiste em dois fios de SMA conectados por uma mola elástica linear. O desenho esquemático da figura V-6 apresenta o processo termomecânico de carregamento, definindo as condições de operação do atuador em destaque. Esse atuador segue a mesma metodologia dos atuadores apresentados anteriormente, isto é, os fios são primeiramente submetidos a um pré-carregamento, instalados e, na sequencia, inicia-se o estágio de atuação com um ciclo térmico intercalado imposto no fio de SMA à esquerda e, posteriormente, no fio de SMA à direita.

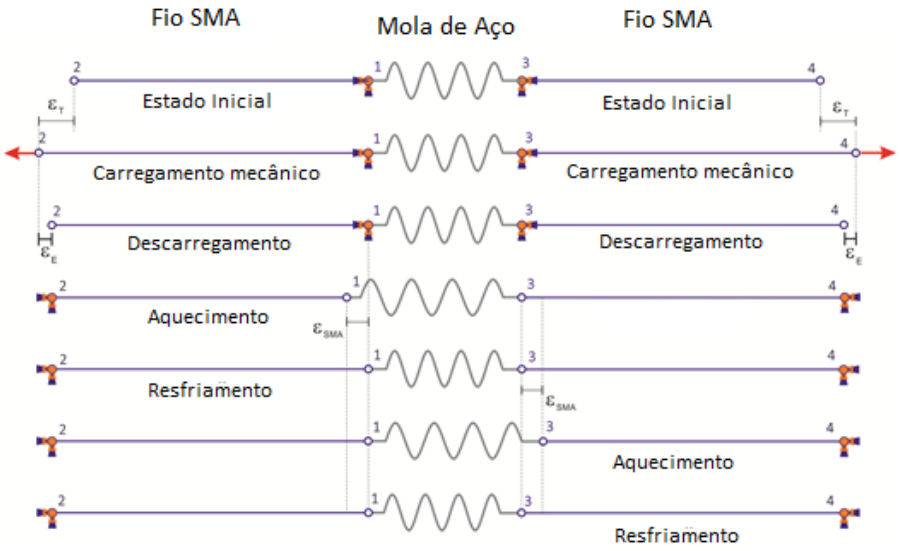


Figura V-6: Diagrama esquemático do atuador FMF

O carregamento mecânico é aplicado e produz uma reorientação da martensita induzida por tensão (martensita não maclada, ou *detwinned*), onde ε_T representa a deformação total do fio, isto é, a elástica mais a gerada pela reorientação martensítica. Na sequencia, o material é totalmente descarregado e recupera inicialmente os valores referentes à deformação elástica (ε_E). Durante o estágio de atuação no fio de SMA à esquerda, o aquecimento produz uma recuperação efetiva da deformação inelástica ε_{SMA} do fio de SMA que, por sua vez, puxa a mola, a qual se opõe à força do fio e armazena energia potencial elástica. No resfriamento, esta energia é liberada e atua como força restituidora no atuador, deformando assim o fio SMA de volta à sua posição inicial. Em seguida, o mesmo ciclo térmico ocorre no fio de SMA à direita, e espera-se um comportamento simétrico da mola. Os detalhes de carregamentos termomecânicos com diferentes constantes de mola serão abordados na seção VI.

VI. Resultados

VI.1 Fio de SMA (Atuador F)

A figura VI-1 mostra os carregamentos mecânico e térmico empregados no atuador em questão. O carregamento caracteriza-se pela aplicação de 0 a 700 MPa, e o descarregamento reduzindo para diferentes valores de tensão constantes configurando diferentes simulações que assistem à fase de atuação do atuador. Nestes casos, a atuação do elemento de SMA é contrária à força aplicada. Adicionalmente, observa-se também que o efeito de memória de forma é induzido quando o carregamento mecânico é removido (0 MPa). Importante destacar ainda que todas as simulações foram realizadas de igual forma utilizando a seguinte sequência: carregamento – descarregamento – aquecimento – resfriamento.

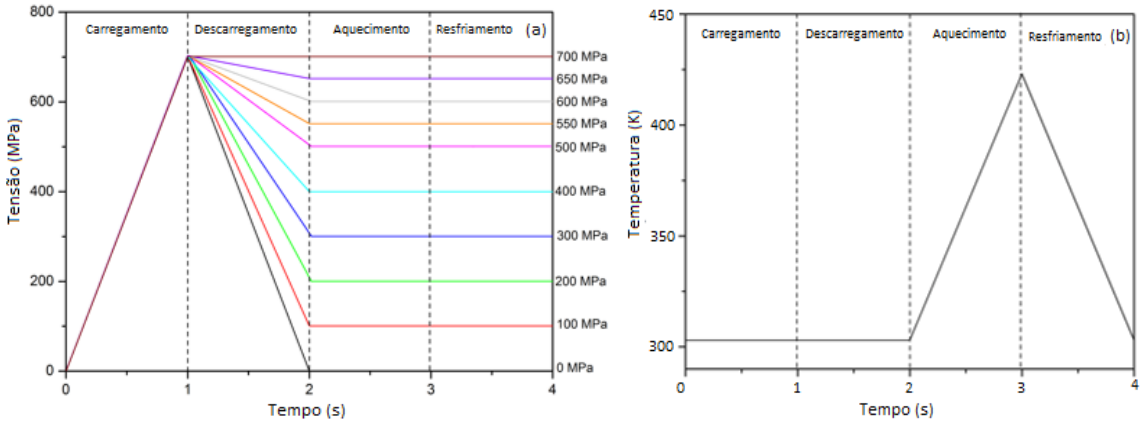


Figura VI-1: Atuador F (a) carregamento mecânico e (b) processo de carregamento térmico

Os resultados das simulações numéricas para o atuador F estão apresentados na figura VI-2 em termos de evolução da deformação no tempo (processo quase-estático, embora sensível a taxa de carregamento) durante o carregamento térmico (estágio de atuação). Os valores iniciais de deformação no início do aquecimento no gráfico são devidos a diferentes valores de recuperação elástica (ε_E) obtidos para diferentes níveis de tensão assistida após o descarregamento mecânico. Em linhas gerais, a figura VI-2 permite determinar a recuperação da deformação efetiva pelo atuador (ε_{SMA}) durante um ciclo térmico. Os resultados mostram ainda uma redução gradual da deformação recuperada para altos níveis de tensão assistida. Outra leitura do gráfico diz que o aquecimento da amostra sem tensão assistida possibilita

recuperar totalmente a deformação inelástica e que, portanto, o elemento de SMA retorna à sua forma original austenítica, mas ao ser resfriado o mesmo volta para fase martensítica com variante maclada, o que impossibilita outro acionamento térmico sem que previamente seja solicitado mecanicamente (efeito convencional de memória de forma). Nota-se ainda que a temperatura de transformação de fase tem estreita relação com o valor do carregamento aplicado e, portanto, aumentam de forma diretamente proporcional. Esse processo de aumento dos domínios referentes às temperaturas críticas de transformação de fases pode ser mais bem observado na figura VI-3.

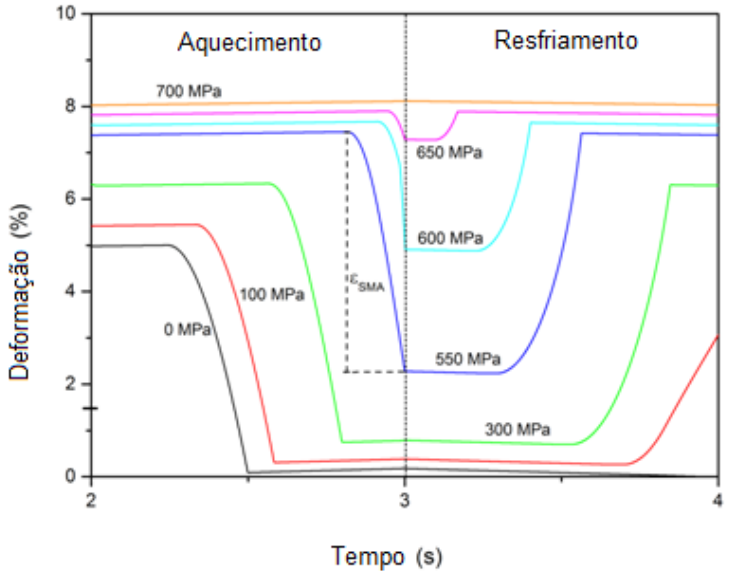


Figura VI-2: Atuador F: Evolução da deformação durante o ciclo térmico

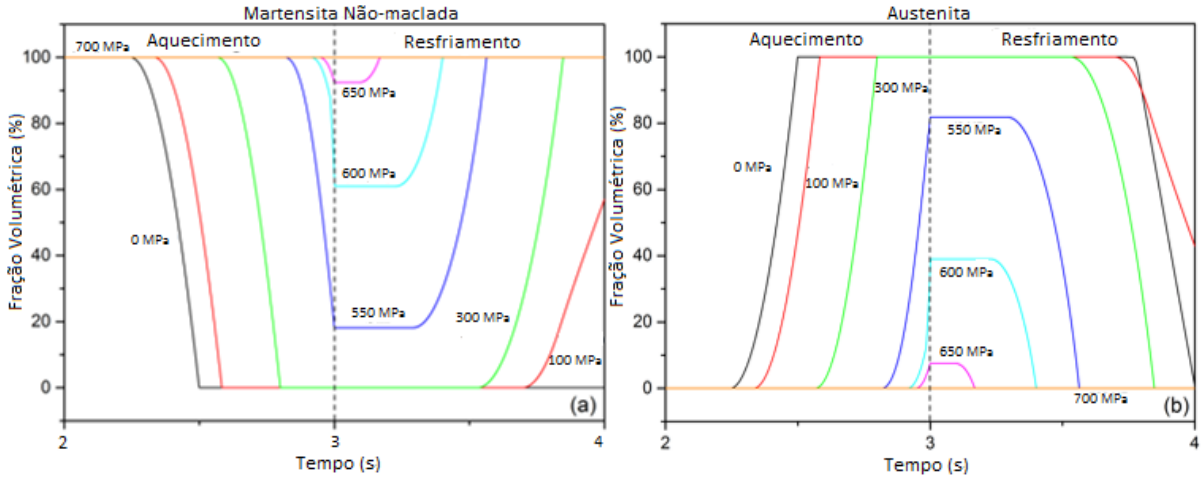


Figura VI-3: Atuador F: Evolução da fração volumétrica durante o ciclo térmico

A figura VI-3 mostra que, para altos níveis de tensão acima do ponto de saturação que, por sua vez, é limitado pelo nível de tensão, a transformação da martesita não maclada em austenita não se completa, resultando em uma redução considerável do efeito memória de forma, o que significa menor potencial de deformação e de recuperação nos ciclos subsequentes. Por outro lado, observa-se que o efeito memória de forma também é prejudicado quando o nível de tensão não é suficiente para induzir a transformação de fase completa, conforme pode ser observado para o caso de uma tensão de 100 MPa. A figura VI-4 permite uma melhor compreensão da dinâmica de transformação de fases a partir da análise das curvas de tensão-deformação-temperatura, destacando ainda que o carregamento térmico considerando diferentes valores de tensão assistida provoca diferentes histereses.

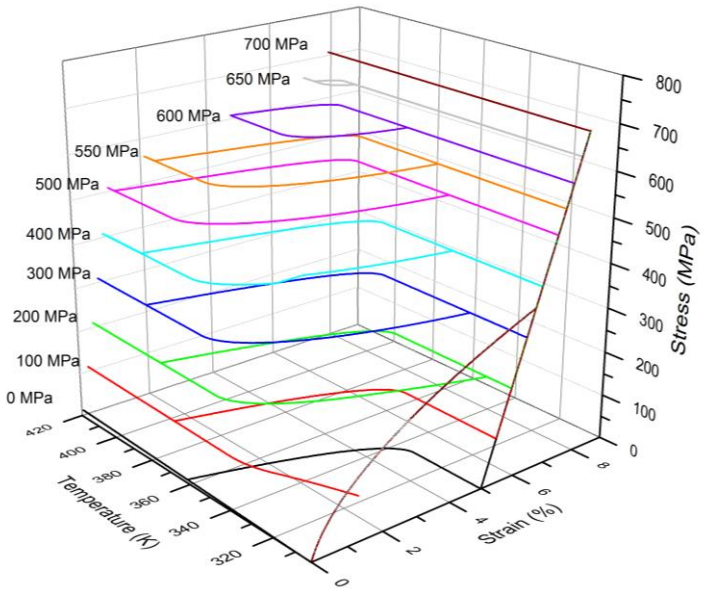


Figura VI-4: Tensão-deformação-temperatura para diferentes níveis de tensão aplicados

As características do atuador são agora avaliadas considerando a deformação recuperável (ε_{SMA}) para diferentes níveis de tensão aplicados, conforme ilustra a figura VI-5. Nota-se uma queda acentuada da deformação recuperável para valores de tensão acima de 500 MPa, devido às transformações incompletas de fase conforme mostrado na figura VI-3. Esta curva pode ser utilizada na concepção de *designs* de atuadores baseados nas suas aplicações.

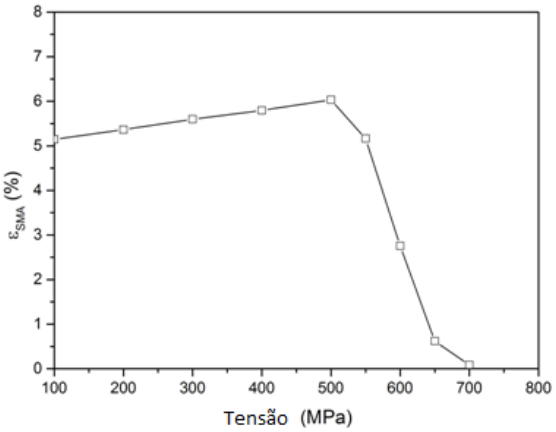


Figura VI-5: Deformação recuperável para diferentes níveis de tensão aplicados

VI.1.1 Estudo de diferentes tipos de carregamento térmico (Atuador F)

Diferente da seção anterior em que foi empregado um único carregamento térmico sob diferentes níveis de tensão mecânica, investiga-se agora o comportamento do mesmo atuador sob um único nível de tensão constante (500 MPa) e varia-se a temperatura de aquecimento com os seguintes valores máximos: 398K, 403K, 413 K, 418K e 423K. A figura VI-6 mostra os carregamentos mecânico (esquerda) e térmico (direita). O carregamento mecânico caracteriza-se pela aplicação de 0 a 500 MPa, valor este que permanece constante durante o carregamento térmico.

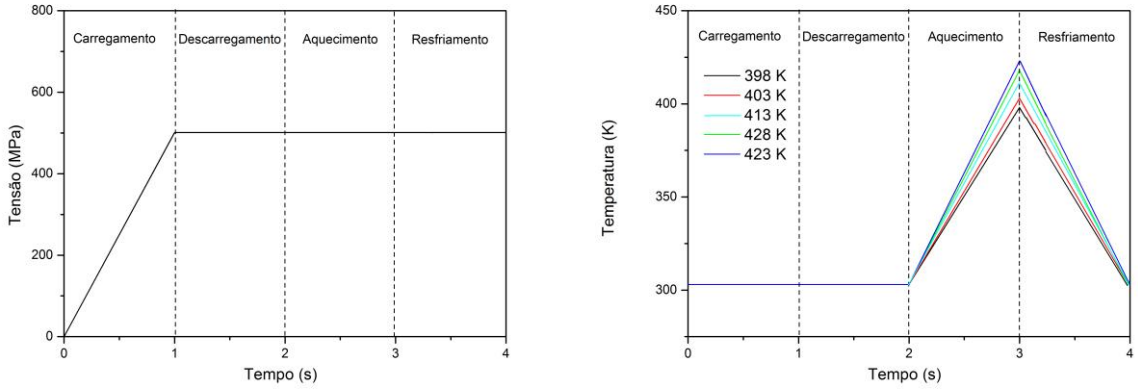


Figura VI-6: Carregamento mecânico (esq.) e térmico (dir.)

Os resultados das simulações numéricas do atuador em destaque estão apresentados na figura VI-7 em termos de evolução da deformação durante o estágio de atuação. Em linhas gerais, o gráfico permite determinar a recuperação efetiva da deformação inelástica SMA

produzida pelo atuador (ε_{SMA}) nos cinco ciclos térmicos. Nota-se ainda uma redução considerável da deformação quando submetido a temperaturas mais baixas, o que significa dizer que os estímulos de 398 K, 403 K e 413 K estão dentro de um domínio de temperatura abaixo da temperatura crítica máxima de transformação de fase e, portanto, são insuficientes para induzir transformações completas, prejudicando assim a deformação efetiva e o potencial de recuperação do atuador pelos ciclos subsequentes.

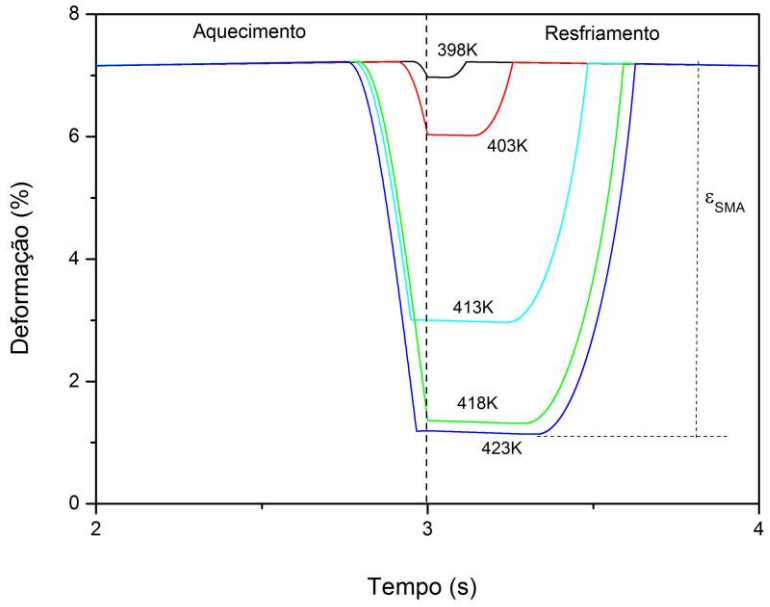


Figura VI-7: Evolução da deformação durante os ciclos térmicos

A figura VI-8 confere uma análise das frações volumétrica de martensita não-maclada e austenita do fio SMA, e permite compreender melhor por que o efeito memória de forma assistido a 500 MPa. As temperaturas de transformação de fase são dependentes do nível de tensão ao qual o fio está submetido. Conforme a temperatura aumenta, maior é a capacidade do fio de transformar de fase, e ao atingir 423 K a transformação é completa. Como exemplo, no caso 403 K, os gráficos mostram que estes ciclos térmicos possibilitaram atingir no máximo 20% de transformação austenítica do material, ou seja, nessa faixa de temperatura é possível observar ainda aproximadamente 80% da amostra em fase matensita não-maclada, o que evidencia que as temperaturas em questão são inferiores à temperatura crítica final requerida para ativação da transformação de fase (A_f). Com a deformação sendo solicitada pelo resfriamento da amostra ainda na condição de mistura dos microconstituintes, a recuperação de sua forma original é interrompida, resultando assim em ciclos incompletos que reduziram em 4,2% o efeito memória de forma.

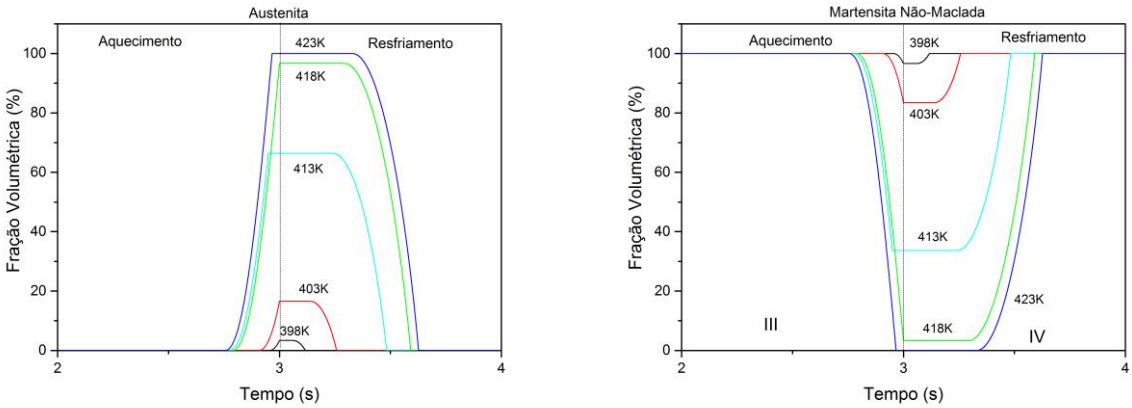


Figura VI-8: Evolução da fração volumétrica durante o ciclo térmico.

Outra leitura ainda da figura VI-8 mostra que a temperatura capaz de usar 100% da potencialidade do atuador em foco, em termos de deformação efetiva e recuperação nos ciclos subsequentes, é a de 423K por ser a única a alcançar A_f e, portanto, capaz de induzir transformações completas entre fases sob tensão assistida de 500 MPa. Já quando o atuador é submetido ao ciclo térmico de 418K, o material recupera somente 95% da sua forma original e observa-se baixo grau de coexistência de fases, o que reduziu em 2,5% o efeito memória de forma do atuador. Aparentemente é uma perda pouco significativa, isto se for considerado algum ganho em custos com a redução no consumo de energia do sistema, mas o que vai eleger a deformação ideal, e, portanto, a temperatura também ideal do atuador em foco é a sua aplicação e premissas de condições operacionais. A Figura VI-9 mostra a deformação recuperável (ε_{SMA}) para diferentes níveis de carregamentos térmicos estudados. Fica claro com o gráfico da figura VI-9 que o incremento de temperatura favorece maiores níveis de recuperação, pelos motivos já mencionados anteriormente, visto que o sistema se aproxima da temperatura crítica A_f. Esta curva pode ser utilizada na concepção de *designs* de atuadores baseados nas suas aplicações.

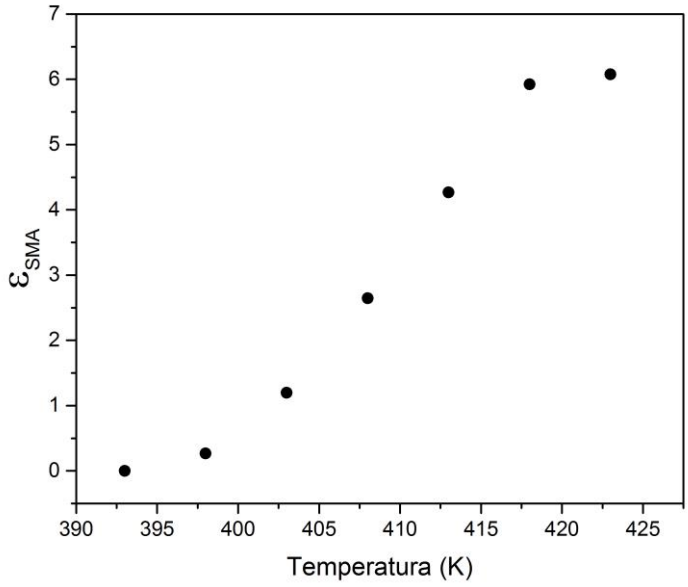


Figura VI-9: Deformação recuperável para diferentes níveis de carregamentos térmicos aplicados

A figura VI-10 mostra as curvas de tensão-deformação-temperatura, onde os ciclos de histerese aumentam com o acréscimo de calor ao sistema através do incremento de temperatura que, por sua vez, favorecem maiores níveis de deformação recuperável. Portanto, é correto dizer que temperaturas mais altas proporcionam maiores níveis de densidade de energia ao atuador que, na figura VI-9, estão representados por diferentes áreas de histereses.

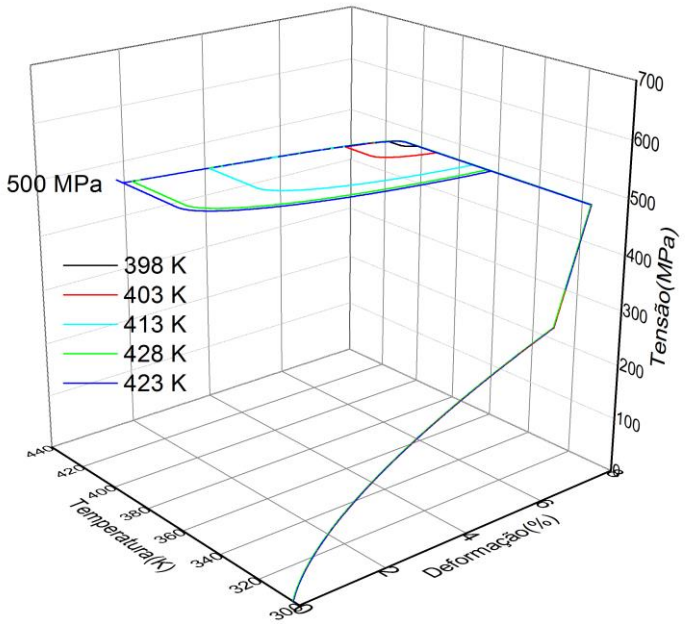


Figura VI-10: Tensão-deformação-temperatura para diferentes ciclos térmicos aplicados

VI.2 Fio de SMA conectado a uma mola elástica linear (Atuador MF)

A figura VI-12 mostra a evolução da tensão e deformação durante o carregamento térmico prescrito ($T_0 = 303K \; e \; T = 423K$) da segunda configuração de atuador investigada no estudo. Basicamente, com o aquecimento do fio, este tende a retornar à sua forma original austenítica e solicita a mola puxando-a, fenômeno que provoca o deslocamento desta que, por sua vez, se opõe à força e armazena energia potencial elástica, resultando no aumento da tensão do sistema até que a transformação esteja completa. Durante o resfriamento, o fio SMA sofre uma reorientação martensítica e, portanto, tem seu módulo de elasticidade reduzido, possibilitando que a mola libere sua energia acumulada e puxe-o, o que faz com que o mesmo recupere a sua deformação inelástica, dependendo dos valores de rigidez da mola.

Fica evidente então na figura VI-12 (a), que o aumento da rigidez da mola causa um aumento na tensão resultante do atuador, o que modifica também as temperaturas críticas para transformação de fases, tornando-as superiores. É possível observar diferentes comportamentos do atuador em função da rigidez da mola de aço. Com um valor baixo de rigidez (k = 10 kN/m), a tensão no sistema é bastante baixa, o que acarreta em uma deformação recuperada durante o resfriamento muito baixa, convertendo somente 20% em martensita com variante não-maclaca, conforme mostra a Figura VI-113. Para K igual a 500 kN/m, é possível transformar aproximadamente 80% em martensita com variante não-maclaca. Valores maiores de rigidez promovem a transformação completa do fio, porém a deformação diminui consideravelmente com o aumento da tensão no sistema, Figura VI-12 (b).

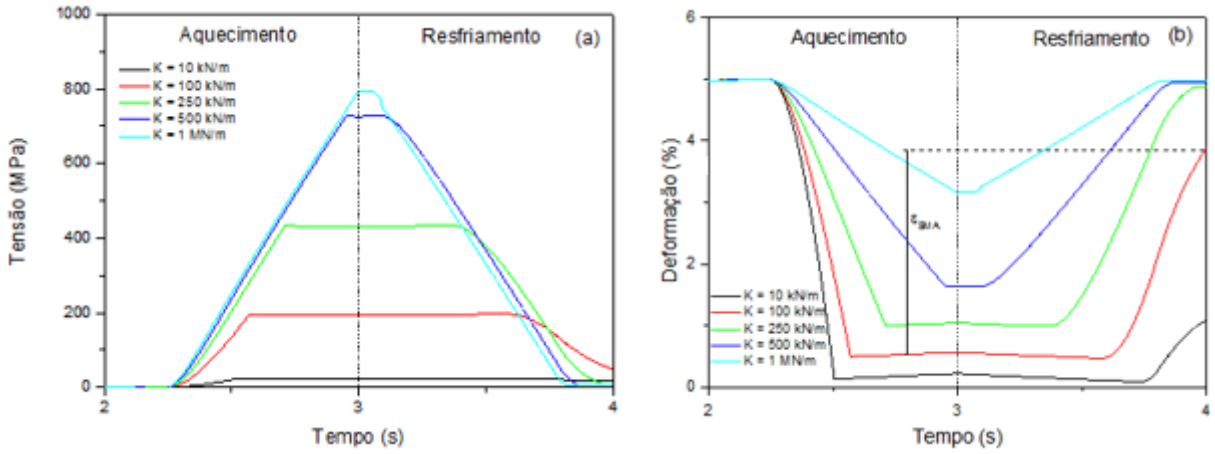


Figura VI-12: Atuador MF: Evolução das curvas de tensão (a) e deformação (b) para diferentes rigidezes de mola durante o ciclo térmico

A figura VI-13 mostra a análise gráfica para frações volumétricas da austenita e da martensita não-maclada, vê-se que para os quatro níveis de rigidez de mola possibilitaram transformações austeníticas completas durante o aquecimento, mas o processo reverso não acontece de igual forma. Isto ocorre porque as combinações de temperatura, tensão e variações na rigidez da mola competem e obtém-se respostas diferentes do fio SMA para tais estímulos. A figura VI-14 mostra o processo completo de carregamentos empregados no atuador em curvas de tensão-deformação-temperatura.

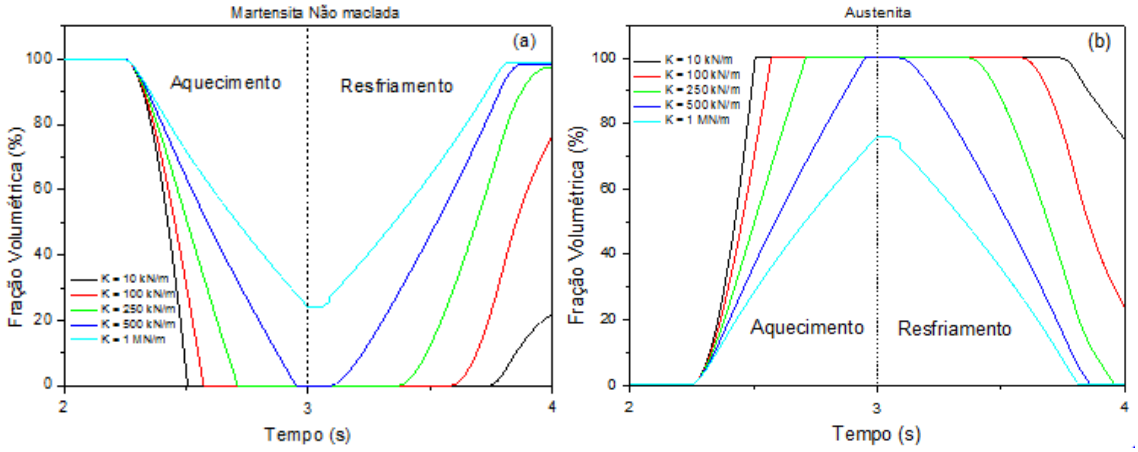


Figura VI-13: Atuador MF: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a) e austenita (b) para diferentes rigidezes de mola durante o ciclo térmico

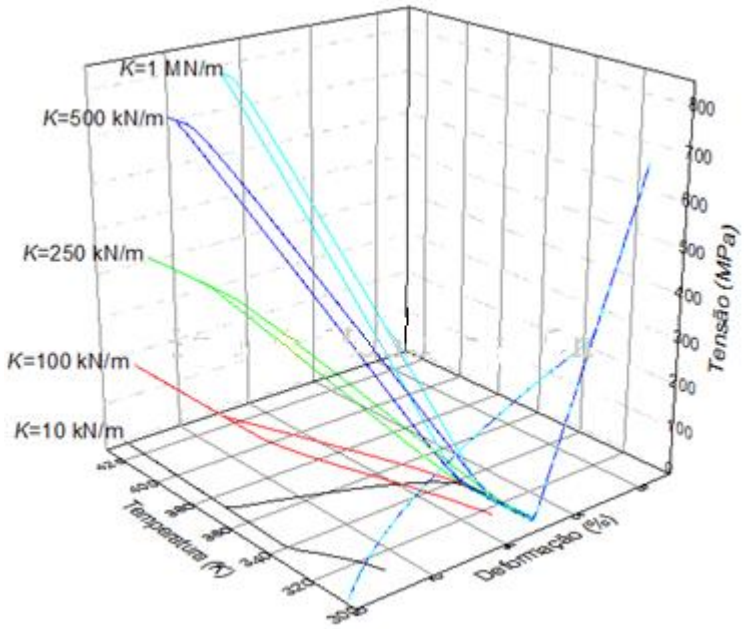


Figura VI-14: Atuador MF: Curvas de Tensão-deformação-temperatura para o processo de carregamento completo considerando diferentes valores de rigidez da mola durante o ciclo térmico

As características do atuador são agora avaliadas segundo tensão e deformação inelástica (ε_{SMA}) em função da rigidez da mola (figura VI-15). Nota-se que o valor máximo de deformação recuperável é alcançado quando a rigidez assume valor de 250 KN/m.

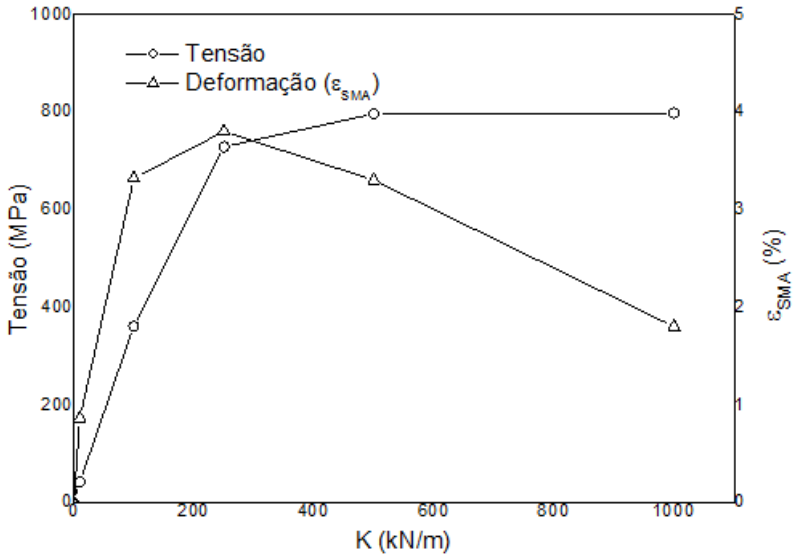


Figura VI-15: Atuador MF: Curvas tensão e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez das molas.

VI.3 Duas molas elásticas lineares conectadas a um Fio de SMA (Atuador MFM)

A terceira configuração de atuador é abordada nesta seção, considerando agora uma combinação de duas molas elásticas de mesma rigidez conectadas a um Fio SMA. A figura VI-16 mostra a evolução da tensão e deformação durante o carregamento térmico ($T_0 = 303K\ e\ T = 423K$). Ocorre que, com o aquecimento do fio, este tende a retornar à sua forma original austenítica, e solicita as molas puxando-as, fenômeno que provoca o deslocamento destas que, por sua vez, se opõem à força e armazenam energia, resultando no aumento da tensão do sistema. Quando a transformação de fase se completa, tem-se uma zona de estabilidade representando a tensão constante que assiste o atuador até que o ciclo de resfriamento se inicie. Fica evidente ainda que a rigidez da mola causa um aumento na tensão resultante do atuador, o que modifica também as temperaturas críticas para transformação de fases, tornando-as superiores à medida que a rigidez também aumenta. É possível observar também que para k = 1 MN/m, devido à elevada força resultante, o deslocamento do fio foi reduzido conforme representado na figura VI-16 (b). Ao fim do ciclo térmico, há uma redução gradativa da tensão no atuador até zero, que é quando as condições iniciais do sistema são restabelecidas.

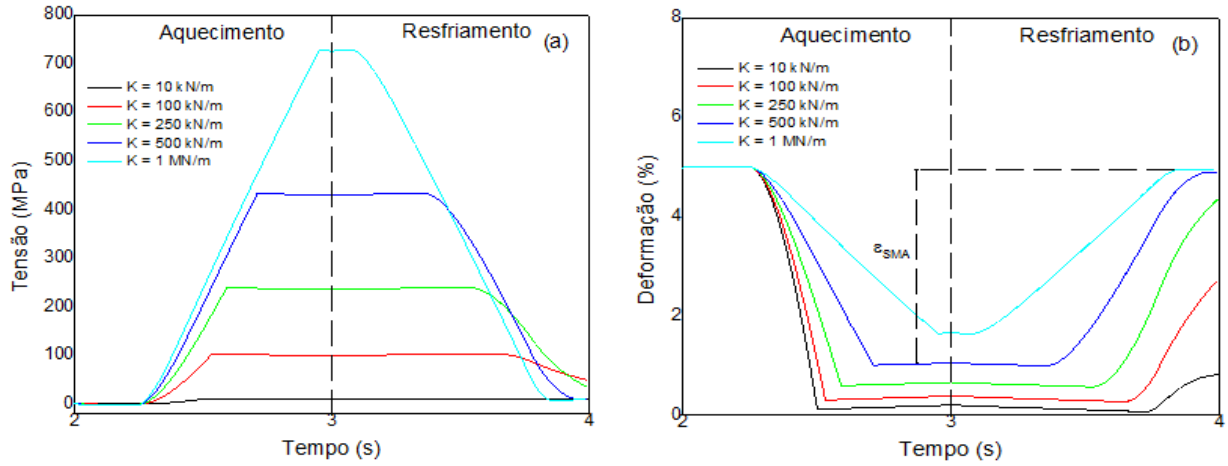


Figura VI-16: Atuador MFM: Evolução das curvas de tensão (a) e deformação (b) para diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico

É importante destacar que nesta condição operacional um terceiro elemento, no caso mais uma mola de igual rigidez, foi adicionado ao sistema. Uma vez que estão trabalhando em série, a rigidez equivalente do sistema resulta em valores de tensão menores, quando comparados com a configuração de atuador da seção anterior. Os valores de deformação são mostrados na Figura VI-16 (b). A figura VI-17 apresenta o deslocamento de cada ponta do fio conectado as molas, é possível o comportamento simétrico em relação ao deslocamento das extremidades conectadas às molas.

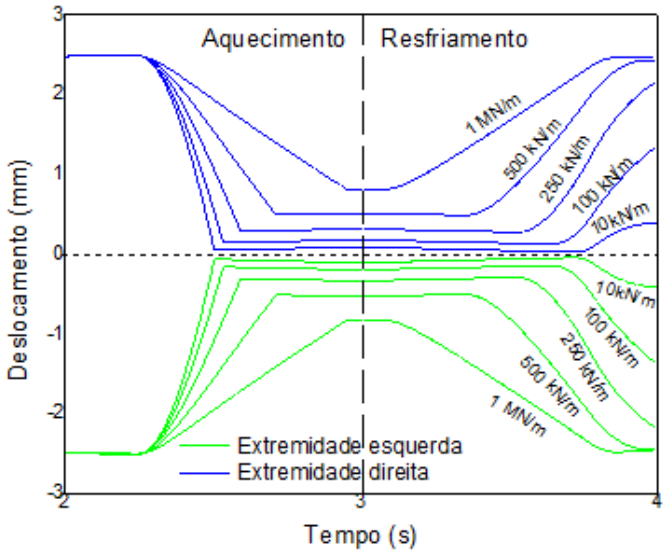


Figura VI-17: Atuador MFM: deslocamento das duas extremidades do fio de SMA durante o ciclo térmico

A figura VI-18 mostra a evolução das frações volumétricas de austenita e martensita não-maclada durante o ciclo térmico. Basicamente, o fio de SMA sofre uma reorientação martensítica no resfriamento e, portanto, tem seu módulo de elasticidade reduzido, possibilitando que as molas liberem a energia acumulada e puxe-o, o que faz com que o mesmo recupere totalmente ou parcialmente sua deformação inelástica dependendo dos valores de rigidez das molas. Mais uma vez, certos valores de rigidezes não possibilitaram transformações completas, o que afetou a deformação máxima do sistema, conforme representado na figura VI-16 (b). Assim, nota-se que quando o carregamento mecânico é promovido por molas com baixos valores de rigidez (10 KN/m), os próximos ciclos possuem baixos valores de atuação. Apenas as rigidezes de 500 kN/m e 1 MN/m possibilitaram transformações completas entre fases, sendo que a última promoveu menor deslocamento do fio em relação à primeira, o que reduziu a sua deformação recuperável associada no sistema.

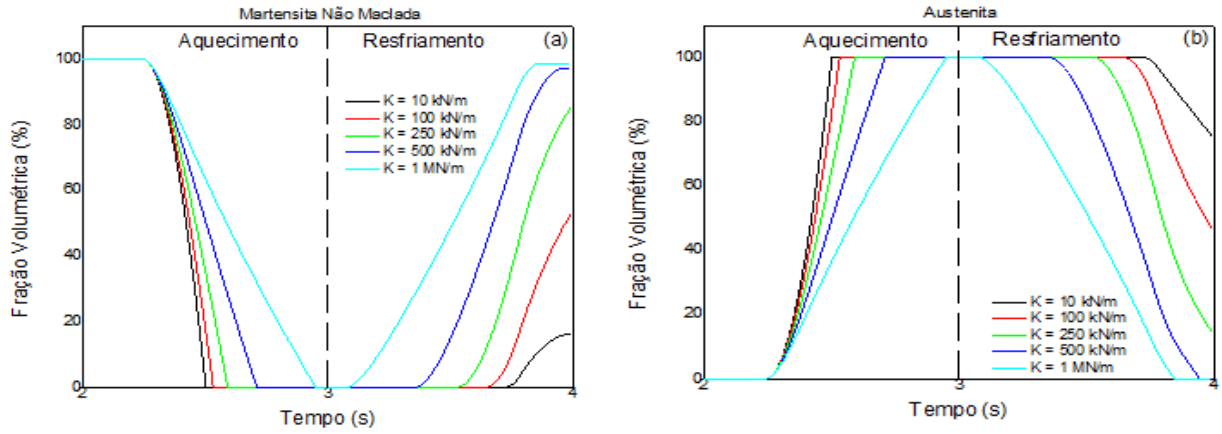


Figura VI-18: Atuador MFM: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a) e da austenita em (b) para diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico

A figura VI-19 mostra o processo completo de carregamentos empregados no atuador através de curvas de tensão-deformação-temperatura. Nota-se que quando o atuador funciona com molas em série, estas definem o nível de recuperação no atuador e, por este motivo, as curvas resultantes de cada processo estão associadas com a rigidez das molas.

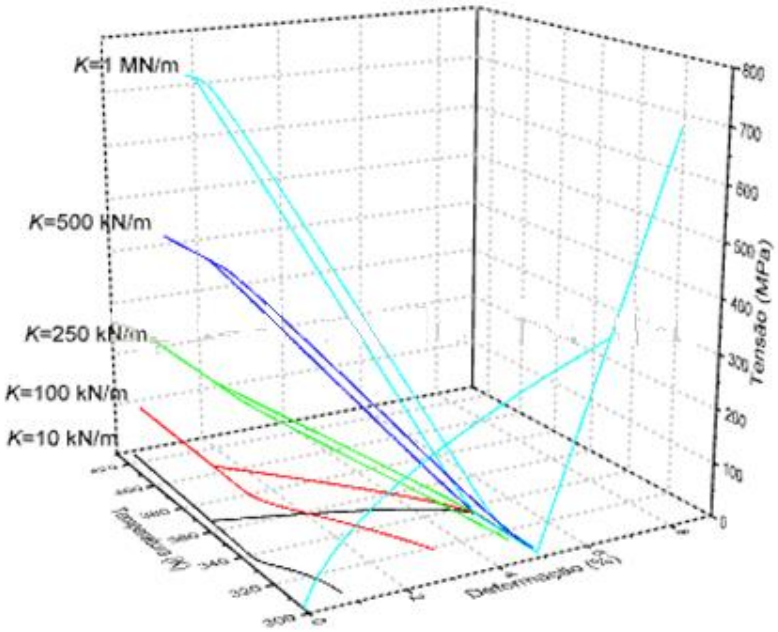


Figura VI-19: Atuador MFM: Curvas de Tensão-deformação-temperatura considerando diferentes valores de rigidez das molas durante o ciclo térmico

As características do atuador são agora avaliadas segundo tensão e deformação de atuação (ε_{SMA}) em função da rigidez da mola (figura VI-20). Como esperado, a tensão no atuador aumenta à medida que se aumenta a rigidez equivalente no sistema. Também se nota uma queda na deformação recuperável do atuador para valores de rigidez maiores que 500 kN/m, confirmando assim a perda de eficiência.

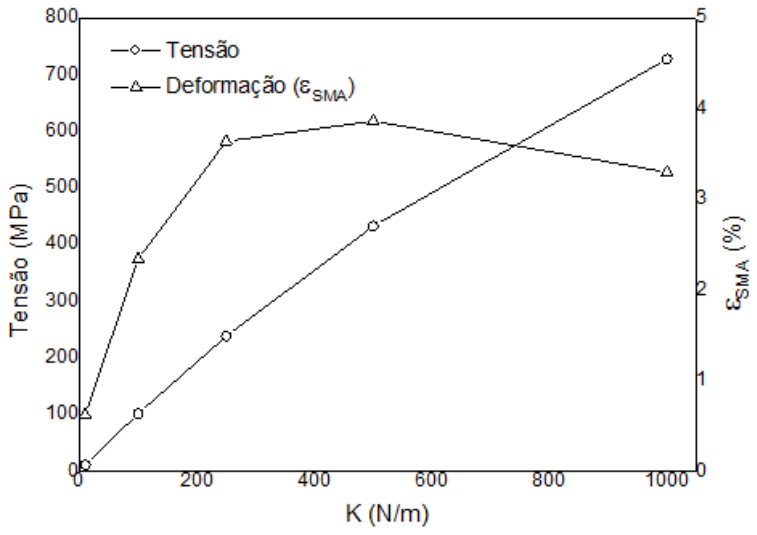


Figura VI-20: Atuador MFM: Curvas tensão SMA e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez das molas

VI.4 Dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear (Atuador FMF)

A quarta configuração de atuador considera agora uma combinação de dois fios de SMA conectados a uma mola elástica linear sob um carregamento térmico prescrito ($T_0 = 303K \; e \; T = 423K$) e intercalado, destacando ainda que somente o estágio de atuação será detalhado nesta seção, ou seja, os fios já estão deformados e, portanto, apresentam-se em sua forma martensítica não maclada. O ciclo de aquecimento se inicia no fio esquerdo, seguido do seu resfriamento, e então o fio direito é também aquecido e resfriado, conforme mostrado na figura VI-21.

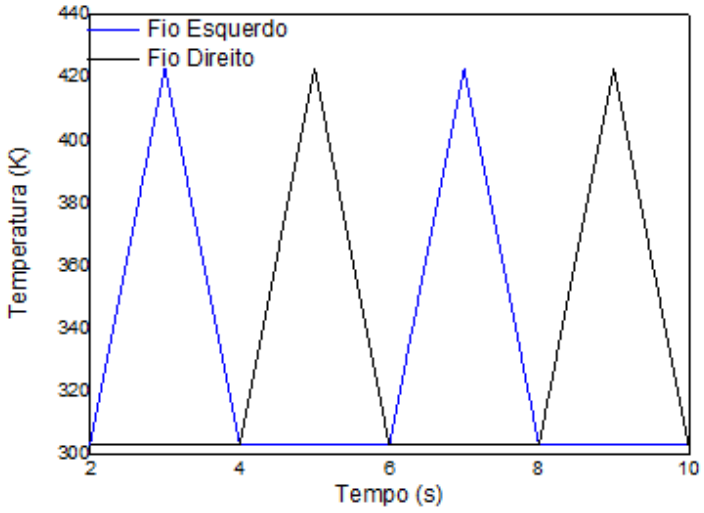


Figura VI-21: Atuador FMF: Ciclo térmico

A figura VI-22 mostra a evolução da tensão durante o carregamento térmico para diferentes valores de rigidez da mola. Em linhas gerais, observa-se que os fios respondem de forma simétrica aos ciclos térmicos, com a tensão aumentando durante o aquecimento, devido à contração dos fios com memória de forma para recuperar a deformação, e diminuindo no resfriamento, já que a mola libera energia para deformar novamente o fio à medida que retorna ao seu repouso. Assim, pode-se concluir que ambos os fios possuem a mesma tensão.

Com o aquecimento do fio, este tende a retornar à sua forma original austenítica, e solicita a mola puxando-a, fenômeno que provoca o deslocamento desta que, por sua vez, se opõe à força e armazena energia, resultando no aumento da tensão do sistema. Quando a transformação de fase se completa, tem-se uma zona de estabilidade representando a tensão constante que assiste o atuador até que o ciclo de resfriamento se inicie. Fica evidente mais uma vez que a rigidez da mola causa um aumento na tensão do atuador, o que modifica também as

temperaturas críticas para transformação de fases, tornando-as superiores conforme aumento da rigidez. Observa-se ainda que ao fim do ciclo térmico entre um fio e outro, há uma redução gradativa da tensão, contudo diferente de zero, devido ao deslocamento concomitante dos fios.

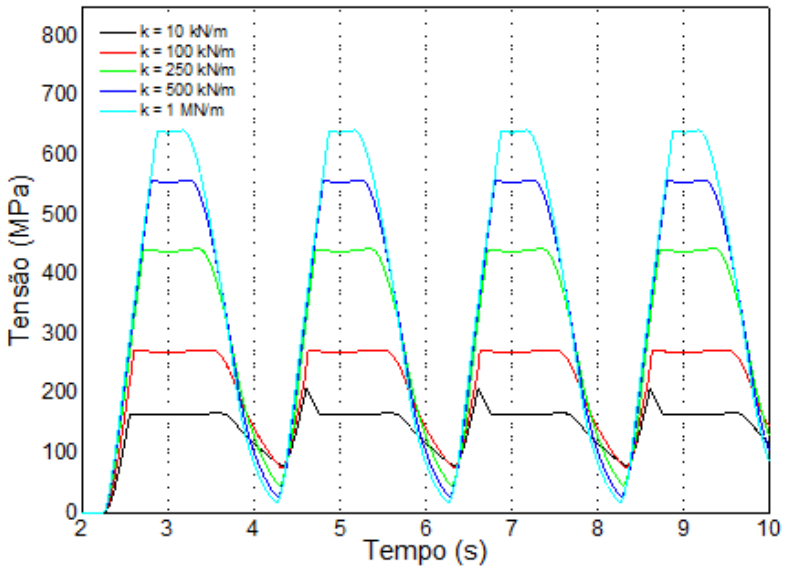


Figura VI-22: Atuador FMF: Evolução da tensão durante o ciclo térmico e considerando diferente rigidezes de mola (Fio esquerdo: t(s)=2 a 4; 6 a 8; Fio direito: t(s)= 4 a 6; 8 a 10)

A figura VI-23 mostra a evolução da deformação para ambos os fios, considerando diferentes valores de rigidez da mola. As letras A e R nos gráficos representam as regiões onde o aquecimento e resfriamento de cada fio ocorre, respectivamente. A recuperação da deformação ocorre no aquecimento, estágio este em que o fio SMA se contrai e recupera sua forma austenítica original, provocando assim o deslocamento da mola que, por sua vez, puxa o outro fio à direita. Nesta dinâmica, a mola armazena energia para deformar o fio em atuação novamente durante o resfriamento. Nota-se ainda que o nível de deformação do primeiro (à esquerda) continua aumentando quando o segundo fio começa a ser aquecido e excede o percentual de deformação previamente definido durante o carregamento mecânico inicial, e que tem recuperação da deformação somente no ciclo de resfriamento do fio direito.

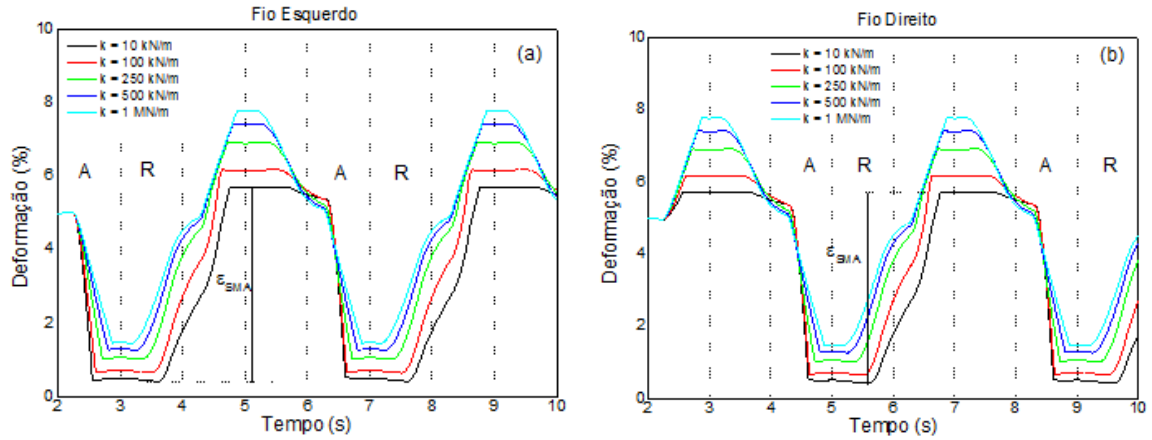
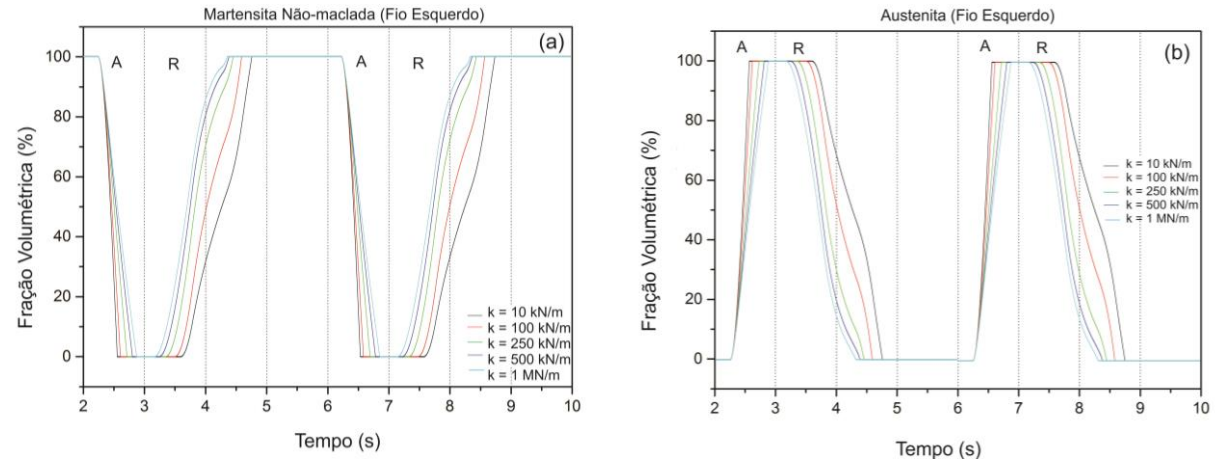


Figura VI-23: Atuador FMF: Evolução da deformação durante dois ciclos térmicos para o fio esquerdo (a) e direito (b)

Adicionalmente, nota-se pela figura VI-23 que o comportamento termomecânico dos dois fios é igual, haja visto que os carregamentos térmico e mecânico são os mesmos. Estes comportamentos são observados com um atraso nos gráficos, uma vez que ocorrem em instantes distintos. As evoluções das frações volumétricas para ambos os fios mostradas na figura VI-24 confirmam as respostas associadas com cada atuador, em que todas as molas proporcionaram transformações completas de fases e, portanto, a recuperação efetiva no atuador aumenta à medida que o sistema se torna mais rígido.



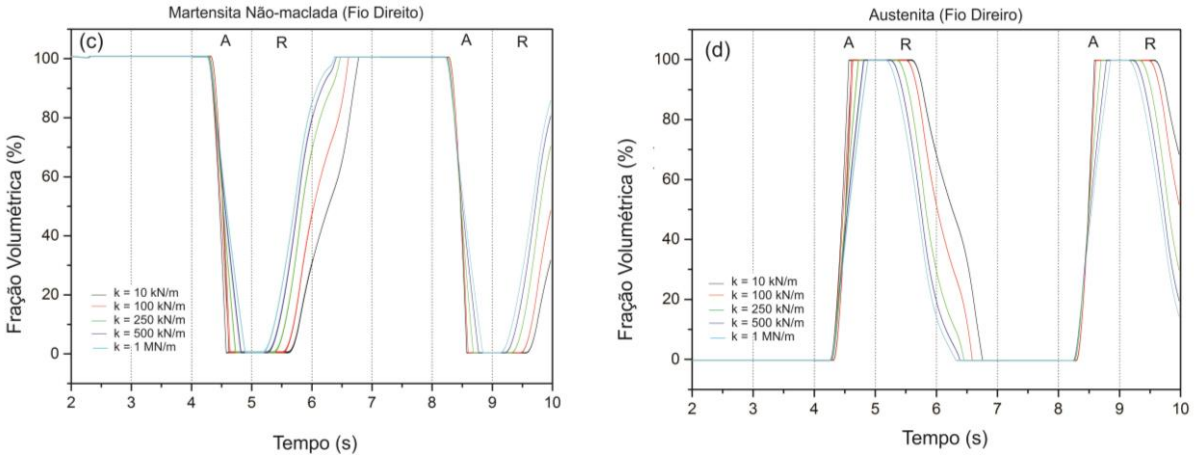


Figura VI-24: Atuador FMF: Evolução da fração volumétrica da martensita não-maclada (a), austenita (b), martensita não maclada (c) e austenita (d) durante o ciclo térmico para os fios esquerdo e direito, respectivamente

A figura VI-25 mostra o processo completo de carregamentos empregados no atuador em curvas de tensão-deformação-temperatura para diferentes valores de rigidez de mola. Conforme a rigidez da mola aumenta, o sistema se torna mais rígido e a relação tensão-deformação também aumenta. As curvas descontinuadas ao fim de cada ciclo têm origem no deslocamento concomitante dos fios que, por sua vez, não permite tensão zero.

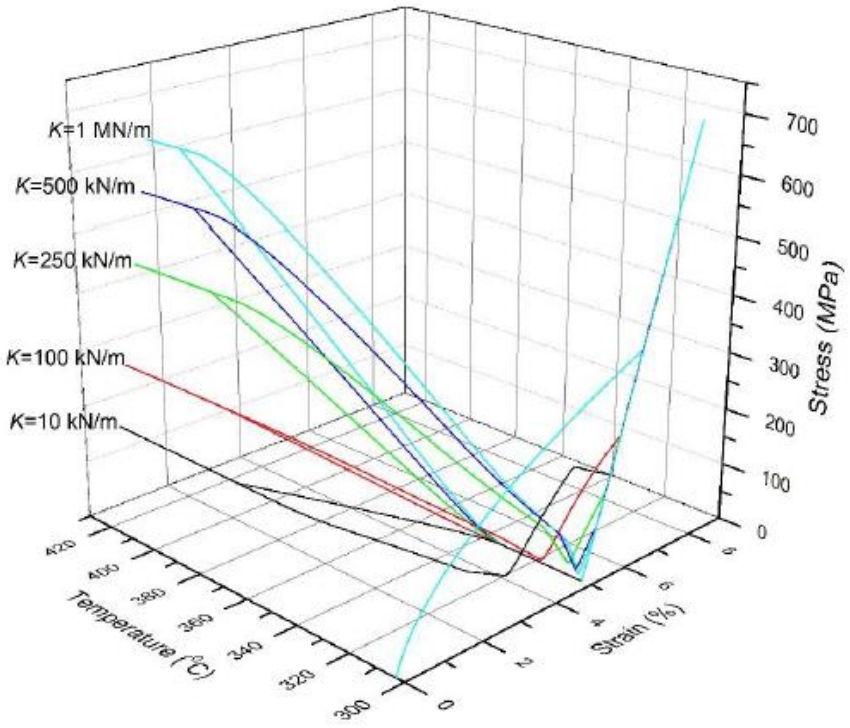


Figura VI-25: Atuador FMF: Curvas de tensão-deformação-temperatura para diferentes valores de rigidez de mola

Uma análise da tensão SMA e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez de mola é apresentada na figura VI-26. Os resultados confirmam que a tensão máxima gerada pelo atuador agora em foco é menor que a dos casos anteriores. Em contrapartida, a deformação recuperável praticamente se manteve constante para os valores de rigidez das molas considerados na simulação numérica. Observa-se também que, embora um segundo elemento SMA tenha sido adicionado à configuração de atuador, o uso do mesmo não dobrou os valores de deformação recuperável quando comparado com o atuador fio-mola. Com base nisso, nota-se que a rigidez da mola estabele uma competição no sistema que, por sua vez, define e resposta do mesmo.

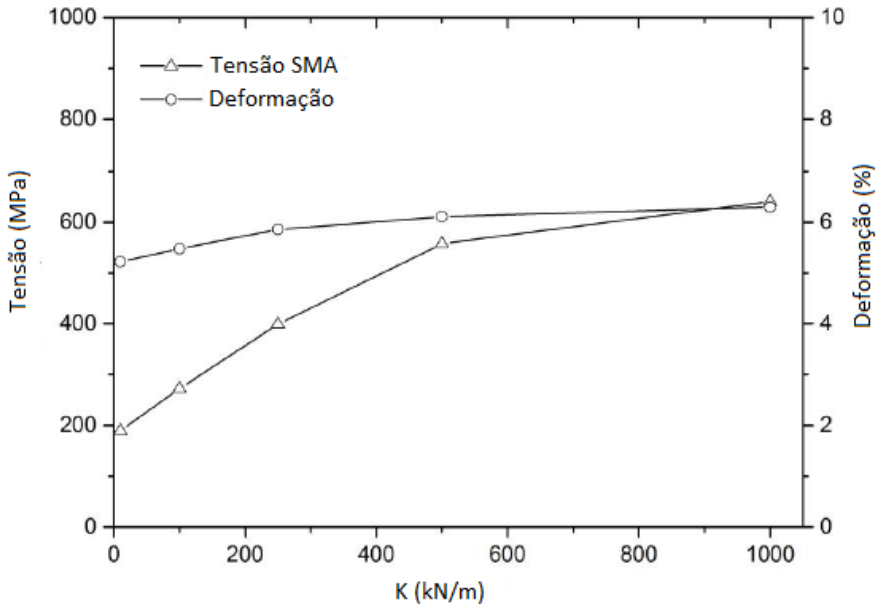


Figura VI-26: Atuador FMF: Curvas de tensão e deformação recuperável para diferentes valores de rigidez de mola

VII. Estudo comparativo entre os atuadores

Esta seção faz um estudo comparativo das diferentes configurações de atuadores estudadas, cujo objetivo é analisar as características de cada caso e performance associada em termos de tensão e deformação. Ela é restrita somente aos atuadores com elemento de mola, uma vez que no caso do atuador Fio a tensão é aplicada e constante no sistema, ao contrário das configurações restantes, as quais exibem tensão resultante durante o ciclo térmico em função da rigidez das molas.

Na figura VII-1, o critério de capacidade de força gerada é avaliado considerando a tensão no fio de SMA produzida em cada configuração de atuador. Em todos os casos, o valor máximo de tensão foi alcançado com o valor também máximo para rigidez de mola aplicado na simulação, K = 1 MN/m. Nota-se ainda que, para este valor de rigidez de mola, atuadores com somente um fio de SMA (MF e MFM) apresentaram tensão maior que a do atuador com dois elementos SMA (FMF). Além disso, observa-se uma tendência de estabilização para valores de rigidezes mais altos nos atuadores MF e FMF.

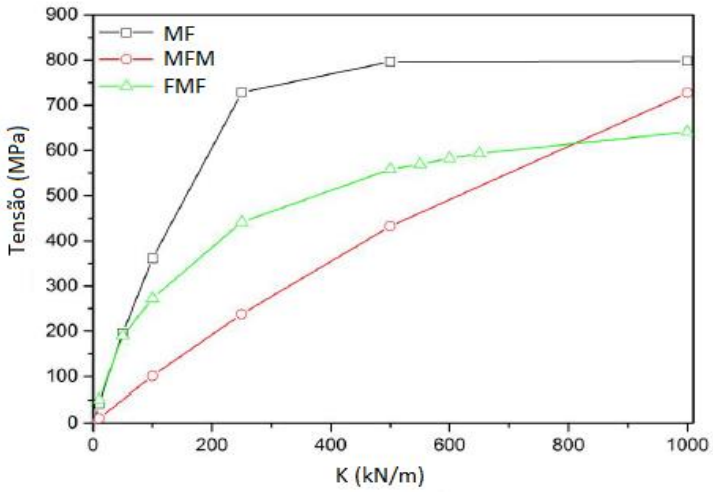


Figura VII-1: Gráfico comparativo da tensão resultante das diferentes configurações de atuadores com valores distintos de rigidez de mola

Ao passo que a análise de tensões apresenta comportamentos previsíveis, isto é, aumento da tensão no sistema associado ao aumento da rigidez da mola, o comportamento da deformação recuperável foi diferenciado, conforme mostra a figura VII-2. O atuador MF apresentou deformação de aproximadamente 4% para rigidez de mola próxima a K=250 kN/m e rapidamente reduziu esse potencial de recuperação para valores de rigidez das molas mais altos.

A configuração de atuador com duas molas (MFM) apresentou um comportamento em que o aumento no valor de rigidez de mola causou primeiro um aumento no potencial de recuperação da deformação recuperável, mas seguido de uma queda tênue para valores de rigidez mais altos. O atuador com dois elementos de SMA (FMF) teve um comportamento singular. Isto porque uma capacidade de recuperação de 5% foi observada de início, e para os menores valores de rigidez. Quando se aumentou significativamente a rigidez do sistema, obteve-se um aumento na recuperação deformável em torno de 1%, e que depois manteve-se praticamente constante.

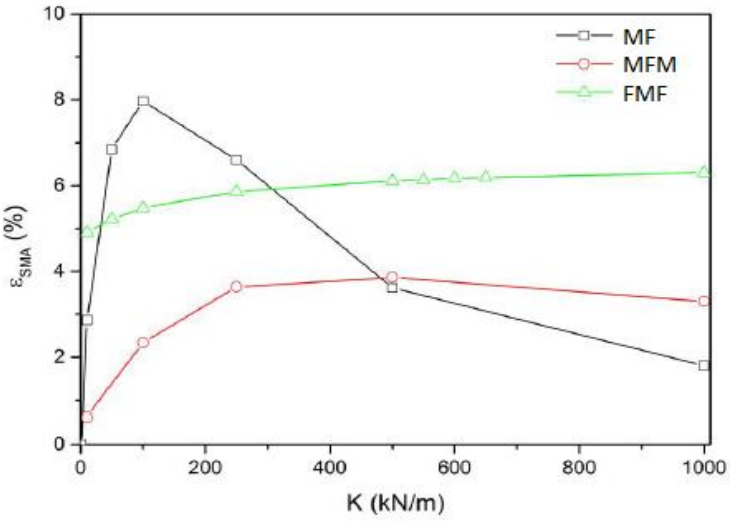


Figura VII-2: Comparativo da deformação recuperável resultante nas diferentes configurações de atuadores com valores distintos de rigidez de mola

A tabela 2 apresenta um resumo com os valores máximos de tensão e deformação recuperável em cada atuador analisado. Os resultados mostram que cada configuração possui características próprias em termos de tensão, deformação recuperável e na forma como se relacionam com diferentes valores de rigidez das molas estudadas. Apesar disso, todas as configurações apresentaram um comportamento semelhante de aumento da tensão associado ao aumento da rigidez da mola. Em relação à deformação recuperável, o atuador F apresentou deformação relativamente constante para tensão menor ou igual a 500 MPa, e rapidamente perdeu eficiência no deslocamento para valores de tensão inferiores. O atuador MF teve deformação recuperável máxima de 3,99% para rigidez de 250 KN/m e rapidamente reduziu esse percentual para valores de tensão superiores. A configuração MFM teve resultados semelhantes ao do atuador MF com deformação recuperável máxima de 3,86% associada à rigidez de 500 KN/m. Dentre os atuadores estudados, as configurações MFM e MF proporcionaram a tensão máxima obtida de 796 MPa, o que corresponde a uma força de 1,82 kN. O atuador FMF

apresentou deformação quase constante com uma variação menor que 1% para as rigidezes de mola consideradas.

Tabela 2: Quadro comparativo da tensão máxima e deformação recuperável resultante

Atuador	**Tensão Máxima (MPa)**	**Deformação recuperável Máxima (%)**
Fio (F)	700	6,03
Mola-Fio (MF)	796	3,99
Mola-Fio-Mola (MFM)	727	3,86
Fio-Mola-Fio (FMF)	640	6,30

VIII. Conclusões

A demanda por produtos mais complexos desafia os padrões atuais de engenharia, que buscam qualidade, confiabilidade, segurança e custo operacional cada vez mais competitivos. Para apoiar essa nova tendência da indústria, os projetos de engenharia têm se dedicado ao estudo dos materiais inteligentes aliado ao fator miniaturização, como forma de otimizar os métodos de engenharia no que tange o *design* e desenvolvimento de dispositivos em geral. As características especiais das ligas com memória de forma (SMAs) têm incentivado a sua aplicação em sistemas mecânicos devido à variação das propriedades mecânicas em função de transformações de fase induzidas por temperatura, tensão ou combinação de ambos. Tais características possibilitam o desenvolvimento de atuadores adaptativos, conferindo assim um vasto campo para inovações tecnológicas.

Este trabalho realizou análises numéricas de quatro diferentes configurações de atuadores: Fio (F); Fio-Mola (FM); Mola-Fio-Mola (MFM); e Fio-Mola-Fio (FMF). O estudo desenvolvido apresenta uma metodologia que descreve o comportamento termomecânico em termos de tensão e deformação, fornecendo assim as principais variáveis das soluções de *design,* de forma a otimizar a aplicação das ligas com memória de forma em projetos de atuadores.

Com este objetivo, foi realizada uma revisão bibliográfica para identificar o potencial de aplicação das SMAs em atuadores nos diversos setores da engenharia e tendências. Neste trabalho, optou-se por atuadores lineares e de configurações simplificadas que fossem adaptáveis aos projetos de engenharia, bem como viáveis economicamente e, portanto, sem grandes aparatos de funcionamento, desobrigando assim alto investimento inicial sem impactar as margens financeiras de projeto.

Para descrever o comportamento temomecânico do elemento SMA foi considerado um modelo constitutivo simplificado desenvolvido por SAVI *et al*. (2005), e que foi implementado por Bandeira *et al*. (2006) como uma sub-rotina UMAT (do inglês, *User Material Routine*) na linguagem de programação Fortran para que pudesse ser usado em conjunto com o programa de elementos finitos ABAQUS. A caracterização do fio SMA e os dados experimentais utilizados nas simulações numéricas foram realizados por MONTEIRO *et al*. (2016). Já a análise paramétrica foi conduzida definindo diferentes valores de rigidez da mola ou com a aplicação de força para avaliação da performance do atuador.

As simulações numéricas possibilitaram investigar as características de cada configuração de atuador, resultando numa metodologia que fornece as curvas de tensão e de deformação para desenvolvimento ou adaptação de projetos de atuadores. Observou-se ainda

que o aumento da tensão no sistema sem elemento de mola requer o aumento das temperaturas de aquecimento, de modo a permitir o desenvolvimento do processo de transformação de fase, comportamento este já conhecido. Um comportamento similar foi também observado nas configurações de atuadores com mola ao se aumentar a rigidez do sistema, o que promove um aumento de tensão. Adicionalmente, o estudo do atuador fio com diferentes carregamentos térmicos verificou que melhores níveis de deformação recuperável podem ser obtidos com o acréscimo da temperatura.

Este trabalho comparou diferentes configurações de atuadores com elementos de ligas de memória de forma por meio de simulações numéricas que, por sua vez, possibilitaram determinar as curvas de tensão máxima e deformação recuperável de cada configuração. Tais análises fornecem informações a respeito do comportamento do material e do sistema, permitindo assim compreender o comportamento termomecânico das diversas configurações de atuadores estudadas em termos das fases volumétricas presentes e das alterações em suas propriedades, o que é relevante para atendimento das especificações operacionais em projeto de atuadores. Assim, além de contribuir para o conhecimento do comportamento das ligas com memória de forma e sua aplicação em atuadores lineares, a metodologia proposta também estabelece uma ferramenta que pode ser utilizada para auxiliar no projeto de atuadores. Neste sentido, o que vai definir a melhor configuração de atuador serão as exigências de serviços e viabilidade econômica, sabendo-se ainda que variações nos valores de rigidez de mola e temperatura poderão ser ajustados a fim de alcançar as condições operacionais desejadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se indicar:

- A realização de ensaios experimentais envolvendo as configurações de atuadores estudadas para calibração do modelo;
- A realização de simulações numéricas considerando tensão por compressão para um estudo comparativo;
- Análise do rendimento envolvendo as configurações de atuadores estudadas, considerando a relação entre a taxa de deformação obtida e taxa de calor consumida pelo sistema para um estudo comparativo.

IX. Referências Bibliográficas

AGUIAR, R. A. A. DE; Análise da Reduçao de Vibrações em Sistemas Mecânicos Utilizando Ligas com Memória de Forma, Dissertação de D.Sc., COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2011.

AGUIAR R.A.A, Savi M.A., PACHECO P.M.C.L. "Experimental Investigation of Vibration Reduction Using Shape Memory Alloys". *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 24, pp. 247-261, 2013.

ANDREASEN G. F. and HILLEMAN T. B. "An evaluation of 55 cobalt substituted Nitinol wire for use in orthodontics". *J. Am. Dent. Assoc.*, v. 82, pp. 1373-1375, 1971.

ATLI K.C., KARAMAN I., NOEBE R.D., GAYDOSH D. "The effect of training on two-way shape memory effect of binary NiTi and NiTi based ternary high temperature shape memory alloys". *Materials Science & Engineering,* v. 560, pp. 653–666, 2013.

BAÊTA-NEVES A.P., SAVI M.A. and PACHECO P.M.C.L. "On the Fremond's Constitutive Model for Shape Memory Alloys". *Mechanics Research Communications*, v. 31(6), pp. 677-688, 2004.

BO Z., LAGOUDAS D.C. "Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part IV: modeling of minor hysteresis loops". *International Journal of Engineering Science*, v. 37, pp. 1205-1249, 1999.

BANDEIRA E. L., SAVI M. A., MONTEIRO Jr. P. C. C. and ANTOUN NETTO, T. "Finite Element Analysis of Shape Memory Alloy Adaptive Trusses with Geometrical Nonlinearities". *Archive of Applied Mechanics*, v. 76(3-4), pp.133-144, 2006.

BHUNIYA A. K., CHATTOPADHYAY P. P, DATTA S. and BANERJEE, M. K. "On the degradation of shape memory effect in trace Ti-added Cu-Zn-Al alloy". *Materials Science and Engineering*, v. A 393, pp. 125-132, 2005.

CARROZZA, M.C, ARENA A., ACCOTO D., MENCIASSI A. and DARIO P. "A SMA-actuated miniature pressure regulator for a miniature robot for colonoscopy". *Sensors and Actuators A*: Physical, v. 105(1), pp.119–131, 2003.

CINGOLANI E., VAN HUMBEECK J. and AHLERS, M. "Stabilization and Two-Way Shape Memory Effect in Cu-Al-Ni Single Crystals". *Metallurgical and Materials Transactions* A, v. 30(3), pp. 493-499, 1999.

CRAGG A., LUND G., RYSAVY J., CASTANEDA F., CASTANEDA -Zuniga W. and AMPLATZ K. "Nonsurgical placement of arterial endoprostheses: a new technique using nitinol wire". *Radiology*, v. 147, pp. 261-263, 1983.

DESROCHES R. and DELEMONT M. "Seismic retrofit of simply supported bridges using shape memory alloys". *Engineering Structures*, v. 24(3), pp. 325-332, 2002.

DONG Y., BOMING, Z. and JUN L. “A changeable aerofoil actuated by shape memory alloy”. *Materials Science and Engineering A*, v. 485, pp. 243–250, 2008.

DONNELAN, Q.A. “Design and testing of linear shape memory alloy actuator”. *Final Report, National Science Foundation – Research Experience for Undergraduates*, 2005.

ERTURK, A. and INMAN, D.J. *Piezoelectric Energy Harvesting.* Chichester: John Wiley & Sons Ltd., UK, 2011.

ELWALEED, A.K, MOHAMED N.A, MOHDNOR M.J., MOHD M.M. “A new concept of a linear smart actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 123, pp. 244–249, 2007.

GALL, K., SEHITOGLU, H., CHUMLYAKOV, Y.I., KIREEVA, I.V. “Tension–compression asymmetry of the stress–strain response in aged single crystal and polycrystalline NiTi”. *ActaMaterialia*, v. 47 (4), pp. 1203–1217, 1999.

GAO, F., DENG, H., ZHANG, Y. “Hybrid Actuator Combining Shape Memory Alloy with DC Motor for Prosthetic Fingers”. *Sensors and Actuators* A Physical, 2014.

HUANG W., LIU Q., HE L. and YEO J. “Micro NiTi–Si cantilever with three stable positions”. Sensors and Actuators A: Physical, v. 114 (1), pp. 118–122, 2004.

JANSEN S., BREIDERT J. and WELP E.G. “Positioning actuator based on shape memory wires”. ACTUATOR *Proc. of 9th International Conference on New Actuators*, 2004.

KAUFMAN, G.B.; MAYO, I. “The story of nitinol: The serendipitous discovery of the memory metal and its applications”. *Chem Educ*, v.2, pp.1-21, 1997.

KIKUAKI T., SHIGENORI K. and YOSHIO. “Thermomechanics of transformation pseudoelasticity and shape memory effect in alloys”. *International Journal of Plasticity*, v. 2(1), pp. 59-62, 1986.

KIM, B.; LEE, M.; LEE, Y.; KIM, Y.; LEE, G. “An earthworm-like micro robot using shape memory alloy actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 125, pp. 429–437, 2006.

KOHL M., KREVET B. and JUST E. “SMA Micro-gripper system”. *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 97-98, pp. 646-652, 2002.

LA CAVA, C. A. P. L., SILVA, E.P., MACHADO, L. G. “Modelagem de dispositivos mecânicos fabricados de ligas com memória de forma”. Rio de Janeiro: CEFET, 1999.

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

LESTER B.T., BAXEVANIS T., CHEMISKY Y., LAGOUDAS D.T. “Review and Perspectives: Shape Memory Alloy Composite Systems”. *Acta Mechanica,* v. 226(12), pp. 3907-3960, 2015.

LIU Y., LIU Y. and HUMBEECK J.V. “Two-Way Shape Memory Effect Developed by Martensite Deformation in NiTi”, *Acta materialia*, v. 47(1), pp. 199-209, 1999.

MONTEIRO P.C.C, SAVI M.A., NETTO T.A. and PACHECO P.M.C.L. “Phenomenological Description of the Thermomechanical Coupling and the Rate-dependent Behavior of Shape Memory Alloys”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 20, Nº 14, pp. 1675-1687, 2009.

MONTEIRO P.C.C., SILVA L.L., NETTO T.A. and SAVI M.A. “Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance”. *Sensors and Actuators A: Physical*, v. 199(1), pp. 254–259, 2013.

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*, pp.1–13, 2016.

MORUYA Y.H., KIMURA S., ISHIHIZAKI S., HASHIZUME S., SUZUKI H., and SAMPEI T. “Properties of Fe-Cr-Ni-Mn-Si(Co) shape memory alloys”. *J. Physique IV*, colloque C4, suppl. J. Physique III, v. 1, C4-443, 1991.

NAMAZU, T.; HASHIZUME, A.; INOUE, S. “Thermomechanical tensile characterization of Ti–Ni shape memory alloy films for design of MEMS actuator”. *Sensors and Actuators A*, v. 139, pp. 178–186, 2007.

NESPOLI A., BESSEGHINI S., PITTACCIO S., VILLA E., VISCUSO S. “The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical Devices: A review on shape memory alloy mini-actuators”. *Sensors and Actuators A*, v. 158, pp. 149–160, 2010.

OLIVEIRA, S; Um modelo constitutivo tridimensional para descrever os efeitos de memória de forma e pseudoelástico em ligas com memória de forma, Dissertação de D.Sc., COPPE UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008.

ORTIZ M., PINSKY P.M. and TAYLOR R.L. “Operator split methods for the numerical solution of the elastoplastic dynamic problem”. *Comput Methods Appl Mech Eng*, v. 39, pp. 137–157, 1983.

OTSUKA, K.; REN, X. “Recent developments in the research of shape memory alloys”. *Intermetallics*, v. 7, pp. 511–528, 1998.

PACHECO P.M.C.L., OLIVEIRA P.S.F., AGUIAR R.A.A., BARROS S. “Modelling Bonded Shape Memory Alloy Vibration Attenuators Elements Using the Finite-Element Method”. T*he Journal of Adhesion*, v. 91 (10-11), pp. 883-908, 2015.

PAIK J.K. and WOOD R.J. “A bidirectional shape memory alloy folding actuator”. *Smart Mater. Struct*, v. 21 (6), pp. 065013-065021, 2012.

PAIVA A., SAVI M.A., BRAGA A.M.B. and PACHECO P.M.C.L. “A Constitutive Model for Shape Memory Alloys Considering Tensile-Compressive Asymmetry and Plasticity.” *International Journal of Solids and Structures*, v. 42(11-12), pp. 3439-3457, 2005.

PAIVA A., SAVI M.A., e PACHECO P.M.C.L. “Modelos Constitutivos para Ligas com Memória de Forma”. São Paulo: Série Arquimedes, v.2, pp. 1-30, 2003.

PAIVA, A. e SAVI, M.A. “An overview of constitutive models for shape memory alloys”. *Mathematical Problems in Engineering*, v. 1, 2006.

PEREIRA, J. Um estudo termomecânico em atuadores com ligas com memória de forma, Dissertação de M.Sc., CEFET/RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2009.

PICCINI, M.; TOWE, B. “A shape memory alloy microvalve with flow sensing”. *Sensors and Actuators A*, v. 128, pp. 344–349, 2006.

REIS, P. K. P; Desenvolvimento de calibração de modelos tridimensionais em elementos finitos para aplicações com ligas de memória de forma, Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2014.

ROMANO, R.; TANNURI, E. A. “Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma”. *Revista Controle & Automação*, v.19 no.1, pp. 30-42, 2008.

SATO A., CHISHIMA E., SOMA K. and MORI T. “Shape memory effect in $\gamma \leftrightarrows \epsilon$ transformation in Fe-30Mn-1Si alloy single crystals”. *Acta Metallurgica*, v. 30(6), pp. 1177-1183, 1982.

SAVI M.A., PAIVA A., BAÊTA-NEVES A.P. and PACHECO, P.M.C.L. “Phenomenological Modeling and Numerical Simulation of Shape Memory Alloys: A Thermo-plastic-phase Transformation Coupled Model”. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 13(5), pp. 261-273, 2002.

SAVI M.A. and PAIVA A. “Describing Internal Subloops due to Incomplete Phase Transformations in Shape Memory Alloys.” *Archive of Applied Mechanics*, v. 74(9), pp. 637 – 647, 2005.

SILVA, L. L., MONTEIRO, P. C., SAVI, M. A. and NETTO, T. A. “On the Nonlinear Behavior of the Piezoelectric Coupling on Vibration-Based Energy Harvesters”, *Shock and Vibration*, v. 2015, pp. 1-15, 2015(a).

SILVA, L.L., OLIVEIRA, S.A., PACHECO, P.M.C.L. and SAVI, M.A., “Synergistic Use of Smart Materials for Vibration-Based Energy Harvesting”, *European Physical Journal – Special Topics*, v. 224(14-15), pp.3005-3012, 2015(b).

SPAGGIARI A., SCIRè Mammano G. and DRAGONI E., “Optimum Mechanical Design of Binary Actuators Based on Shape Memory Alloys”, *Smart Actuation and Sensing Systems – Recent Advances and Future Challenges*, 2012.

STRITTMATTER J., GUMPEL P., “Shape memory actuator for hydraulic valve” ACTUATOR Proc. of 9th International Conference on New Actuators, 2004.

SOFLA Y. N., ELZEY D.M. and WADLEY H. N. G., “Two-way Antagonistic Shape Actuation Based on the One-way Shape Memory Effect”, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 24, 2008.

VILLARINHO, D.J. SCHEFFER, L.; SAUERESSIG, M.G.; MACEDO, B.R.; BALDISSERA, D.; MACEDO NETO, A.V.; “Liga com memória de forma: estudo preliminar do grampo de Judet de nitinol e sua possível aplicação em tórax instável”, 2010. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/28983>

ZHANG J.J. and YIN Y.H. “SMA-based bionic integration design of self-sensor actuator-structure for artificial skeletal muscle”, *Sensors and Actuators A*, v. 181, pp. 94–102, 2012.

WADA K., LIU Y., “Factors affecting the generation of stress-assisted two-way memory effect in NiTi shape memory alloy”, *Journal of Alloys and Compounds*, v. 400(1–2), pp. 163–170, 2005.

WILDE K., GARDONI P. and FUJINO Y., “Base isolation system with shape memory alloy device for elevated highway bridges”, *Engineering Structures*, v. 23(3), pp. 222–229, 2000.