



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Felipe Silva Lima

**DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR TORCIONAL BASEADO EM
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi APLICADO EM UM
DISPOSITIVO DO TIPO LEME AERONÁUTICO**

JOÃO PESSOA, PB

2023

Felipe Silva Lima

**DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR TORCIONAL BASEADO EM
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi APLICADO EM UM
DISPOSITIVO DO TIPO LEME AERONÁUTICO**

Versão original

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Dinâmica e Controle de Sistemas Mecânicos

Versão corrigida contendo as alterações solicitadas pela comissão julgadora em 31 de Maio de 2023. A versão original encontra-se em acervo reservado na Biblioteca da PPGEM-UFPB e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da UFPB (BDTD)

Orientador: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA, PB

2023

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

L732d Lima, Felipe Silva.

Desenvolvimento de um atuador torcional baseado em ligas com memória de forma NiTi aplicado em um dispositivo do tipo leme aeronáutico / Felipe Silva Lima. - João Pessoa, 2023.
173 f. : il.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.
Tese (Doutorado) - UFPB/CT.

1. Ligas - Materiais inteligentes. 2. Ligas com Memória de Forma. 3. Atuadores torcionais. 4. Molas helicoidais de torção. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

CDU 669.055(043)

VITAE DO CANDIDATO

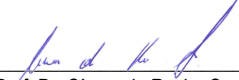
- Bacharel em Engenharia Mecânica pela UFCG (2017);
- Mestre em Engenharia Mecânica pela UFCG (2019).

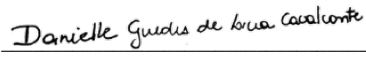


Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado e Doutorado

1 ATA DA DEFESA PÚBLICA DA TESE DE DOUTORADO DO ALUNO **FELIPE SILVA LIMA** DO PROGRAMA DE PÓS-
2 GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DO CENTRO DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA
3 PARAÍBA. Aos trinta e um (31) dias do mês de maio do ano de dois mil e vinte e três (2023), às 8:30, por
4 videoconferência, teve lugar a apresentação e defesa da Tese intitulada "**DESENVOLVIMENTO DE UM ATUADOR**
5 **TORCIONAL BASEADO EM LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi APLICADO EM UM DISPOSITIVO DO TIPO**
6 **LEME AERONÁUTICO**" pelo aluno **FELIPE SILVA LIMA**, com vistas à obtenção do título de Doutor em Engenharia
7 Mecânica. A banca examinadora foi composta pelos seguintes professores: Dr. Cicero da Rocha Souto – UFPB
8 (Orientador), Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcante – UFPB (Examinadora Interna), Dr. Rodinei Medeiros Gomes
9 – UFPB (Examinador Interno), Dr. André Fellipe Cavalcante Silva – IFPB (Examinador Externo) e Dr. Carlos José de
10 Araújo – UFCG (Examinador Externo), tendo sido presidida, por indicação dos seus membros, pelo Professor Dr.
11 Cicero da Rocha Souto. Instalada a Banca Examinadora, o Senhor Presidente passou a palavra ao aluno para
12 apresentar a defesa do seu trabalho de tese e este iniciou a apresentação declarando perante a Banca Examinadora
13 e o público presente que o trabalho que irá apresentar é original e de sua autoria. A exposição oral iniciou às 8:36
14 horas, sendo concluída às 9:55 horas, tendo sido iniciada, logo a seguir, a arguição pelos examinadores, finalizando
15 às 11:50 horas. Em seguida, o Senhor Presidente convidou a banca examinadora a reunir-se reservadamente para
16 deliberação. Concluída a reunião, o Senhor Presidente convocou o aluno e os demais presentes para proclamar o
17 resultado, tendo sido atribuído, por unanimidade, ao doutorando o conceito "Aprovado", nos termos do Regulamento
18 Geral dos Cursos e Programas de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade Federal da Paraíba (Resolução no
19 34/2014-CONSEPE) e do Regulamento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de
20 Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (Resolução nº 66/2015-CONSEPE). Ao final da sessão, após os
21 agradecimentos por parte do aluno, o Senhor Presidente, por recomendação dos membros da banca, estabeleceu um
22 prazo máximo de trinta dias para o doutorando providenciar as correções sugeridas, ficando a emissão do diploma do
23 título de Doutor condicionada a essas retificações que serão verificadas pelo orientador. Sem mais a tratar, os
24 trabalhos foram concluídos às 12:00 horas com a lavratura da presente ata que vai assinada pelos membros da
25 banca examinadora.

João Pessoa, 31 de maio de 2023.


Prof. Dr. Cicero da Rocha Souto
Orientador


Prof. Dra. Danielle Guedes de Lima Cavalcante
Examinadora Interna


Prof. Dr. Rodinei Medeiros Gomes
Examinador Interno


Prof. Dr. André Fellipe Cavalcante Silva
Examinador Externo


Prof. Dr. Carlos José de Araújo
Examinador Externo

*A todos aqueles que acreditam em um sonho e lutam por ele, em especial ao meu Avô José
de Sousa Lima (in memoriam)*

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar os trabalhos deste Doutorado, deparo-me com esta seção ainda em branco, que talvez seja a mais difícil de escrever. O período de doutoramento é relativamente longo e apesar de ser um produto de responsabilidade e natureza individual, existe um entorno de pessoas, que diária ou esporadicamente, cooperaram para uma conclusão exitosa, seja diretamente no trabalho ou no bem-estar emocional. Desta forma, a dificuldade reside em conseguir expressar toda a gratidão em tão poucas linhas, de qualquer modo, deixo registrado abaixo as minhas palavras de gratidão.

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus e a Virgem Maria, pelo privilégio da vida, por sua graça, misericórdia e amor, ainda mais valorizada pois jamais imaginei viver um período de pandemia, causado pelo coronavírus levando ao falecimento de muitas pessoas próximas e distantes. Com o conforto e o acalento de Deus, assim como o poder da fé é possível ter forças para continuar a trilhar os caminhos irresistíveis do conhecimento e da ciência.

É dito popular que para toda escolha há uma renúncia. Ao escolher trilhar esse caminho a compreensão da minha família, principalmente quanto as faltas, foi essencial. Agradeço imensamente aos meus pais, Maria e Joselito, e minha irmã, Ana, por todo amor, carinho, dedicação, zelo, preocupação, cuidado e apoio, principalmente nos momentos mais difíceis, amenizando meu desgaste físico e mental. Vocês são os meus bens mais preciosos, a minha ausência justificada pelas obrigações da vida jamais afastará minha presença no coração de vocês.

Agradeço ao Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto, por ter aceitado me orientar mesmo a alguns quilômetros de distância. Muito obrigado pela sua contribuição técnica ao longo do desenvolvimento dessa Tese. Também agradeço por ter me oferecido palavras de confiança e por sempre acreditar no meu potencial, em especial nos momentos em que as coisas não corriam como o esperado. Referência de profissionalismo, dedicação, insistência e paciência. Além destes, a amizade e o apreço serão sempre as marcas destes anos juntos.

Ao Prof. Dr. Carlos José de Araújo que, além de disponibilizar-me toda infraestrutura do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LAMMEA/UFCG), desde o começo deste trabalho, tomei como referência de seriedade e competência. Suas

poucas, porém, sempre bem colocadas intervenções foram essenciais para que eu conseguisse dar sentido aos meus pensamentos, não raro caóticos.

Agradeço aos amigos que a convivência nestes anos no LASEA/UFPB me proporcionou: Alan, Ângelo, José Marques, Wendell, Gabriel, Gustavo, Henrique e Robério, pela colaboração e acolhimento. Ao amigo e colega de doutorado, Alysson Silvestre. Uma das melhores pessoas que conheci. Obrigado pela amizade, pelo encorajamento e por sempre poder contar para “trocar uma ideia” sobre conhecimentos específicos ou coisas do dia a dia.

Aos amigos que tive a felicidade e honra de fazer no LAMMEA/UFCG, em especial a Paulo César (PC), Antônio (Toni), Carlos Eduardo (Ganso), Railson (Pandão), Diego (Diegão), Ícaro, Zé Henrique, Jailson, Francisco, Leonardo (Nikele), Daniel, Estephanie, Suzana e Magna. É difícil expressar a alegria de ter compartilhado incríveis momentos de trabalho e aprendizado ao longo desses anos, sem esquecer é claro dos momentos de descontração e confraternização.

Sinto-me no compromisso de agradecer aos integrantes do Laboratório de Vibração e Instrumentação (LVI/UFCG), com créditos ao Professor Dr. Antonio Almeida Silva e em singular aos colegas Yuri (Mano Walter), Sávyo (Mago), Fabrício, Vínicius (Gordinho), Gabriel, Igor (Tartaruga), Handerson, Antônio, Márcio (Contrapeso) e Abner pelos auxílios na operação de equipamentos, rodas de conversas e prestatividade quando mais precisei.

Nesse caminho do doutorado quero fazer um agradecimento especial a três grandes pessoas: João Manoel, Kaline e Ricardo, pela amizade, conselhos, risos e dicas de vida durante os translados de Campina Grande – João Pessoa. Esses instantes apesar de cansativos ficaram muito agradáveis com a presença de vocês. Foram contribuições pontuais que facilitaram alguns momentos difíceis.

Talvez sorte, talvez não, contudo tive a oportunidade de trabalhar com uma pessoa que considero um gênio e que sem ele eu com certeza não teria progredido a capacidade que tenho hoje. Um engenheiro nato, nasceu para isso e que muito me ajudou tanto em momentos complicados de meus desenvolvimentos, quantos nas dificuldades da vida. Muito obrigado Andersson Oliveira.

Aos membros da banca, Profs. Drs. André Felipe Cavalcante Silva, Carlos José de Araújo, Rodinei Medeiros Gomes e Danielle Guedes de Lima Cavalcante, pela disposição e nutritiva contribuição prestada frente ao meu trabalho.

À toda equipe de suporte do Centro de Energias Renováveis (CEAR/UFPB), em particular ao técnico da oficina mecânica, Sérgio Pessoa de Lima, pelo alto nível de profissionalismo dado no desenvolvimento dos dispositivos utilizados na realização deste trabalho. Da mesma forma, ao técnico do UAEM/UFCG, Cícero Lima, pela incansável ajuda em buscar as soluções técnicas na construção dos sistemas mecânicos.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM) do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), instituição que tive o privilégio de conhecer e participar, pelo amadurecimento profissional e por me dar uma das melhores experiências de vida. Aos servidores Thiago e Mônica, que com profissionalismo muito fizeram para o melhor atendimento de nós, pós-graduandos, seja com a atenção aos requisitos burocráticos ou mesmo por todos os recursos que possibilitaram a execução deste trabalho de pesquisa.

Meu carinho especial a colaboradora Sônia Costa (LAMMEA/UFCG), por disponibilizar sempre condições propícias de higiene laboratorial que permitiram a realização de qualquer tarefa de natureza acadêmica.

Agradeço também à agência de fomento à pesquisa, CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo financiamento integral deste projeto por meio da bolsa de doutorado e por valorizar não apenas a minha pesquisa, mas também as pesquisas de muitos outros brasileiros, incentivando o desenvolvimento do país.

Apesar de amizade não ser algo a ser agradecido, pois amigos não se escolhem e sim se conquistam e cativam pelas afinidades em comuns, meu obrigado especial, aos amigos de uma vida inteira e àqueles que fiz durante esta jornada. Para comemorar as pequenas vitórias ou para chorar os tropeços, mesmo não colaborando diretamente na área técnica, dirigiram suas boas energias, pensamentos, orações, palavras e intenções em favor da concretização de um sonho.

Infelizmente, não há espaço suficiente para agradecer tantos outros amigos, colegas, familiares, professores e pessoas. Talvez eu não consiga dar um pouco do tom nesse texto, contudo posso assegurar com exatidão, que todas as contribuições, ainda que anônimas, representaram um ganho expressivo no tamanho do meu saber e me capacitaram para o desenvolvimento de novos projetos desafiadores que ocorrerão doravante.

Mais uma vez, agradeço-lhes todo apoio e desejo que Deus abençoe todos vocês.

Felipe Silva Lima

“Bom mesmo é ir à luta com determinação, abraçar a vida e viver com paixão, perder com classe e vencer com ousadia, pois o triunfo pertence a quem mais se atreve. E a vida é muito para ser insignificante.”

(Charles Chaplin)

“A tarefa de viver é dura, mas fascinante.”

(Ariano Suassuna)

RESUMO

Lima, F. S. **Desenvolvimento de um atuador torcional baseado em ligas com memória de forma NiTi aplicado em um dispositivo do tipo leme aeronáutico.** 2023. 174 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, João Pessoa, 2023.

O grau de maturidade na área de materiais e estruturas inteligentes é comprovado pela existência de amplo esforço em pesquisas com expectativa ao desenvolvimento de produtos industriais. Apesar das diferentes opções presentes, as Ligas com Memória de Forma (LMF) têm recebido grande atenção devido à facilidade de uso em atuadores de movimento, microcontroladores e sensores. Essas ligas exibem duas propriedades fundamentais: a Superelasticidade (SE) e o Efeito Memória de Forma (EMF), que são advindos de uma transformação de fase do tipo austenita/martensita. Os atuadores desse material são relativamente leves, de fabricação simples e têm a capacidade de produzir elevadas cargas de atuação, por intermédio de aplicação controlada de calor. Como consequência, esses materiais podem ser empregados na concepção de diversos sistemas de engenharia substituindo atuadores hidráulicos, pneumáticos e elétricos, com a possibilidade de uso em escalas microscópicas, acrescido à flexibilidade projetiva. Considerando essas questões, o presente trabalho é dedicado à fabricação e avaliação do comportamento termomecânico de molas helicoidais torcionais de LMF do sistema NiTi, que combinam o efeito SE/EMF quando acionadas. Uma confirmação da efetividade do conceito é demonstrada construindo-se um protótipo de leme aeronáutico para verificação de suas propriedades funcionais. Antes desta estratégia foram feitos estudos prévios direcionadas a caracterização dos fios de LMF precursores, seguido de testes para extrair informações sobre a dinâmica exposta por molas de torção de LMF NiTi. Neste contexto, merece destaque a concepção de um novo sistema com o intuito de mensurar a força gerada por cada mola. Os resultados mostram as condições em que é possível obter as maiores capacidade de atuação, especificamente ao eleva-se o diâmetro de fio e espira, associados a grandes deslocamentos angulares. Foi possível obter diferentes configurações de curvatura do leme ao inverter o sentido de acionamento. Com efeito, registrou-se deslocamentos longitudinais máximos de 30° quando o movimento é executado em direção a esquerda e 40° no sentido oposto. Sob muitos aspectos, ainda há desafios tecnológicos importantes a serem superados antes da consolidação prática de molas de torção de LMF NiTi; contudo, esta proposta apresenta potencial e não pode ser descartada.

Palavras-chaves: Materiais inteligentes. Ligas com Memória de Forma. Atuadores torcionais. Molas helicoidais de torção.

ABSTRACT

Lima, F. S. **Development of shape memory alloy torsional actuator for applications in rudder aircraft**. 2023. 174 p. PhD Thesis – Graduate Program in Mechanical Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, 2023.

The maturity degree in the field of smart materials and structures is evidenced by the extensive research efforts aimed at the development of industrial products. Among the various options available, Shape Memory Alloys (SMAs) have received considerable attention due to their ease of use in motion actuators, microcontrollers, and sensors. These alloys exhibit two fundamental properties: Superelasticity (SE) and Shape Memory Effect (SME), which arise from an austenite/martensite phase transformation. Actuators made from these materials are relatively lightweight, easy to manufacture, and have the ability to generate high actuation forces through controlled application of heat. As a result, these materials can be employed in the design of various engineering systems, replacing hydraulic, pneumatic, and electric actuators, with the possibility of use at microscopic scales, coupled with design flexibility. In this context, the aim of the present study is dedicated to the fabrication and evaluation of the thermo-mechanical behavior of torsion helical springs made from NiTi-based Shape Memory Alloys, which exhibit the combined SE/SME effect when activated. The effectiveness of this concept is demonstrated by constructing a rudder prototype to verify its functional properties. Prior to this strategy, preliminary studies were conducted to characterize the NiTi SMA wires, followed by tests to extract information about the dynamics exhibited by NiTi SMA torsion springs. Notably, the design of a new system for measuring the force generated by each spring deserves attention. The results demonstrate the conditions under which the highest actuation capabilities can be achieved, specifically by increasing the wire diameter and number of turns, associated with large angular displacements. Different curvature configurations of the rudder were obtained by reversing the direction of actuation. Consequently, maximum longitudinal displacements of 30° were recorded when the movement was executed towards the left and 40° in the opposite direction. There are still significant technological challenges to be overcome before the practical consolidation of NiTi SMA torsion springs; however, this proposal shows potential and should not be disregarded.

Keywords: Smart materials. Shape memory alloys. Torsional actuators. Helical torsion spring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações e patentes coletados na plataforma Scopus com a palavra-chave: atuadores de Liga com Memória de Forma	34
Figura 2 – Progressão no desenvolvimento de atuadores de torção construídos em diferentes materiais	35
Figura 3 – Aplicações de LMF existentes e potenciais no domínio aeroespacial . .	36
Figura 4 – Evolução da fração de martensita (ξ) com a temperatura em LMF . . .	42
Figura 5 – Ciclo de carregamento termomecânico representando as transformações da LMF e seu comportamento de memória de forma	43
Figura 6 – Efeito memória de forma reversível (EFMR) e sua respectiva curva tensão-deformação-temperatura	44
Figura 7 – Curvas tensão-deformação representando as transformações da LMF e o efeito superelástico	45
Figura 8 – Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LMF	46
Figura 9 – Diagrama esquemático do EMF criado a partir da reversão da martensita induzida por tensão	48
Figura 10 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador de um sentido	51
Figura 11 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador <i>bias</i>	52
Figura 12 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador de dois sentidos (Antagônico)	52
Figura 13 – Modelo de um protótipo de uma mão com atuadores de LMF a base de NiTi : (a) Modelo em CAD e (b) Protótipo da mão desenvolvida	54
Figura 14 – Conceito para um dispositivo de entrega de drogas sólido	54
Figura 15 – (a) Esquema da prótese ocular orbital acionada por LMF e (b) Esquema de prótese de dedo a partir de um atuador híbrido LMF-Motor CC . .	55
Figura 16 – Endoscopia utilizando LMF como atuador	56
Figura 17 – Protótipo virtual da estrutura da seção adaptativa da asa acionada por molas de LMF	57

Figura 18 – Atuador rotacional com tubo LMF	57
Figura 19 – Testes de voo em escala real do mecanismo VGC acionado por LMF em um Boeing 777-300ER	58
Figura 20 – Sistema de atuação de painéis baseado em tiras de LMF	59
Figura 21 – Garra atuada por LMF utilizada para limpeza de campos minados . .	60
Figura 22 – Projeto de um robô bio-inspirado : (a) Componentes do protótipo e (b) Morcego bio-inspirado com dois ombros e cotovelos acionados por LMF	61
Figura 23 – Detalhe de elemento com seção transversal circular sujeito a momentos de torção	62
Figura 24 – Representação do plano de ação do atuador e associação de suas partes constituintes	62
Figura 25 – (a) Detalhe do corte de seção exibindo as partes do atuador e (b) Atuador com fio de NiTi instalado	63
Figura 26 – Configuração experimental para o atuador utilizado no estudo: (a) Atuador de torção LMF proposto em fase de martensita e austenita e (b) Experimento: 1 – Computador, 2 – Fonte de potência, 3 – Câmera, 4 – Fio de LMF, 5 – Eixo de plástico, 6 – Fixador	64
Figura 27 – Representação esquemática do método de fabricação de um atuador de torção constituído por fio de NiTi e matriz polimérica	65
Figura 28 – (a) Esquema do atuador modular utilizando fios de LMF e os respec- tivos estados termomecânicos e (b) Protótipo de atuador de torção compreendendo uma unidade de atuação e dois	66
Figura 29 – (a) estrutura do atuador e seu ciclo de trabalho e (b) Movimento ocasionado pela passagem da corrente elétrica sobre os microfios de nitinol	66
Figura 30 – Configurações dos atuadores rotativos LMF bidirecionais	67
Figura 31 – Protótipo do atuador bidirecional LMF	68
Figura 32 – Modelo esquemático do experimento da fita de LMF proposto para o dispositivo	69
Figura 33 – Vista esquemática de uma unidade de atuação	69
Figura 34 – (a) Representação CAD (parte superior) e protótipo fabricado (parte inferior) do atuador LMF e (b) Protótipo do dispositivo de ancoragem com atuação torcional	70

Figura 35 – (a) Esquema do protótipo e (b) Modelo do atuador torcional com molas de LMF	71
Figura 36 – Atuador em LMF: (a) esquema do modelo em CAD do atuador bioinspirado com seus componentes integrados e (b) representação do protótipo real	71
Figura 37 – Painel solar: (a) Mecanismo de abertura e (b) representação do protótipo CubeSat	72
Figura 38 – (a) Detalhe conceitual do atuador torcional para aplicação em um Winglet e (b) Atuador LMF e elástico linear em destaque	73
Figura 39 – Modelo 3D impresso em PLA com adição de mola torcional: (a) Montagem das falanges distal e media e (b) Perpendicularidade da base do protótipo do dedo humanoide	74
Figura 40 – Nervura impressa em PLA com detalhe para o posicionamento da mola torcional de NiTi	74
Figura 41 – Nervura flexível para controle de arqueamento, destacando tubos de torção em LMF	76
Figura 42 – Renderização do atuador de 2.260 N.m e (b) Dispositivo real conectado à bancada de teste do F/A-18	77
Figura 43 – Atuador de LMF baseado em fio retorcido disposto em uma configuração antagonista	78
Figura 44 – (a) Tipos de atuadores torcionais de LMF com padrão de nervuras para uma trajetória de resistência máxima e (b) Posição sem acionamento e acionado do origami robótico	79
Figura 45 – (a) Esquema mecânico do processo de fabricação do atuador bidirecional e (b) detalhe do modo de atuação	80
Figura 46 – Representação esquemática do atuador desenvolvido em Ω	81
Figura 47 – Processo metodológico utilizado no desenvolvimento da pesquisa	83
Figura 48 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 1)	84
Figura 49 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 2)	85
Figura 50 – Curva esquemática típica do resultado de DSC de uma liga NiTi: (a) fio EMF e (b) fio SE	87
Figura 51 – Calorímetro DSC modelo Q20 da <i>TA Instruments</i> , com detalhe do interior	87

Figura 52 – Diagrama tensão-deformação típico de LMF NiTi superelástica seguindo a norma ASTM F2516	89
Figura 53 – Desenho esquemático da máquina de ensaios universal marca Instron modelo 5582. Detalhe mostrando corpo de prova	90
Figura 54 – Desenho esquemático do sistema eletromecânico Instron 5582. Detalhe mostrando corpo de prova montado dentro da câmara térmica	91
Figura 55 – Fluxograma de fabricação de molas torcionais de NiTi	92
Figura 56 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 3) . . .	93
Figura 57 – Mapeamento de parâmetros das molas torcionais produzidas: (a) Balança eletrônica e (b) Régua milimetrada	94
Figura 58 – Esquema dos dispositivos empregados no ensaio RET	95
Figura 59 – Arranjo experimental esquemático para geração de força em molas de torção de LMF NiTi	96
Figura 60 – Célula de carga utilizada na plataforma experimental	97
Figura 61 – Circuitos Eletrônicos: (a) Circuito condicionador de sinais para calibração da célula de carga e (b) Circuito amplificador de corrente	97
Figura 62 – Fonte de alimentação <i>Agilent E3648</i>	98
Figura 63 – Motor de para-brisa empregado na movimentação da base experimental	99
Figura 64 – Sistema de aquisição e controle de dados NI – cDAQ-9174	100
Figura 65 – Partes principais dos suportes mecânicos fabricados com Teflon® . . .	101
Figura 66 – Vista da bancada experimental desenvolvida, com detalhe para disposição da mola	103
Figura 67 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 4) . . .	103
Figura 68 – (a) Representação esquemática da empenagem vertical e (b) Projeção em perspectiva do leme aeronáutico desenvolvido	104
Figura 69 – Princípio de operação dos atuadores do modelo conceitual	105
Figura 70 – Diagrama esquemático da configuração experimental para o acionamento do leme	107
Figura 71 – Detalhe da bancada de teste de acionamento	108
Figura 72 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 5) . . .	109
Figura 73 – Termogramas DSC como recebido e após o tratamento térmico de fios NiTi: (a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm	111

Figura 74 – Temperaturas de transformação de fase obtidas via DSC em função do diâmetro de fios NiTi: (a) Como recebida e (b) Tratado	114
Figura 75 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 0,9 mm	115
Figura 76 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 1,2 mm	116
Figura 77 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 1,5 mm	116
Figura 78 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 0,9 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio	117
Figura 79 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 1,2 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio	118
Figura 80 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 1,5 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio	118
Figura 81 – Curvas de tensão crítica de transformação em função da temperatura de ensaio para o fio de LMF NiTi	119
Figura 82 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 0,9 mm (M8)	121
Figura 83 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,2 mm (M8)	121
Figura 84 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,5 mm (M8)	122
Figura 85 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 0,9 mm (M10)	122
Figura 86 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,2 mm (M10)	123
Figura 87 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,5 mm (M10)	123
Figura 88 – Sinais de corrente elétrica fornecidos às molas de torção de LMF NiTi: (a) 0,9(M8), (b) 0,9(M10), (c) 1,2(M8), (d) 1,2(M10), (e) 1,5(M8) e 1,5(M10)	125
Figura 89 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 0,9 mm: (a) M(8) e (b) M(10)	126
Figura 90 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 1,2 mm: (a) M(8) e (b) M(10)	126
Figura 91 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 1,5 mm: (a) M(8) e (b) M(10)	127

Figura 92 – Curva característica tradicionalmente captada em um ensaio de geração de força	128
Figura 93 – Comportamento da força gerada por molas de torção de LMF NiTi do tipo M8 em função do ângulo: (a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm . .	129
Figura 94 – Comportamento da força gerada por molas de torção de LMF NiTi do tipo M10 em função do ângulo: (a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm .	130
Figura 95 – Força útil gerada para molas de torção de LMF NiTi	132
Figura 96 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A	135
Figura 97 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A	136
Figura 98 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento esquerda-direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A	137
Figura 99 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento direita-esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A	138
Figura 100 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado . . .	139
Figura 101 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado . . .	140
Figura 102 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento esquerda-direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado	142
Figura 103 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento direita-esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado	143
Figura 104 – Representação de uma mola helicoidal torcional genérica e seus principais parâmetros	160

Figura 105–Representação exemplificando a variedade de configuração de molas torcionais	161
Figura 106–Representação gráfica dos parâmetros do material exigidos pelo mo- delo constitutivo em uma curva tensão-deformação correspondente ao comportamento SE, à esquerda, e EMF, à direita	167
Figura 107–Superfícies de controle e eixos de movimento em uma aeronave	171
Figura 108–Diagrama esquemático do conjunto empenagem vertical: 1 – estabiliza- dor vertical; 2 – leme	172
Figura 109–Superfície de controle com variação linear da corda	173

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Visão geral das principais propriedades da liga NiTi	49
Tabela 2 – Comparação entre as performances dos atuadores	50
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do fio de NiTi utilizado no trabalho	86
Tabela 4 – Parâmetros das molas torcionais produzidas	93
Tabela 5 – Dados geométricos da empenagem vertical idealizada	105
Tabela 6 – Temperaturas de transformação de fase dos fios de NiTi	112
Tabela 7 – Comparação entre os coeficientes de influência de tensão para cada fio estudado	120

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Composição das principais famílias de LMF	48
Quadro 2 – Descrição das propriedades mecânicas para o EMF de acordo com o modelo Souza– Auricchio	168
Quadro 3 – Descrição das propriedades mecânicas para o SE de acordo com o modelo Souza– Auricchio	168

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABS	Acrilonitrila Butadieno Estireno
Ansys	<i>Analysis Systems Incorporated</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
AVE	<i>Advanced Video Extensometer</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CASPART	<i>Consortium for the Advancement of Shape Memory Alloy Research and Technology</i>
CC	Corrente Contínua
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
DMA	<i>Dynamic Mechanical Analysis</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
DSC	<i>Differential Scanning Calorimetry</i>
EMF	Efeito Memória de Forma
EMFR	Efeito Memória de Forma Reversível
EMFS	Efeito Memória de Forma Simples
EL_u	<i>Ultimate elongation</i>
EL_r	<i>Residual Elongation</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
HBM	<i>Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH</i>
IPMC	<i>Ionic Polymer Metal Composite</i>
LMF	Liga(s) com Memória de Forma

LPS	<i>Lower Plateau Strength</i>
LabVIEW	<i>Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench</i>
LAMMEA	Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas
LASEA	Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas
MATLAB	<i>MATrix LABoratory</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
NACA	<i>National Advisory Committee for Aeronautics</i>
NOL	<i>Naval Ordnance Laboratory</i>
PDMS	<i>Polydimethylsiloxane</i>
PETG	Politereftalato de Etileno Glicol
PTFE	Politetrafluoroetileno
PLA	Ácido Poliláctico
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
RET	Resistência Elétrica em Função da Temperatura
S.A	Sinal Analógico
S.D	Sinal Digital
SMA	<i>Shape Memory Alloy</i>
SSC	<i>Smart Soft Composite</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
SE	Superelasticidade
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

UPS *Upper Plateau Strength*

VGC *Variable Geometry Chevron*

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Fase austenítica
A_f	Temperatura de término da transformação austenítica
A_s	Temperatura de início da transformação austenítica
C	Índice de mola
d	Diâmetro de fio
D	Diâmetro médio da mola
E	Módulo de elasticidade
E_A	Módulo de elasticidade da austenita
E_M	Módulo de elasticidade da martensita
F_{UG}	Força útil gerada
G	Módulo de cisalhamento
h	Parâmetro de endurecimento do material
h_0	Comprimento indeformado da mola
H_t	Histerese térmica
k	Razão ou constante de mola
K	Módulo de compressão
K_i	Fator de Wahl – flexão
L	Comprimento
m	Massa
m	Parâmetro de Lode
M	Fase martensítica

M_d	Temperatura máxima para transformação martensítica induzida por tensão
M_f	Temperatura de término da transformação martensítica
M_s	Temperatura de início da transformação martensítica
N	Número de espiras
N_a	Número de espiras ativas
N_b	Número de espiras no corpo da mola
N_e	Número equivalente de espiras
r	Raio do domínio elástico
R	Estrutura cristalina romboédrica da fase intermediária
R_f	Temperatura de término da transformação de fase R
R_s	Temperatura de início da transformação de fase R
s	Parcela desviadora do tensor de tensões
t	Tempo
T	Temperatura
X	Força termodinâmica associada à deformação de transformação
$\mathbf{T}$	Tensão termodinâmica associada à deformação de transformação
α	Parâmetro de diferenciação entre carregamento sob tração e compressão
β	Parâmetro de escala da temperatura
ϵ	Deformação
ϵ_L	Máxima deformação de transformação
ϵ^{tr}	Deformação de transformação
ξ	Fração de martensita

σ	Tensão mecânica
σ_t	Tensões críticas uniaxial para a tração
σ_c	Tensões críticas uniaxial para a compressão
σ_f^{AM}	Tensão de término da transformação de austenita em martensita não-maclada
σ_s^{AM}	Tensão de início da transformação de austenita em martensita não-maclada
σ_f^{MA}	Tensão de término da transformação de martensita não-maclada para austenita
σ_s^{MA}	Tensão de início da transformação de martensita não-maclada para austenita
θ	Deflexão angular
ΔH	Entalpia de transformação por unidade de volume
ΔS	Entropia por unidade de volume
ν	Coefficiente de Poisson
τ_m	Parâmetro do material
Ψ	Potencial de energia livre
$J_{\epsilon L}$	Função indicatriz

Sumário

1	INTRODUÇÃO	29
1.1	<i>Contextualização</i>	29
1.2	<i>Justificativa</i>	33
1.3	<i>Objetivos</i>	36
1.3.1	Objetivo Geral	36
1.3.2	Objetivos Específicos	36
1.4	<i>Contribuições do Trabalho</i>	37
1.5	<i>Estrutura do Documento</i>	38
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	39
2.1	<i>Ligas com Memória de Forma</i>	39
2.1.1	Princípio de Funcionamento	39
2.1.2	Efeito Memória de Forma	42
2.1.3	Efeito Memória de Forma Reversível	43
2.1.4	Superelasticidade	44
2.2	<i>Atuadores LMF – Generalidades</i>	48
2.2.1	Atuadores LMF – Aplicações	53
2.3	<i>Atuadores Torcionais de LMF</i>	61
3	MATERIAIS E MÉTODOS	82
3.1	<i>Processo Metodológico</i>	82
3.2	<i>Fase 1 – Definição do problema</i>	82
3.3	<i>Fase 2 – Determinação de parâmetros e fabricação do atuador</i>	84
3.4	<i>Fase 3 – Caracterização do atuador</i>	92
3.5	<i>Fase 4 – Concepção, fabricação e avaliação experimental do protótipo</i>	103
3.6	<i>Fase 5 – Análise de dados e comparação dos resultados obtido</i>	108
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	110
4.1	<i>Caracterização de fios de LMF NiTi</i>	110
4.1.1	Ensaio Térmico de fios de LMF NiTi via DSC	110
4.1.2	Ensaio Mecânico de tração a temperatura ambiente	113

4.1.3	Ensaaios Mecânicos de tração a diferentes temperaturas	117
4.2	<i>Caracterização de molas de LMF NiTi</i>	120
4.2.1	Ensaaios Térmicos de molas de LMF NiTi via RET	120
4.2.2	Ensaaios Termomecânicos de geração de carga em molas de LMF NiTi	124
4.3	<i>Testes de Acionamento do Leme</i>	133
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	145
5.1	<i>Conclusões</i>	145
5.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros</i>	148
	REFERÊNCIAS ¹	150
	ANEXO A – Molas de torção de espiras helicoidais	160
	ANEXO B – Modelo constitutivo para a modelagem de LMF	164
	ANEXO C – Sistemas de controle de voo	170

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

1 INTRODUÇÃO

O propósito desta introdução é apresentar um atuador torcional baseado em ligas com memória de forma (LMF), sendo este elemento o eixo temático mais relevante da presente Tese de Doutorado. A fim de abordar a motivação e contexto contido no estudo, o manuscrito inicia com uma análise sucinta do que são materiais inteligentes com enfoque no emprego de LMF como atuadores, destacando suas funcionalidades e limitações, ademais é realçado o amplo campo de aplicação desta categoria de dispositivos, sobretudo em sistemas torcionais. Na sequência é identificada a abrangência, assim como a relevância do problema; perpassando pela descrição dos objetivos e principais contribuições da pesquisa. Finalmente, o capítulo se encerra explicitando a organização global do documento.

1.1 Contextualização

Na perspectiva atual, o ritmo acelerado de nossa sociedade estabelece a necessidade de desenvolvimento de novas tecnologias e renovação das já existentes, com exigências mais rigorosas a maximização da eficiência de sistemas operativos, de modo a elevar os níveis de produtividade e solucionar importantes desafios de engenharia.

Dentro desse contexto, não é surpreendente a ênfase dada pela indústria assim como a investigação do meio acadêmico no conhecimento e aproveitamento de materiais capacitados para funções especiais. Este último aspecto abarca os materiais denominados de inteligentes, definidos como materiais capazes de sofrer alterações controláveis de forma ou propriedades físicas, mediante a aplicação de um estímulo externo como: campo elétrico, magnético, térmico ou mecânico (GANDHI; THOMPSON, 1992; LEO, 2007; SOBCZYK et al., 2022).

Os materiais assim classificados 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 atuadores, sensores, transdutores e elementos estruturais, possibilitando o desenvolvimento de produtos mais precisos, funcionais, duráveis, adaptáveis e eficazes, com menores custos envolvidos (SOBCZYK et al., 2022; SUN et al., 2016).

Dessa forma, evidencia-se uma ininterrupta busca pelo emprego de materiais com características físicas que proporcionem a realização de múltiplas tarefas. Em linhas gerais, pode-se afirmar que, alguns dos materiais inteligentes mais conhecidos são os materiais piezelétricos, polímeros eletroativos, fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos, ligas com memória de forma (LMF), etc. Dentre esses, devido as propriedades intrínsecas, notabilizam-se as LMF, as quais podem indicar e, agir em tempo real, sobre as condições de um dado elemento estrutural com a possibilidade de controle integrado ao sistema, suscitando inúmeras aplicações (KOHL, 2004; LOEWY, 1997).

As LMF – em inglês, *Shape Memory Alloy (SMA)* são uma classe de ligas metálicas que possuem a habilidade de recuperar níveis consideráveis de deformação quando sujeitos a estímulos termomecânicos ou magnéticos (DUERIG; MELTON; STÖCKEL, 2013; LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1999). As propriedades das LMF devem-se as transformações termoelástica da martensita que suscitam tipos distintos de comportamentos termomecânicos e dentre os comportamentos particulares destacam-se o Efeito Memória de Forma (EMF) e a Superelasticidade (SE).

De forma resumida, EMF é o fenômeno no qual o material recupera seu estado ou forma original, após ter se deformado mecanicamente, com o aquecimento da liga até uma temperatura específica. Por sua vez, a SE consiste na recuperação de toda a deformação imposta sobre ele, acompanhado de um laço de histerese em um ciclo de carregamento-descarregamento. Essas propriedades são dependentes especialmente da composição, microestrutura e processamentos termomecânicos. Cabe lembrar, que estas magnitudes de deformação recuperável são tecnicamente superiores às que se pode obter com materiais metálicos tradicionais – aproximadamente 0,2%.

Estas qualidades atraíram o interesse tecnológico em uma ampla variedade de segmentos industriais, dos quais distinguem-se: aeroespacial (BARBARINO et al., 2014; COSTANZA; TATA, 2020; HARTL; LAGOUDAS, 2007), automotivo (STOECKEL, 1990; SHREEKRISHNA; NACHIMUTHU; NAIR, 2022), robótico (SREEKUMAR et al., 2007; RODRIGUE et al., 2017; RUTH et al., 2022), biomédico (MACHADO; SAVI, 2003; PETRINI; MIGLIAVACCA, 2011; ZAINAL; SAHLAN; ALI, 2015), infraestrutura (SOHN et al., 2023; ZAREIE et al., 2020), vestimentas (KIM et al., 2020; SRIVASTAVA et al., 2022), além de novos materiais ativos (CHOUDHARY; KAUR, 2016; GANGIL; SIDDIQUEE; MAHESHWARI, 2020). Dessas aplicações citadas para LMF, estima-se que 90% seja do

sistema binário NiTi. As bases para o sucesso deste composto intermetálico são suas ótimas propriedades mecânicas, elétricas, somado a estabilidade química (JANI et al., 2014).

As LMF do sistema NiTi vem sendo utilizadas principalmente na produção de atuadores termomecânicos, ou melhor, elementos que convertem energia térmica em deslocamento, acompanhado ou não da produção de trabalho mecânico (ELAHINIA, 2016; RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015; REYNAERTS; BRUSSEL, 1998). Em confronto aos sistemas convencionais de atuação, tais como os pneumáticos, hidráulicos e eletromagnéticos, os atuadores de LMF proporcionam alta densidade de potência e simplicidade de fabricação, viabilizando a redução de massa em projetos e o uso em escalas miniaturizadas (FUMAGALLI; BUTERA; CODA, 2009; HUMBEECK, 1999; JANI et al., 2014; NESPOLI et al., 2010). Ao mesmo tempo, estes atuadores dispõem de algumas limitações atribuída a dificuldade de controle devido à alta não linearidade (histerese), acrescido ao baixo desempenho dinâmico relacionado com o elevado tempo de resposta (MAVROIDIS, 2002).

Na sua essência, atuadores LMF têm como princípio de funcionamento o calor e podem ser aquecidos de distintas formas, radiação ou condução (atuadores térmicos) e por aquecimento indutivo ou resistivo (atuadores elétricos). Estes atuadores exibem diferentes formas geométricas, a saber: fios, molas, fitas, hastes, folhas e tubos. Ademais conseguem ser projetados para operar em tensão, compressão ou torção e produzir movimentos lineares ou rotativos, além de sofisticados dispositivos com o intuito de obter movimentos tridimensionais (HUANG, 1998).

Diversos trabalhos de investigação atuais direcionam-se para a análise de atuadores de LMF, enfatizando os efeitos não-lineares, instabilidades e outras particularidades projetivas, o que reforça a perspectiva que as LMF são extremamente sensíveis às mais sutis perturbações, e estimativas aproximadas de seu comportamento quanto atuador, envolvem uma análise aprofundada: da liga selecionada, configuração geométrica e operacional, método de ativação, estratégia de controle empreendida e desempenho em fadiga (EGGELER et al., 2004; ELAHINIA; ASHRAFIUON, 2002; HASAN; BAXEVANIS, 2022; HMEDE; CHAPELLE; LAPUSTA, 2022; HUANG, 2002; JANI; LEARY; SUBIC, 2017; TEH et al., 2008).

Além dos trabalhos expostos previamente, muitos esforços têm sido aplicados, simultaneamente, ao estudo de uma categoria especial de atuadores LMF, denominados de torcionais. Estes atuadores caracterizam-se pela propensão a rotação em torno do seu próprio eixo, agindo como relevante ferramenta, por exemplo, em sistemas rotativos, indis-

pensáveis no suprimento das necessidades modernas. Desta maneira, esse tema conquistou destaque na literatura nos últimos anos, notadamente, nos trabalhos propostos por Aziz e Spinks (2020), Benafan et al. (2019), Hu, Rabenoroosa e Ouisse (2021), Sansone et al. (2022), Stroud e Hartl (2020), Yuan et al. (2017), no qual há revisões críticas ressaltando o comportamento geral desta categoria de atuadores.

A maioria dos estudos referentes à atuadores torcionais em LMF concentram-se no comportamento termomecânico de componentes cilíndricos (BENAFAN et al., 2019; STROUD; HARTL, 2020; SANSONE et al., 2022). Um dos elementos que, ainda, demandam uma maior assimilação são as molas helicoidais de torção. Estas são exemplos comuns de molas mecânicas, as quais, armazenam energia potencial elástica, para produzir um deslocamento angular entre suas extremidades (BROWN, 1981; NORTON, 2013). As forças que atuam sobre as molas de torção são perpendiculares ao seu eixo, enquanto que, as molas de extensão e compressão, o esforço segue a mesma direção do eixo. Aquelas molas proveem vantagens como capacidade de trabalhar em ambas as direções, simplificação modular, uso eficiente do espaço, somado a redução do peso geral de produtos (KIM; SONG; JEON, 2020). Como tal, estes elementos têm sido amplamente utilizados em diversos produtos eletrônicos e áreas industriais, incluindo automóveis, aeronaves, brinquedos e máquinas (GONZÁLEZ; GARCÍA-MARTÍNEZ; MURO, 2019; ZHANG et al., 2021).

As produções científicas mais relevantes nesta matéria (molas de torção em LMF) são relativamente recentes. Seus estudos começaram com Yoshida et al. (1999) ao projetarem um sistema robótico modular auto-reconfigurável sustentado em um mecanismo acionado por um par de molas de torção em LMF. Salerno et al. (2013) examinou o emprego de um dispositivo de ancoragem transabdominal para execução de atividades cirúrgicas. Os pesquisadores conceberam uma plataforma dedicada, que explora um dispositivo, associado, com molas de torção em LMF, responsável pela alteração geométrica de todo conjunto. Já Sheng e Desai (2015) desenvolveram outro conceito, com a utilização do mesmo elemento mecânico inteligente supracitado, para atuação em uma junta robótica, em pequena escala. Este último ainda propõe uma formulação para descrever o comportamento da mola torcional em LMF, fundamentada na hipótese de pequenas deformações e materiais elásticos.

No presente estágio, alguns trabalhos nacionais também partilham a ênfase na aplicação de molas torcionais de LMF. Silva (2018) analisou dois modelos alternativos de atuação para dispositivos aeronáuticos: sistema mola-polia e o sistema com molas

torcionais. Em particular, também foi desenvolvido um modelo para molas de torção LMF que prevê as não linearidades constitutivas e geométrica. Logo após, Ferro (2018) elaborou um protótipo de um dedo humanoide com dimensões e formatos reais, projetado para utilizar molas de torção fabricadas de LMF como atuadores. Mais tarde, Santos (2019) concebeu, fabricou e avaliou experimentalmente um aerofólio adaptativo segmentado capaz de realizar variações arqueamento, a partir de molas de torção em LMF comerciais.

É importante destacar que diversos trabalhos exploraram as potencialidades das molas de torção LMF como atuadores, sobretudo na robótica, todavia nenhum trabalho apresenta o emprego desses dois efeitos em associação, isto é, o SE contribui com a parte passiva e o EMF colabora com a parte ativa de recuperação do atuador. Nesta perspectiva, ainda são raros os casos de aplicação prática dessa condição, como exemplo pode-se citar de modo preliminar a pesquisa empreendida por Casati, Vedani e Tuissi (2014) e as mais recentes através de Emiliavaca et al. (2018), Glücksberg, Soul e Yawny (2018), Sobrinho et al. (2020).

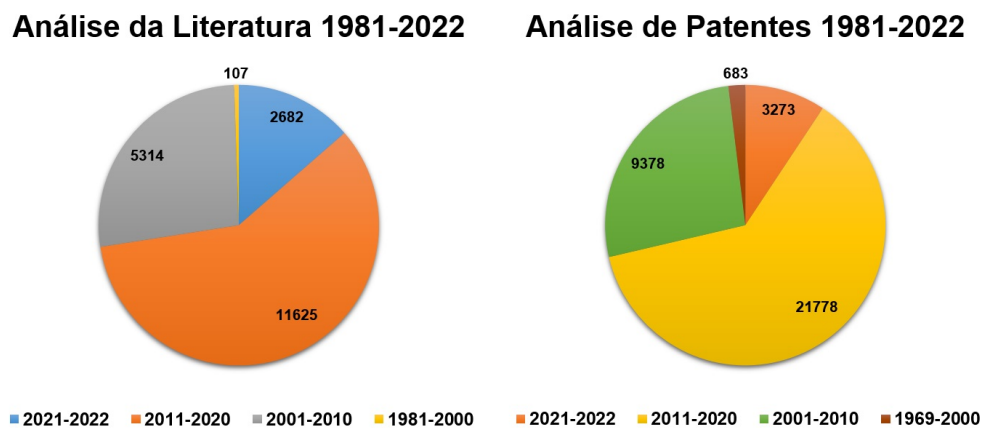
Neste contexto, o presente trabalho está comprometido com um estudo inovador, que teve como base a produção de molas torcionais LMF de NiTi sujeitas a ciclos de aquecimento/resfriamento e deformação para gerar o movimento rotacional quando aquecidas (efeito SE/EMF). No intuito de observar este efeito foi realizado um estudo mecânico com o propósito de definir os principais parâmetros envolvidos com o funcionamento e desempenho do atuador, ademais constrói-se um modelo representativo de uma superfície primária aeronáutica, leme, com o propósito de demonstrar uma prova de conceito e posterior utilização estratégica deste material inteligente neste domínio do conhecimento.

1.2 Justificativa

A consultoria de mercado *BBC Research* expôs que o mercado global de materiais inteligentes totalizou cerca de US\$ 26 bilhões em 2014 e deveria alcançar o montante aproximado de US\$ 42,2 bilhões em 2019, registrando uma taxa composta de crescimento de 10,2% para o período demarcado. Observa-se neste domínio, a influência no segmento de atuadores, que contabilizaram US\$ 16,8 bilhões em 2013 e guardam uma expectativa de US\$ 30,2 bilhões para 2019 (MCWILLIAMS, 2011).

Neste contexto, apesar da introdução lenta no mercado, o volume de trabalhos sobre LMF, que vêm sendo apresentados exprimem a importância deste conteúdo. O decurso dos anos revelou a expansão tanto no número de patentes depositadas, com a expressiva quantidade de mais de 20 mil patentes para o período de 2010 a 2019 (SHREEKRISHNA; NACHIMUTHU; NAIR, 2022), quanto no número de publicações científicas relacionados ao tema como é mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Número de publicações e patentes coletados na plataforma Scopus com a palavra-chave: atuadores de Liga com Memória de Forma

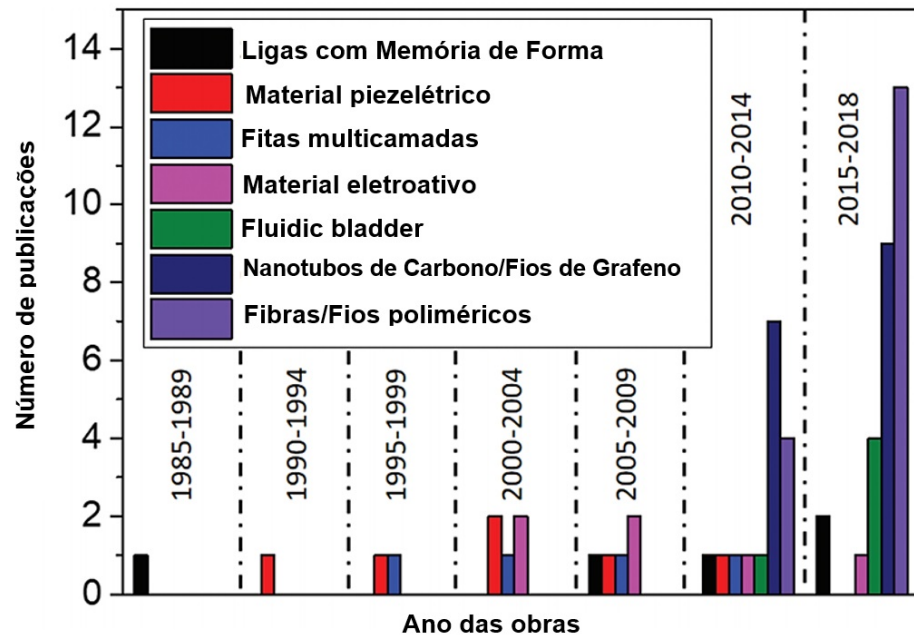


Fonte – Shreekrishna, Nachimuthu e Nair (2022)

Simultaneamente, é surpreendente verificar o incremento na produção de conhecimento a respeito de atuadores torcionais, nomeadamente os constituídos de LMF, seguindo as predisposições mencionadas previamente. A Figura 2 aponta a evolução recente das investigações compreendendo esta categoria de atuadores, dos quais a diversificação e inovação dos materiais são evidenciados. As projeções retratam um cenário otimista para o setor nos próximos anos.

As características exclusivas dos atuadores torcionais LMF associadas a produção de dispositivos mais leves e compactos, capazes de aplicar força suficiente, com a vantagem extra de controle integrado ao sistema, suscitou aos cientistas e engenheiros, novas possibilidades para o controle e resposta de estruturas. Nesta perspectiva, a indústria aeroespacial torna-se um campo fértil para possíveis benefícios desses componentes. Pondera-se que a Airbus estabeleceu a necessidade de produção de aproximadamente 37400 novas aeronaves com custos de US\$ 5,8 trilhões nos próximos 20 anos (BASHEER, 2020). Além do mais, estima-se que o mercado global de tecnologia ligada a drones deverá crescer de US\$ 30 bilhões em 2020 para US\$ 54,6 bilhões em 2025 (GIONES; BREM, 2017). Em vista disso,

Figura 2 – Progressão no desenvolvimento de atuadores de torção construídos em diferentes materiais

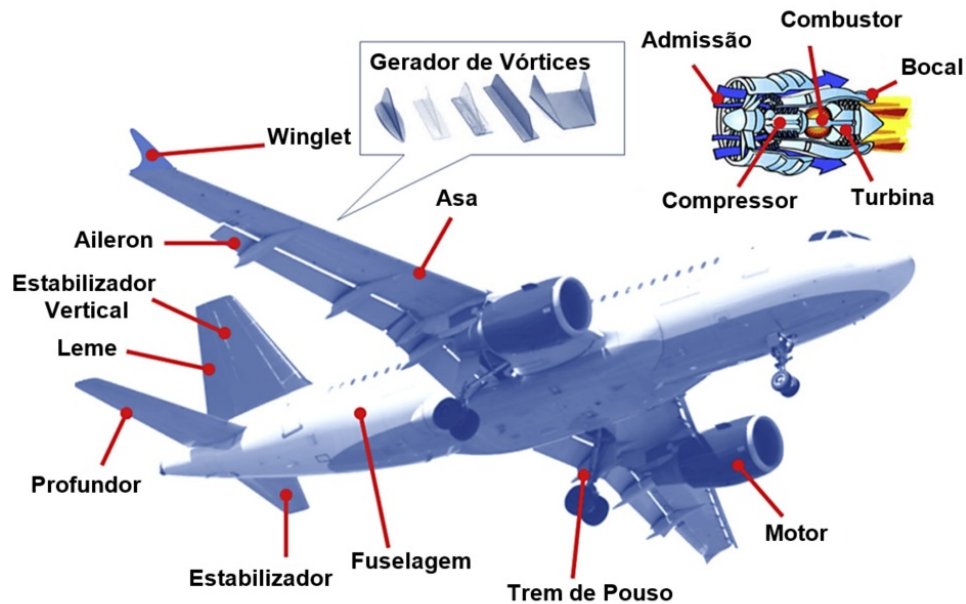


Fonte – Aziz e Spinks (2020)

para um grande número de passageiros e uma demanda crescente por veículos aéreos, subsiste a necessidade de tecnologia avançada (atuadores inteligentes) para suprir requisitos tecnológicos cada vez mais estreitos. A Figura 3 ilustra as principais oportunidades de emprego de atuadores a base de LMF, enfatizando a quantidade de estruturas com possíveis usos.

Além das várias justificativas econômicas e tecnológicas, a ausência de literatura no âmbito de fabricação e caracterização de molas torcionais de LMF NiTi também fomentou a realização deste trabalho. Do mesmo modo, conhecer o comportamento de molas torcionais LMF sob distintas condições de utilização, aplicado, singularmente, a sistemas de natureza aeronáutica representou um dos desafios impostos. Cabe lembrar, ainda, que estes elementos mecânicos servem como mote para futuras pesquisas como possíveis atenuadores de vibração devido suas características superelásticas (carregamento-descarregamento). Por conseguinte, a realização deste trabalho de Tese foi amparada nesse arcabouço de justificativas supracitadas.

Figura 3 – Aplicações de LMF existentes e potenciais no domínio aeroespacial



Fonte – Jani et al. (2014)

1.3 Objetivos

Para melhor compreensão da importância do presente trabalho para o meio científico e industrial, os objetivos foram descritos de modo geral e específico.

1.3.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um atuador torcional que emprega molas helicoidais de torção da liga NiTi destinada à utilização em um leme aeronáutico.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para que o objetivo geral seja alcançado, se fazem necessários que os seguintes objetivos específicos sejam atendidos:

- Avaliar as temperaturas críticas de transformação de fase para fios de LMF NiTi de diferentes diâmetros (0,9, 1,2 e 1,5 mm) via Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC);

- Determinar a influência dos níveis de tensão mecânica e do efeito térmico sobre as propriedades do fio de LMF NiTi;
- Analisar as temperaturas críticas de transformação de fase para molas helicoidais de torção de LMF NiTi via ensaios de Resistência Elétrica em função da Temperatura (RET);
- Desenvolver uma estrutura física que simule o funcionamento de uma mola helicoidal de torção de LMF NiTi;
- Definir a resposta termomecânica de uma mola helicoidal de torção de LMF NiTi em função de parâmetros de deflexão angular;
- Construir plataforma e avaliar experimentalmente um modelo representativo de leme acionado por molas helicoidais de torção de LMF NiTi;

1.4 Contribuições do Trabalho

Este documento traz como contribuição central o desenvolvimento de um atuador LMF fundamentado em uma mola helicoidal de torção de LMF NiTi. Embora, existam alguns atuadores LMF torcionais previamente apresentados pela literatura, notadamente, em formato geométrico de fios, tubos, hastes, fitas e até mesmo de molas. Realçar-se a produção destas formas com características de EMF/SE, ainda não é amplamente utilizada e há poucos trabalhos disponíveis na literatura, que costumam evidenciar o emprego desta prerrogativa tecnológica em atuadores, o que reforça o caráter inovador dessa pesquisa. Adicionalmente, a originalidade da pesquisa nota-se na aplicação dos referidos elementos inteligentes para a atuação de um leme aeronáutico, utilizando um modelo representativo do sistema aeronáutico real com o objetivo de mostrar uma prova de conceito. Com essa reserva em mente, este estudo configura-se como uma conexão entre várias áreas, de forma a poder embasar futuros desenvolvimentos tecnológicos e trabalhos acadêmicos, que precisem correlacionar informações desde um elemento de máquina até o comportamento dinâmico de um sistema complexo.

1.5 Estrutura do Documento

A organização da Tese segue a metodologia e etapas necessárias para o desenvolvimento do documento. É um texto designado a fornecer ao leitor informações breves para que este possa encontrar o conteúdo que deseja ao longo do manuscrito. Portanto, incluindo a Introdução, apresentada no capítulo 1, este documento se divide em 5 capítulos, abrangendo a revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões e considerações finais.

A proposta do Capítulo 2 é fornecer uma revisão da literatura com uma descrição teórica dos temas abordados neste escrito, a saber: origem, definição, fenômenos e potencialidades das LMF, com foco especial em atuadores. Além disso, é feito um breve resumo de alguns trabalhos encontrados na literatura, baseados em atuadores torcionais em LMF retratando o cenário atual de pesquisas.

O Capítulo 3 compreende a metodologia seguida na pesquisa, e apresenta os materiais, técnicas e procedimentos de caracterização, equipamentos e programas computacionais utilizados no desenvolvimento do estudo. Adicionalmente, são mostrados as características construtivas e os requisitos técnicos do protótipo, dispondo os principais elementos e componentes funcionais empregados.

A seguir, o Capítulo 4 trata os resultados experimentais arregimentados, como por exemplo, a caracterização dos fios, testes das molas de torção, além de ensaios e validações das cargas e movimentos. Além disso, são descritas as principais dificuldades de fabricação do protótipo de leme e seus principais resultados quanto aos testes de comportamento geométrico e funcional.

O Capítulo 5 encerra o trabalho, delineando as conclusões gerais deste documento, a síntese das contribuições, e disposições relevantes para trabalhos futuros.

Finalmente, têm-se ainda detalhados para constituir a Tese, referências, apêndices e anexos, que retratam respectivamente: a relação bibliográfica referenciada; os escritos adicionais que completam a argumentação, incluindo imagens dos ensaios, gráficos, assim como, tabelas que fundamentam, demonstram e explicam a pesquisa para uma melhor compreensão por parte do leitor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo mostrar o estágio atual do conhecimento nos tópicos referentes a problemática que cerca este trabalho. Nesse sentido, foi feita uma pesquisa na bibliografia pertinente, a qual implicou nos conceitos apresentados adiante, que fornecem os desdobramentos ao entendimento prático da obra.

2.1 *Ligas com Memória de Forma*

O emprego de materiais inteligentes (*smart materials*) tem se ampliado nas últimas décadas, em função de suas propriedades particulares. Estes materiais também denominados de ativos são caracterizados por apresentarem acoplamento de múltiplos domínios físicos, de modo que as características físicas (mecânicas, elétricas, ópticas, etc.) podem ser alteradas por meio de modificações controladas das variáveis de estado que caracterizam os domínios envolvidos (GANDHI; THOMPSON, 1992; LEO, 2007). Estes materiais ocupam uma promissora frente de desenvolvimento dedicada à concepção de novos tipos de sensores e atuadores, menos intrusivos, mais eficientes, além de mais confiáveis, podendo indicar e, operar em tempo real, sobre as condições de um dado elemento estrutural (CRAWLEY, 1994).

Atualmente, a lista de materiais mais frequentemente utilizados em aplicações envolvendo estruturas inteligentes compreende as cerâmicas piezoelétricas, materiais magneto-strictivos, fluidos eletroreológicos e magnetoreológicos, ligas com memória de forma, polímeros com memória de forma e polímeros eletroativos (ROGERS, 1995; SUN et al., 2016). Este trabalho tem particular interesse nas ligas com memória de forma (LMF) que vêm despertando interesse crescente devido as suas potenciais aplicações (JANI et al., 2014).

2.1.1 Princípio de Funcionamento

As LMF são conhecidas desde a década de 30, quando A. Olander constatou o efeito superelástico nas ligas de AuCd. Anos depois, Kurdjumov e Khandros (1949) explicaram o efeito memória de forma, regido pelo comportamento termoelástico reversível.

Todavia somente em 1962, aconteceu a descoberta mais importante neste tema, quando o metalurgista W. F. Buehler e colaboradores do *Naval Ordnance Laboratory (NOL)*, observaram o efeito memória de forma numa liga intermetálica NiTi na proporção próxima a equiatômica, conhecida como nitinol, em homenagem ao laboratório em que foi estudada. Ainda na década de 60, Raychem desenvolveu a primeira aplicação industrial das LMF associada a indústria aeronáutica. Desde então, diversas aplicações geraram o crescente interesse para novas pesquisas neste âmbito.

As LMF constituem um grupo de materiais metálicos que possuem a habilidade de recuperar uma forma previamente estabelecida quando sujeito a um procedimento termomecânico ou eletromagnéticos, manifestando deformações residuais nulas ou quase nulas (DUEBIG; MELTON; STÖCKEL, 2013; LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1999). Esta característica está associada ao mecanismo de transformação de fase reversíveis particular desses materiais.

Nas LMF a transformação de uma fase para outra transcorre pelo movimento coordenado e/ou cooperativo de átomos, sem difusão. Este processo é induzido por um mecanismo de cisalhamento, o que resulta em uma transformação microscopicamente homogênea de uma estrutura cristalina em outra (ABBASCHIAN; REED-HILL, 2009). As duas fases sólidas envolvidas são a fase austenítica (fase de alta temperatura) e a fase martensítica (fase de baixa temperatura) apresentando estruturas cristalinas distintas e por extensão propriedades dispares em só material (LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1999).

As transformações de fase podem seguir dois caminhos distintos, sendo denominados: transformação direta e transformação inversa (ou reversa). Para o primeiro caso, vê-se a transformação da fase austenita para a martensita ($A \rightarrow M$), isto é, quando se resfria a LMF dentro de uma determinada faixa de temperatura, que varia de acordo com os componentes da liga. Para o segundo caso, vê-se o caminho inverso, marcado pelo aquecimento sofrido pela LMF, ou seja, a transformação principia na fase martensítica em direção a fase austenítica ($M \rightarrow A$) (ELAHINIA, 2016; LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1999).

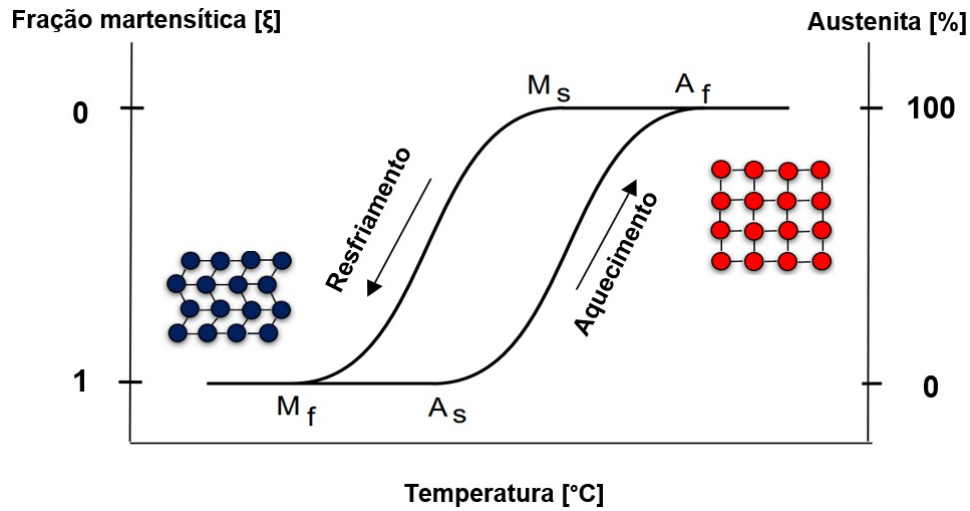
A austenita (A) é a fase mais organizada em nível microscópico, em equilíbrio a temperaturas mais altas e baixas tensões, possui uma estrutura cristalina de alta simetria geralmente na forma cúbica, chamada de B2 para as ligas NiTi. Essa fase é mais dura e possui módulos de Young mais altos em relação a fase martensítica.

A martensita (M), fase de menor simetria, permite a acomodação de sua rede cristalina de diversas formas quando deformada, desta maneira apresenta maiores níveis de ductilidade e amortecimento. A martensita pode ser induzida por temperatura ou por tensão, quando induzida por temperatura exibe uma estrutura cristalina maclada (*twinned martensite*) estável a baixas tensões e temperaturas. Quando submetida a uma tensão, produz uma estrutura não-maclada ou demaclada (*detwinned martensite*) estável a altas tensões. Existe uma fase intermediária chamada de fase-R com estrutura cristalina romboédrica, sua presença está associada à composição química da liga, sendo favorecida pela participação de alumínio ou ferro, porém ela normalmente desaparece com tratamentos térmicos a elevadas temperaturas.

Uma vez que, a transformação reversa é alcançada por aquecimento gradual, aparece uma importante variável de estado denotada pela letra grega ξ , a fração de martensita. Considerando a natureza não difusiva da transformação martensítica, a lei cinética para mudança de fase, define a fração martensítica ξ ($0 \leq \xi \leq 1$) em função da temperatura, como a porcentagem de estrutura martensítica em relação ao total do material, ou seja, valores de $\xi = 0$ e $\xi = 1$ representam uma liga puramente austenítica e integralmente martensítica, respectivamente.

Na Figura 4, é apresentado a variação da fração volumétrica de martensita em função da temperatura prescrita, na ausência de cargas mecânicas aplicadas. É possível verificar quatro temperaturas bem delineada com relação às transformações de fase. As terminologias empregadas foram definidas por Otsuka e Wayman e inseridas na norma ASTM F 2005-5. Desta forma, durante o resfriamento, ao se reduzir até uma determinada temperatura sem aplicação de esforço mecânico, a fase austenítica começa a se transformar em martensita. Essa temperatura recebe a denominação M_s (*Martensite start*). No decurso da transformação atinge-se a temperatura M_f (*Martensite finish*) à qual o material se torna 100% martensítico. No procedimento reverso, quando a temperatura se eleva, uma liga previamente martensítica começa a converter-se em austenita à temperatura A_s (*Austenite start*), concluindo este processo à temperatura A_f (*Austenite finish*).

Figura 4 – Evolução da fração de martensita (ξ) com a temperatura em LMF

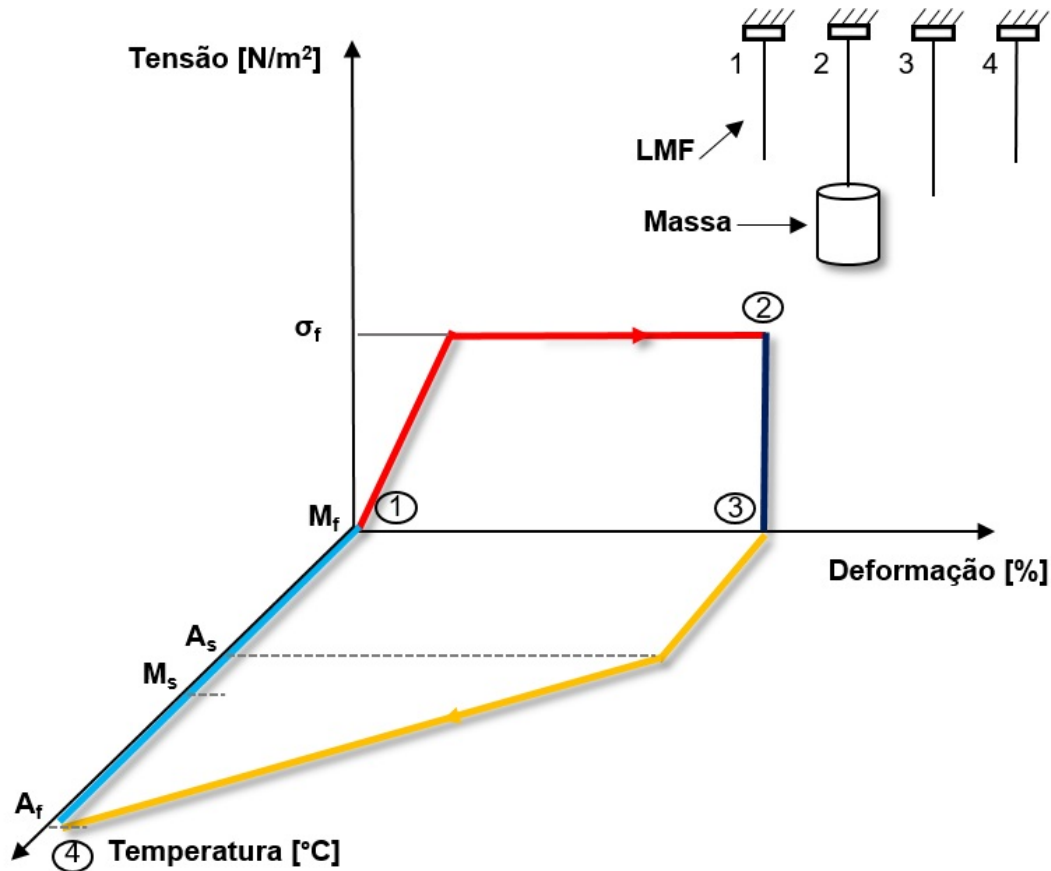


Fonte – Adaptado de Teh et al. (2008)

2.1.2 Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma (EMF) é observado quando uma LMF, inicialmente na fase martensítica maclada, sujeita a aplicação de um esforço mecânico suficientemente elevado sofre uma deformação (de 4% a 10%) e ao cessar o carregamento grande parte desta deformação se mantém, como se fora uma deformação plástica convencional. Todavia, ao submeter a LMF a um aquecimento em temperaturas acima de A_f , o material sofre transformação de fase ($M \rightarrow A$) e retorna ao estado ou à forma original. Um subsequente resfriamento deste material, em temperaturas inferiores a M_f , resulta novamente na formação da martensita maclada, sem alterações na forma, devido à ocorrência da transformação direta ($A \rightarrow M$) (ELAHINIA, 2016; LECCE et al., 2014; LAGOUDAS, 2008). A natureza deste fenômeno pode ser melhor compreendida por meio do diagrama tensão-deformação-temperatura esquematizado na Figura 5, que destaca as condições críticas de transformação de fase (temperatura e tensão). Este efeito também recebe a alcunha de Efeito Memória de Forma Simples (EMFS).

Figura 5 – Ciclo de carregamento termomecânico representando as transformações da LMF e seu comportamento de memória de forma



Fonte – Adaptado de Czechowicz e Langbein (2015)

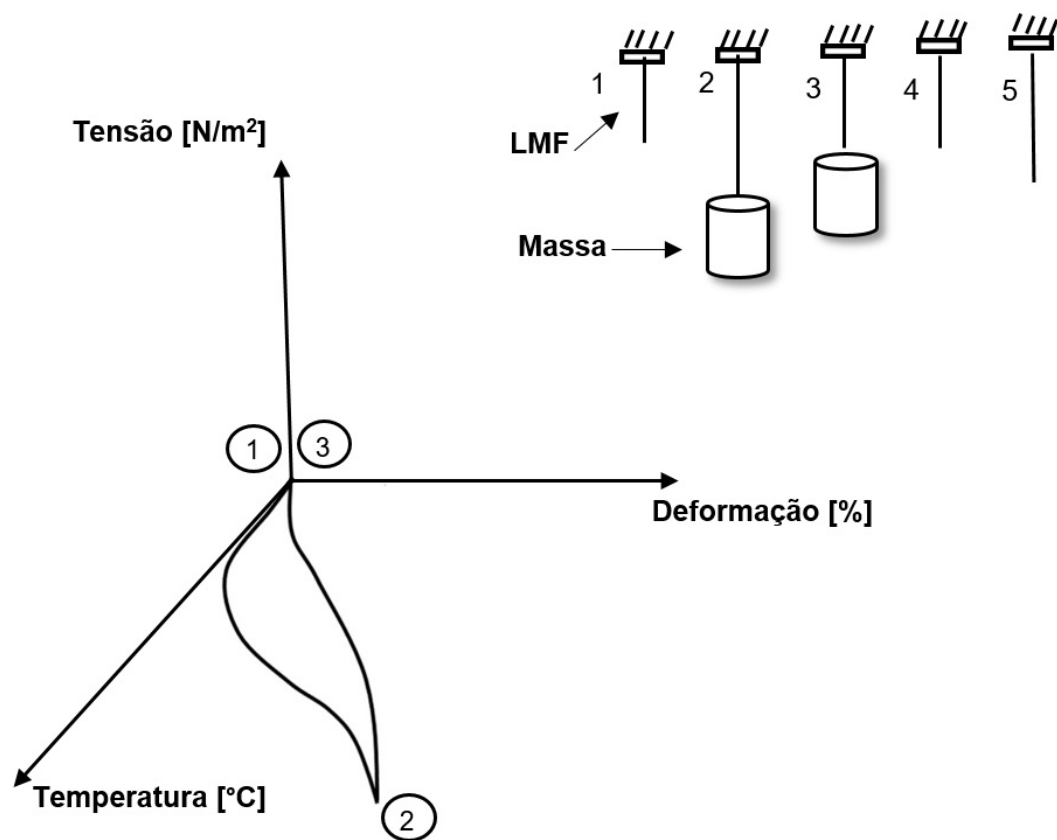
2.1.3 Efeito Memória de Forma Reversível

No mecanismo EMF descrito acima, apenas a fase austenítica é memorizada. Todavia, se este mesmo efeito se manifestar também durante o resfriamento, o mesmo passa a chamar-se efeito de memória de forma reversível ou duplo (EFMR). Nesse caso, para que esse efeito seja possível, a liga precisa ser submetida a treinamentos através de ciclos termomecânicos que possibilitam associar uma forma a cada fase em função da variação de temperatura, ou melhor, permite a memorização de duas formas distintas após a aplicação de um carregamento térmico sem necessitar de carga mecânica externa (OTSUKA; WAYMAN, 1999).

A nível microscópico, após uma deformação plástica na LMF, no estado martensítico ou levemente acima de M_s , a recuperação da forma pelo EMF torna-se incompleta e uma deformação residual permanece ao final do ciclo. Porém, com o posterior aquecimento à

temperatura acima de A_f e resfriamento a temperatura abaixo de M_f , sua forma muda na direção da tensão aplicada, desenvolvendo-se o EFMR de modo repetitivo. A conservação de martensita residual e a ampliação da densidade de discordâncias salientam esta deformação residual não-reversível. Esta condição interna do material, fora do equilíbrio termodinâmico, está relacionado com um campo de tensões internas específicos que conduz as variantes a se desenvolverem durante o resfriamento, na ausência de tensões aplicadas. A Figura 6 representa graficamente em uma curva o funcionamento do EFMR.

Figura 6 – Efeito memória de forma reversível (EFMR) e sua respectiva curva tensão-deformação-temperatura



Fonte – Adaptado de Lecce et al. (2014)

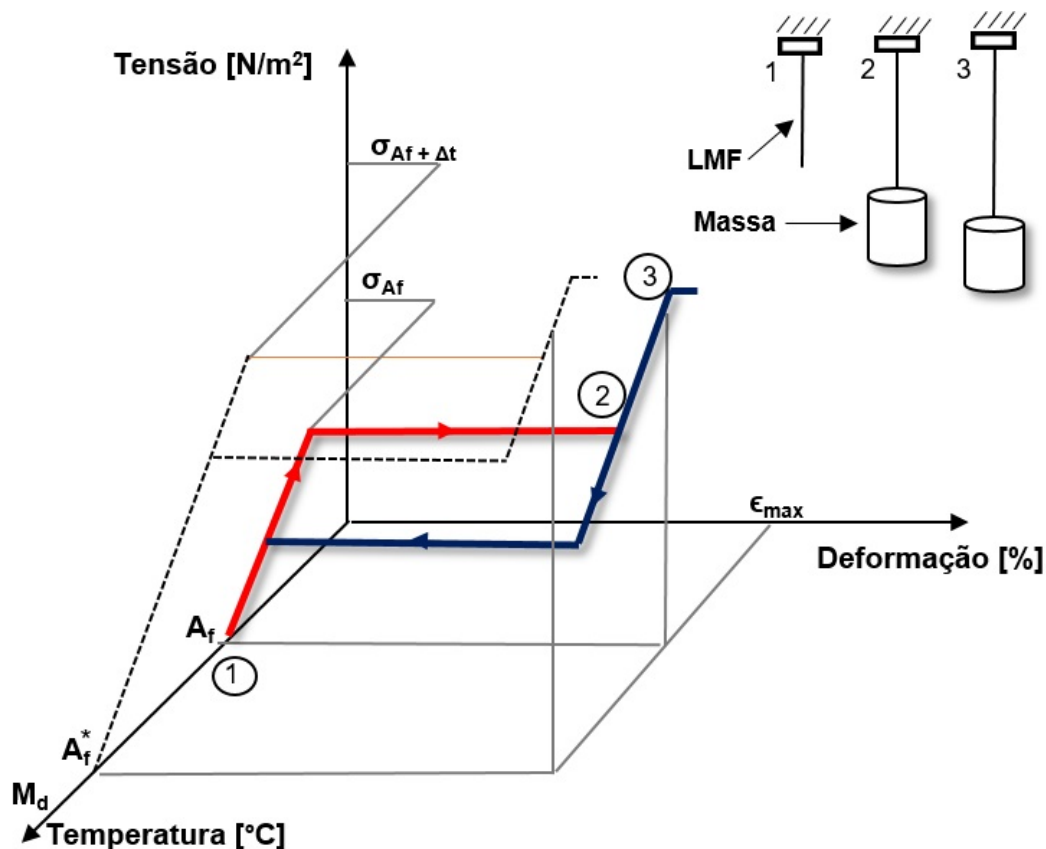
Destaca-se que a força que o material pode exercer ao retornar à forma de baixa temperatura, fase martensítica, é sempre menor do que aquela que ocorre no EMF simples.

2.1.4 Superelasticidade

Uma das ocorrências macroscópicas de materiais que possuem memória de forma mais pertinentes é denominada como superelasticidade (SE) ou pseudoelasticidade. O

efeito superelástico é uma propriedade acoplada ao EMF, ou seja, as LMF apresentam ambas as ocorrências. Considere agora uma amostra a uma temperatura superior A_f e submetida a um esforço mecânico externo. Assim, com a aplicação de um carregamento, o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica seja alcançada e deste modo, ocorre a transformação de fase da austenita para martensita não-maclada, onde inicia-se a nucleação e crescimento da martensita induzida por tensão. Nesta etapa, a fase martensita não-maclada constitui-se de somente uma variável induzida por tensão e é possível observar uma deformação macroscópica no material. Ao descarregar o sistema, o material sofre uma transformação inversa para A_f , visto que a fase martensítica é instável em $T \geq A_f$. Esse comportamento do material é chamado de efeito superelástico. O comportamento mecânico típico deste efeito é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Curvas tensão-deformação representando as transformações da LMF e o efeito superelástico



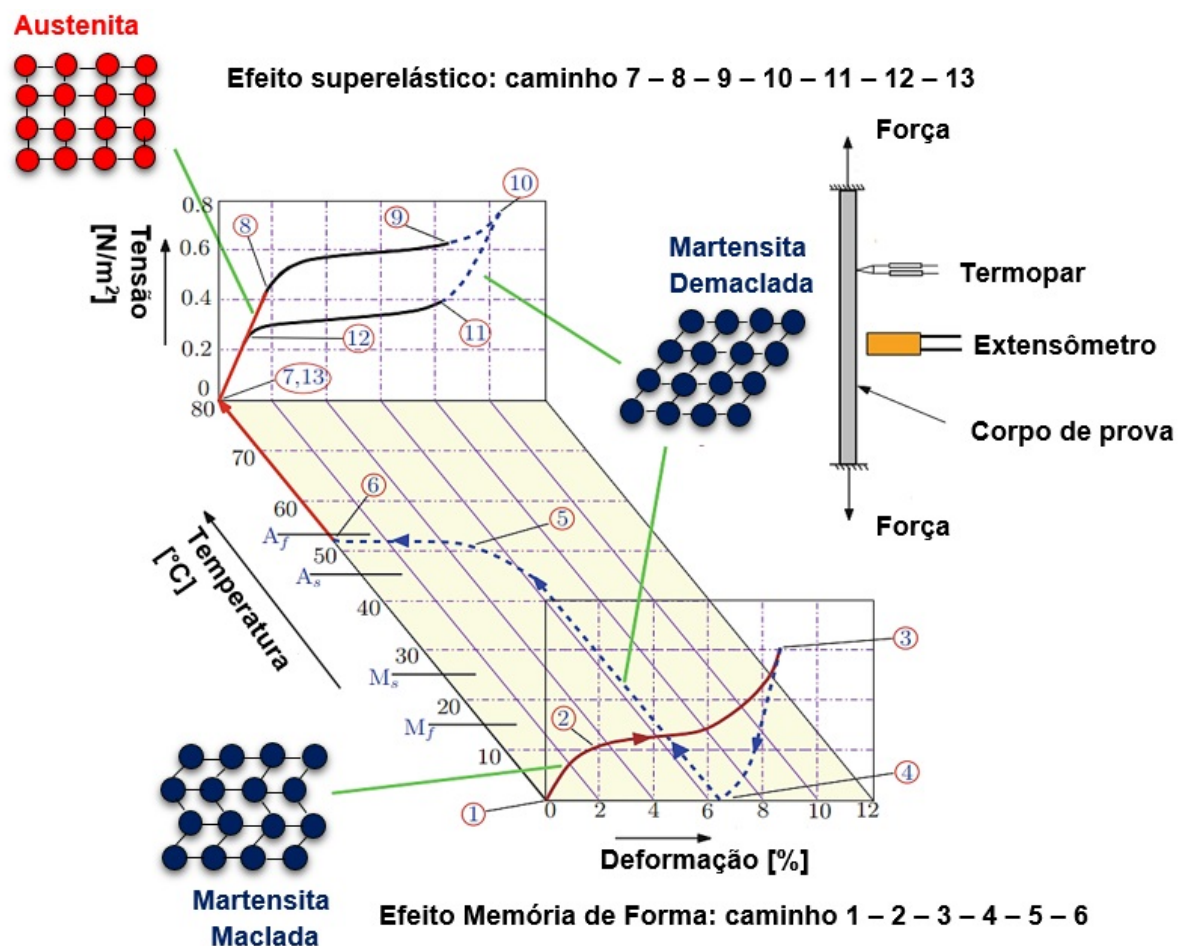
Fonte – Adaptado de Czechowicz e Langbein (2015)

Na SE a deformação recuperável pode chegar a cerca de 8%, que é recuperada quase que imediatamente com a retirada da carga mecânica aplicada. Vale mensurar, que

a curva tensão-deformação exibe uma histerese de tensão que é devido ao efeito de atritos microestruturais.

A SE está intrinsecamente conectada com o EMF. A priori, ambos são perceptíveis na mesma amostra, dependendo da temperatura em que se verifica a deformação e o tratamento termomecânico anterior. Conforme ilustra a Figura 8, o EMF ocorre após uma deformação em temperatura abaixo de M_f , seguido de aquecimento acima de A_f , enquanto SE ocorre acima de A_f e abaixo de M_d , temperatura limite para a transformação direta. Na faixa intermediária, entre M_f e A_f , o EMF e SE “disputam” entre si e podem ocorrer parcialmente, dependendo da estrutura inicial do material e da condição térmica experimentada.

Figura 8 – Relação tridimensional da tensão, deformação e temperatura para o comportamento mecânico das LMF



Fonte – Adaptado de Rao, Srinivasa e Reddy (2015)

A relação entre a tensão externa e as formulações gerais da termodinâmica, designaram a lei de Clausius-Clapeyron modificada como uma alternativa, aplicada à análise de transformação martensítica sob efeito de tensões uniaxiais. Assim propõem-se:

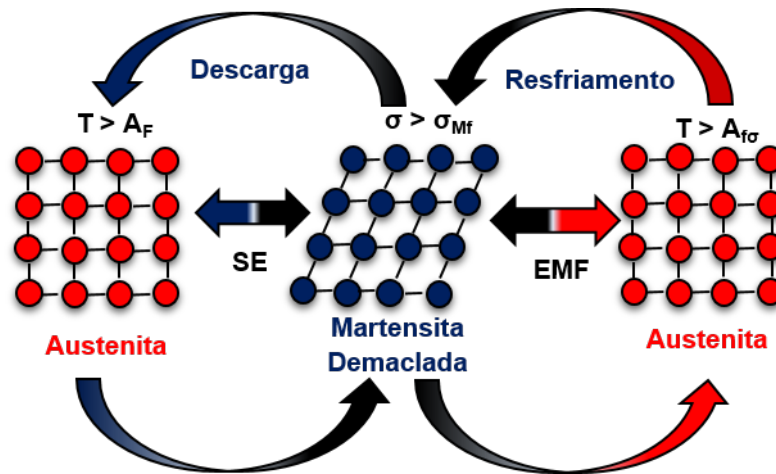
$$\frac{d\sigma}{dT} = -\frac{\Delta S}{\epsilon} = -\frac{\Delta H}{\epsilon T} \quad (1)$$

onde: σ é a tensão mecânica à qual a LMF está sendo submetida, T é a temperatura, ϵ é a deformação, ΔS representa a entropia por unidade de volume e ΔH é definida como a entalpia de transformação por unidade de volume.

Esta equação é aplicada para temperaturas de equilíbrio, todavia pode ser empregada para as temperaturas M_s , quando a força para iniciar a transformação é independente da temperatura e tensão. As condições de contorno para as quais esta relação é apropriada estão restritas, seja pela temperatura seja pela tensão ou taxa de carregamento. No que se refere a temperatura, o marco é a M_d que ao ser superada, a partir da qual a austenita, sob carga mecânica, irá entrar em regime plástico, resultando em uma deformação permanente. Ao passo que, em relação a tensão, após transpor o limite de escoamento da martensita induzida por tensão (ou orientada) o material irá plastificar, isto é, não conseguirá regressar completamente com um aquecimento subsequente.

Existe ainda uma maneira pouco investigada de obter o EMF a partir de uma LMF a princípio austenítica e, conseqüentemente, manifestando superelasticidade na temperatura ambiente. A Figura 9 exibe a esquematização do fenômeno supracitado. Quando a LMF for deformada a uma temperatura acima de A_{f0} (inicialmente sob estado nulo de tensões) gerará martensita induzida por tensão (Figura 9). A partir disto a condição de equilíbrio só pode ser restaurada ao cessar a carga (SE) ou se a LMF for aquecida (EMF). Do ponto de vista termodinâmico, esta carga aplicada modifica o equilíbrio por introduzir a energia mecânica na componente da entalpia, viabilizando que a transformação prossiga normalmente. Assim, em concordância com a equação Clausius-Clapeyron as temperaturas críticas de transformação de fase aumentam com a elevação da tensão de indução da martensita. Em síntese, essa nova transformação ocorrerá da martensita induzida por tensão (orientada, Figura 9) para a austenita, produzindo um EMF sob carregamento e a conseqüente realização de trabalho mecânico. Este será o efeito utilizado neste estudo para produzir o movimento do atuador mecânico.

Figura 9 – Diagrama esquemático do EMF criado a partir da reversão da martensita induzida por tensão



Fonte – Adaptado de Emiliavaca et al. (2018)

2.2 Atuadores LMF – Generalidades

Contemporaneamente observa-se uma intensificação das LMF como uma importante classe de material em Engenharia. No Quadro 1, Mehta e Gupta (2019) resumem as principais famílias de LMF.

Quadro 1 – Composição das principais famílias de LMF

Ligas				
Ferro	Cobre	Níquel	Altas temperaturas	Magnéticas
FeMnSi	CuZnAl	NiTi	TiNiPd	NiMnGa
	CuAlNi	NiTiCu	TiNiPt	FePd
	CuAlNiMn	NiTiPd	NiTiHf	NiMnAl
	CuSn	NiTiFe	NiTiZr	FePt
		NiTiNb	ZrRh	Dy
		NiFeGa	ZrCu	Tb
		NiTiCo	ZrCuNiCo	LaSrCuO
			ZrCuNiCoTi	ReCu
			TiMo	NiMnIn
			TiNb	CoNiGa
			TiTa	
			TiAu	
			UNb	
			TaRu	
			NbRu	
			FeMnSi	

Fonte – Mehta e Gupta (2019)

Entre as LMF descobertas no decorrer dos anos, as ligas NiTi e à base de cobre são as mais favoráveis para as aplicações práticas. As propriedades destas ligas são divergentes, mas de forma geral a liga de NiTi é superior em diversos aspectos (STOECKEL, 1988; HUMBEECK, 2001).

Desde a descoberta no início da década de 60, o sistema da liga NiTi tem sido estudado extensivamente. Em particular, essa liga manifesta o melhor desempenho dentre as ligas com EMF/SE, com recuperação de forma de até 8% contra 4–5% das ligas à base de ferro e cobre (WADOOD, 2016). Ademais, estas ligas possuem ótima resistência à fadiga e corrosão, excelentes propriedades de amortecimento e biocompatibilidade, com um comportamento mecânico característico em função da sua maior facilidade de deformação em baixas temperaturas que em altas temperaturas (JANI et al., 2014; MEHTA; GUPTA, 2019; STOECKEL, 1988). Na Tabela 1, são listados os principais dados em termos de propriedades para a liga NiTi.

Tabela 1 – Visão geral das principais propriedades da liga NiTi

Propriedades	
Ponto de Fusão [°C]	1240 – 1310
Densidade [g/cm^3]	6,4 – 6,5
Condutividade Térmica – austenita [W/m.K]	18
Condutividade Térmica – martensita [W/m.K]	8,6
Calor Específico [J/Kg.K]	470 – 620
Calor Latente [J/Kg]	24,2
Faixa de Transformação [°C]	- 200 – 110
Histerese de Transformação [°C]	30 – 50
Capacidade de Amortecimento [Q^{-1}]	10^{-2}
Tensão de Escoamento – austenita [MPa]	200 – 800
Módulo de Elasticidade – austenita [GPa]	50 – 90
Tensão de Escoamento – martensita [MPa]	150 – 300
Módulo de Elasticidade – martensita [GPa]	28 – 41
Limite de Resistência [MPa]	750 – 960
Resistividade – austenita [$\mu\Omega cmcm$]	70 – 110
Resistividade – martensita [$\mu\Omega cmcm$]	40 – 70

Fonte – Choudhary e Kaur (2016)

Na atualidade, existe uma ampla gama de áreas para a aplicação das LMF, devido suas propriedades variáveis de acordo com temperatura, tensão aplicada e histórico de carregamento. Especialmente, as ligas a base de NiTi são de grande importância na área tecnológica, sendo empregadas tanto na engenharia técnica quanto na bioengenharia,

empregadas como elementos de força em atuadores mecânicos, e em diversos aparelhos de controle. Nestes casos, são explorados os efeitos memória de forma, duplo ou não, bem como a superelasticidade. As aplicações investigadas no presente trabalho se concentrarão essencialmente em atuadores de LMF.

Os atuadores são dispositivos primários responsáveis pela conversão de um sinal em uma ação de algum tipo, em outras palavras, são elementos que executam algum tipo de trabalho. Diferentes tipos de atuadores são usados como fonte de deslocamento e força. Os atuadores com memória de forma são atuadores preparados para transformar energia térmica em energia mecânica valendo-se de uma transformação de fase. Apresentam a capacidade de produzir movimentos diversos, sempre condicionados aos parâmetros centrais do projeto de atuadores LMF, que compreende sua geometria (comprimento e seção transversal), pré-tensionamento, a característica termomecânica do elemento e a montagem do dispositivo.

O desenvolvimento de atuadores com as LMF oferece grandes atrativos para muitos campos da engenharia, substituindo os atuadores convencionais de grande peso e ruidosos, tais como solenoides eletromagnéticos, dispositivos pneumáticos, hidráulicos ou motores elétricos. Na Tabela 2, são dadas as principais características de alguns atuadores, sendo as LMF, representadas pelo Nitinol.

Tabela 2 – Comparação entre as performances dos atuadores

Tipo de Atuador	Tensão [MPa]	Deformação [%]	Eficiência [%]	Largura de banda [Hz]	Trabalho específico [J/cm^3]
LMF – NiTi	200	10	3	3	10
Piezocerâmica	35	0,2	50	5000	0,035
Músculo humano	0,007 – 0,8	1 – 100	35	2 – 173	0,035
Hidráulico	20	50	80	4	5
Pneumático	0,7	50	90	20	0,175
IPMC	0,3	40	30	0,1 – 100	0,0024
Polímero eletroativo dielétrico	2	100 – 380	60 – 90	1 – 10000	3,4

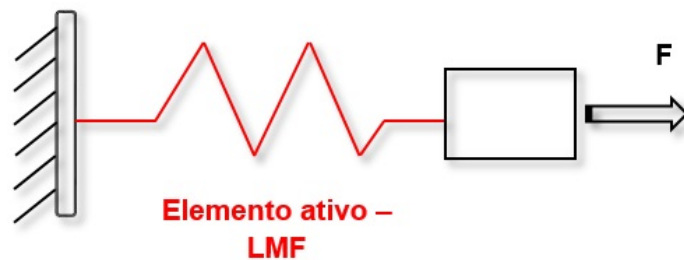
Fonte – Bhandari, Lee e Ahn (2012) e Jani et al. (2014)

As vantagens desse tipo de atuador são sua altíssima relação força por unidade de massa, capacidade miniaturização, baixo custo e flexibilidade para projetos, baixa necessidade de manutenção, acrescido a alta confiabilidade e a operação silenciosa e limpa.

Não obstante, esta categoria de atuador exibe algumas contrariedades, a saber: dificuldade de controle devido a dinâmica não linear (histerese e saturação), incerteza paramétricas, adicionado ao desempenho dinâmico insatisfatório (baixa eficiência energética e resposta em frequência limitada). Além disso, o uso cíclico da liga ocasiona uma alteração nas temperaturas críticas de transformação, originando a chamada fadiga funcional, marcada por uma redução ou perda da capacidade EMF/SE e demais propriedades intrínsecas de uma LMF.

As características de um atuador LMF podem ser examinadas diante da concepção de mecanismos que ativam os efeitos adaptativos da liga. Para atuações repetitivas, três classes de atuadores são geralmente expostas. Na Figura 10, o atuador de um sentido tem performance subordinada à aplicação de uma força externa fazendo com que o corpo se mova para a direita, desta forma o fio torna-se martensítico. Após esta etapa, ao suspender a força e aquecer o fio, há tendência que o corpo regresse à sua posição inicial.

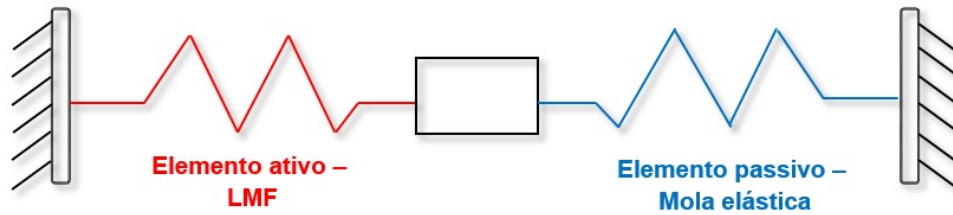
Figura 10 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador de um sentido



Fonte – Huang (1998)

Na Figura 11, o atuador é capaz de movimentar o corpo em ambas as direções. No sistema inicial, o elemento de LMF é deformado previamente antes da sua instalação no atuador, a frio, estando no estado martensítico. Por conseguinte, devido ao módulo de elasticidade baixo desta fase, o fio é capaz de ser deformado por um dispositivo passivo externo, comumente uma mola ou massa. Ao ser aquecido, o fio retoma sua forma original, fazendo com que a mola se expanda. Caso haja uma diminuição de temperatura novamente, a mola responsável pelo movimento de retorno, recupera o comprimento do elemento de LMF, alongando-o. Este arranjo é denominado atuador bias.

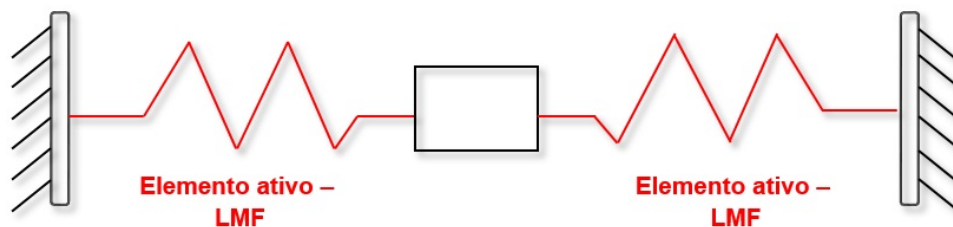
Figura 11 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador *bias*



Fonte – Huang (1998)

Uma configuração com dois elementos de LMF conectados a um corpo é demonstrada pela Figura 12, esta disposição é chamada antagônica. Esse arranjo admite que um elemento tencione o outro e, simultaneamente, exerça trabalho líquido em ambos os sentidos. Dessa forma, em determinado momento variando a temperatura do primeiro fio e, em outro instante, mudando a do segundo é possível alcançar qualquer posição de forma precisa. Outras vantagens desta configuração são a redução da histerese, o aumento da frequência máxima de atuação, somado a possibilidade de controle da rigidez do atuador.

Figura 12 – Esquema indicativo da classes de atuadores com memória de forma: Atuador de dois sentidos (Antagônico)



Fonte – Huang (1998)

Outra maneira de examinar a ação dos atuadores é por meio da geometria dos elementos ativos (FOLLADOR et al., 2012). Nesse sentido, notabilizam-se: fios retos, de modo a obter forças elevadas com pequena deflexão, molas helicoidais, empregadas para grandes cursos de deslocamento (ou rotações) com força (ou torque) reduzida, eixos maciços ou tubulares, usados para grandes rotações e altos torques, além de outras formas.

De modo trivial, entende-se que as LMF detêm um vasto leque de modos de aplicação e, por consequência múltiplas áreas em que se torna interessante a sua utilização. A seguir serão apresentados diversos atuadores encontrados na literatura ressaltando os campos mais fecundos em termos de proveito, que empregam o potencial desses materiais inteligentes.

2.2.1 Atuadores LMF – Aplicações

Biomédica

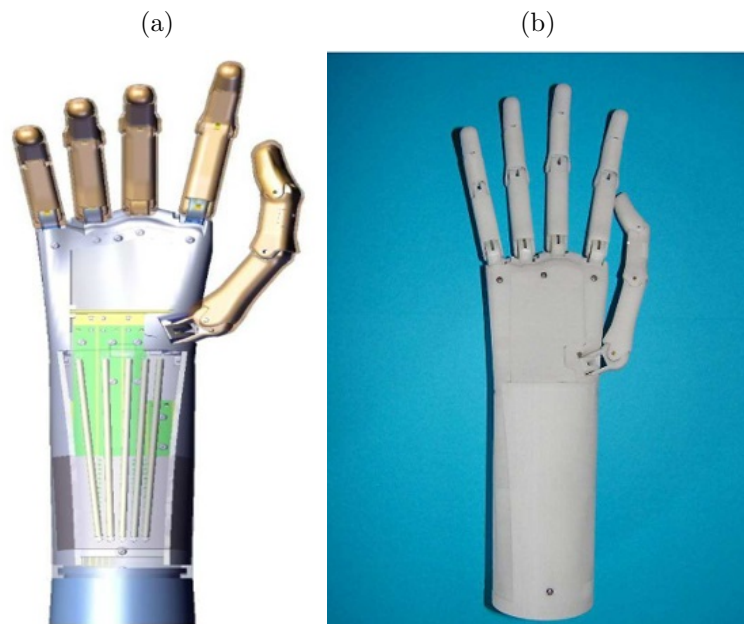
As propriedades das ligas NiTi, impulsionaram a tecnologia dos atuadores para diversas aplicações transformadoras na biomedicina. Nesta área, a miniaturização de dispositivos tem sido uma tendência, em busca de técnicas cirúrgicas minimamente invasivas como forma de reduzir os riscos inerentes e que supram novas capacidades funcionais, aprimorando a performance e padrões de confiança. Em seguida, são expostas algumas aplicações neste âmbito:

Andrianesis e Tzes (2015) propuseram um sistema integrado de atuação a base de fios LMF de NiTi para uma mão protética. Foi construído um modelo otimizado em *Computer Aided Design (CAD)*, esboçado na Figura 13a. Para esta construção geométrica foram feitas medições antropométricas equivalente ao tamanho da mão de uma mulher americana. O aparato foi concebido com um braço pequeno de 15 cm indispensável para alojar todos os componentes, como atuadores e produtos eletrônicos. O protótipo foi demonstrado na Figura 13b, onde foram utilizados fios comerciais de NiTi. Estes fios quando aquecidos se contraem cerca de 3-4% do comprimento resultando em uma tensão de aproximadamente 200 MPa. Cabe destacar que o desempenho de um dedo avaliado no trabalho, por meio de experimentos em circuito aberto e fechado demonstraram um tempo de resposta satisfatório para tarefas de manipulação, uma vez que o dedo pode abrir e fechar com quase a mesma velocidade média humana.

Reynaerts, Peirs e Brussel (1997) produziram um sistema de entrega de drogas implantáveis com base na micro-atuação de LMF. Uma dose pode ser controlada com uma precisão de até 5 μl . O sistema é alimentado e controlado remotamente por meio de um transformador transcutâneo. O sistema de entrega de medicamentos foi direcionado a pacientes que precisam de várias injeções por dia durante um longo período de tempo. O protótipo atual poderia diminuir o número de injeções por um fator de 200. A Figura 14 ilustra a estrutura do atuador, emulando o seu funcionamento.

Especificamente, o ramo de próteses, destaca-se pela produção de peças ou dispositivos artificiais utilizados para substituir um membro, órgão, ou parte dele, sem provocar efeitos secundários adversos na saúde. A partir desses dispositivos, facilita-se a autossuficiência dos indivíduos acometidos, o que lhe possibilita desenvolver em ambientes sociais

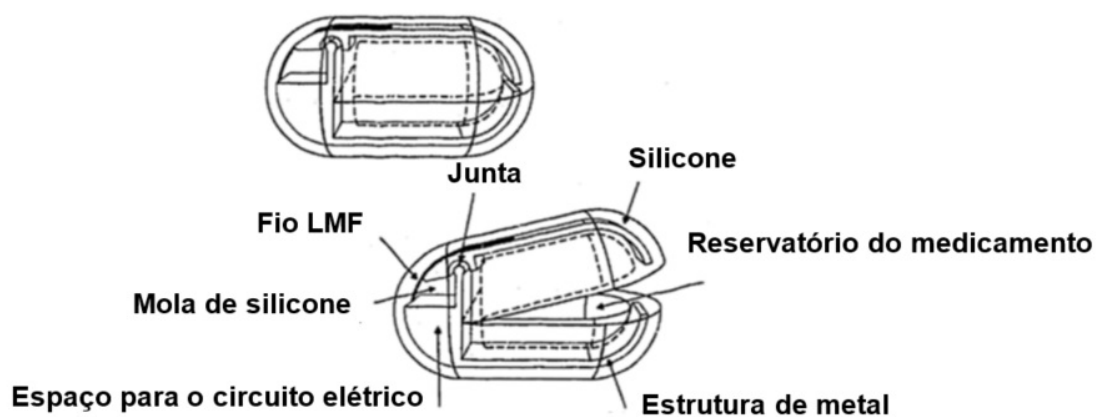
Figura 13 – Modelo de um protótipo de uma mão com atuadores de LMF a base de NiTi :
(a) Modelo em CAD e (b) Protótipo da mão desenvolvida



Fonte – Andrianesis e Tzes (2015)

uma capacidade de vida quase normal. Esse argumento, cooperou para a produção de novos instrumentos de acionamento a base de LMF.

Figura 14 – Conceito para um dispositivo de entrega de drogas sólido

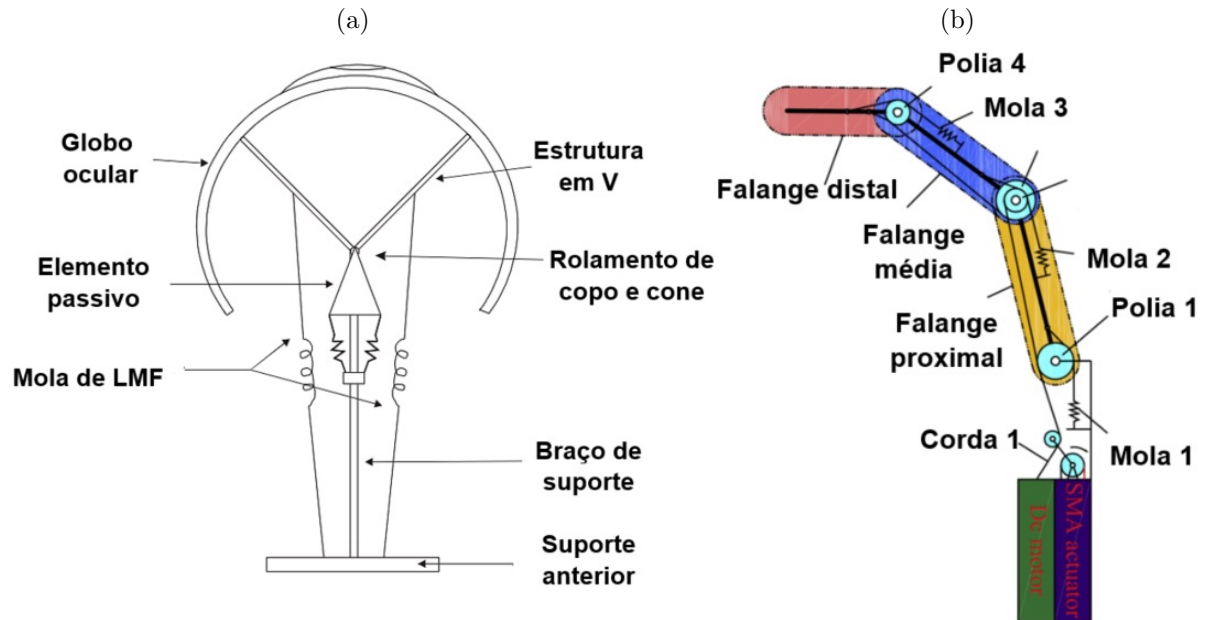


Fonte – Reynaerts, Peirs e Brussel (1997)

Wolfe, Faulkner e Wolfaardt (2005) conceberam uma prótese orbital capaz de executar movimentos verticais e horizontais como mostra a Figura 15a , por sua vez Gao, Deng e Zhang (2015) propuseram um atuador híbrido combinando LMF com um micromotor CC para a prótese de mãos apresentado na Figura 15b. Particularmente, a

adição do atuador em LMF colaborou para elevar a taxa de força produzida no reflexo da mão.

Figura 15 – (a) Esquema da prótese ocular orbital acionada por LMF e (b) Esquema de prótese de dedo a partir de um atuador híbrido LMF-Motor CC

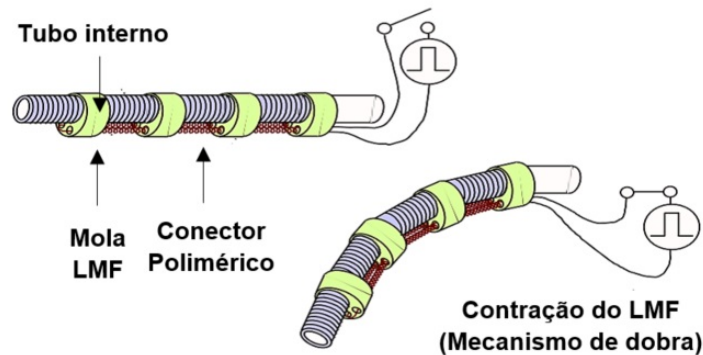


Fonte – Wolfe, Faulkner e Wolfaardt (2005) e Gao, Deng e Zhang (2015)

Haga et al. (2005) desenvolveram um atuador para o tratamento de obstrução intestinal. A Figura 16 apresenta o esboço do atuador mencionado, constituído por um tubo de silicone, conectores poliméricos e uma mola de LMF, verifica-se que o responsável pelo procedimento pode regular a direção de flexão do eixo de rotação. Esse controle acontece mediante a passagem de uma corrente elétrica na mola de LMF.

Foram expostos de maneira sintética algumas aplicações atualmente disponíveis que explicitam a relevância das LMF no ramo biomédico, para maiores detalhes, além de outras serventias associada a este material, consultar os seguintes textos Gangil, Siddiquee e Maheshwari (2020), Machado e Savi (2003), Petrini e Migliavacca (2011), Zainal, Sahlan e Ali (2015).

Figura 16 – Endoscopia utilizando LMF como atuador



Fonte – Haga et al. (2005)

Aeroespacial

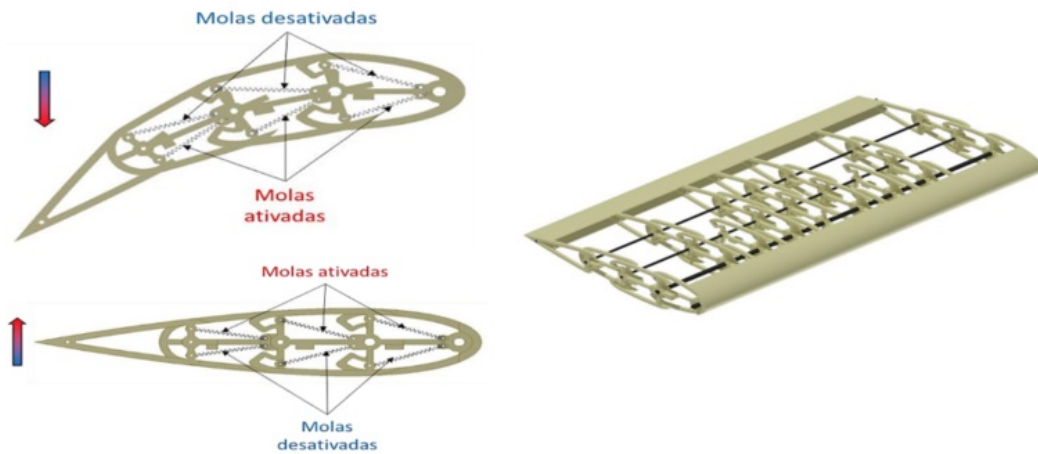
As LMF estão conectadas significativamente as novas pesquisas, objetivando soluções na área de engenharia aeroespacial, tanto em aeronaves de asa fixa, como em helicópteros e naves espaciais. Isto ocorre devido as vantagens inerentes às suas propriedades únicas, que se encaixam perfeitamente a demanda deste setor, fundamentadas sobretudo na viabilidade e eficiência (BARBARINO et al., 2014; COSTANZA; TATA, 2020; HARTL; LAGOUDAS, 2007).

Em aeronaves, há uma série de esforços para incorporar as LMF nas estruturas. Neste contexto as LMF são úteis, pois podem alterar a forma, rigidez, posição, frequência natural, e outras características mecânica em resposta a temperatura. Um desses estudos levou ao desenvolvimento de um conceito de asa capaz de se adaptar continuamente a distintas condições de operação em resposta a estímulos externos ou sinais de controle com o objetivo de substituir um dispositivo de atuação convencional. Na Figura 17 evidencia-se o conceito de uma asa adaptativa a base LMF.

As pesquisas nesta área são denominadas *morphing* e têm sido intensas nas últimas décadas, seus objetivos passam pela possibilidade de redução dos custos operacionais.

Além da modificação de arqueamento alar, atuadores de LMF operam também em outras superfícies de controle, como o leme, incumbido do controle direcional (guinada) da aeronave. Em Gunter *apud* Silva (2018) foi preconizado um sistema antagonista de tubos de LMF para atuar um leme de uma aeronave Boeing. O projeto dos tubos compreende o dimensionamento do componente (comprimento e seção transversal), somado

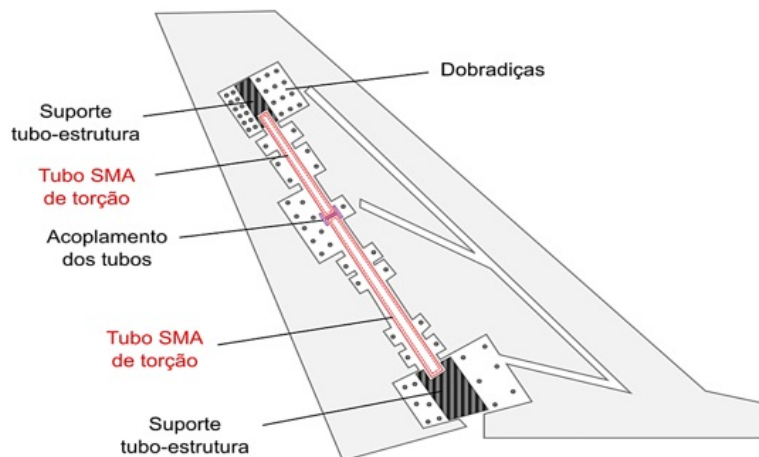
Figura 17 – Protótipo virtual da estrutura da seção adaptativa da asa acionada por molas de LMF



Fonte – Emiliavaca et al. (2018)

a caracterização termomecânica. A Figura 18 representa os principais componentes do sistema de atuação.

Figura 18 – Atuador rotacional com tubo LMF



Fonte – Gunter (2014) *apud* Silva (2018)

Além das responsabilidades associadas com a eficiência aerodinâmica de aviões, existem também preocupações devido aos elevados níveis de ruído proveniente de turbinas no momento da decolagem e aterrissagem. Para reduzir este tipo de efeito, uma das soluções passa pela modificação da borda de saída da turbina dos aviões para formas em “V” ou triangulares, que redirecionam os gases de escape. Mais recentemente, atuadores de LMF estão sendo empregados para mitigar ainda mais os níveis de ruído. A Figura 19 mostra a

configuração da borda de saída de um Boeing, onde evidencia-se os elementos de LMF (HARTL; LAGOUDAS, 2007).

Figura 19 – Testes de voo em escala real do mecanismo VGC acionado por LMF em um Boeing 777-300ER

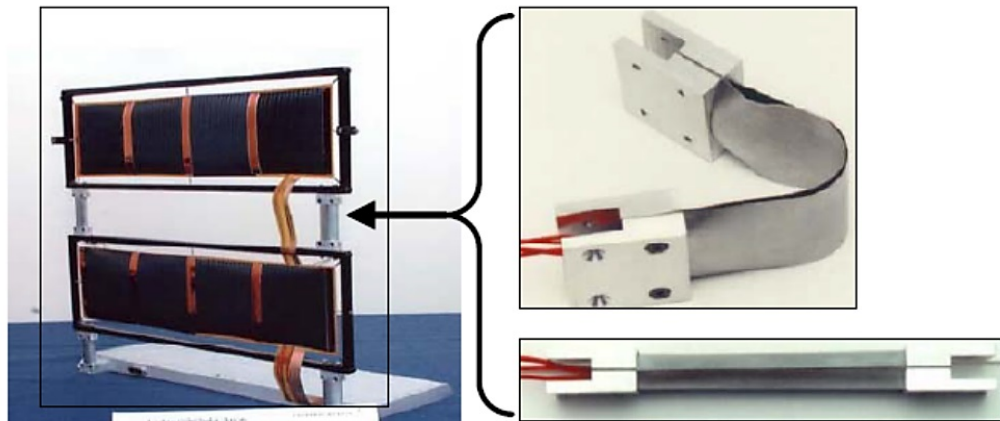


Fonte – Hartl e Lagoudas (2007)

Nesta aplicação denominada de VGC (*Variable Geometry Chevron*), pequenas vigas de LMF, que dobram as bordas durante voos de baixa altitude e baixa velocidade, aumentando assim a mistura de gases, e conseqüentemente diminuem o ruído. Ao passo que voos de altitude e velocidade mais alta, a queda na temperatura resfria os componentes de LMF, alinhando a forma de “V” que resulta no aumento do desempenho do motor.

Nas naves espaciais, as LMF foram empregadas para tratar problemas envolvendo o engate e desengate de mecanismos e peças, atuação sobre elementos, além do amortecimento de vibrações durante a decolagem e aterrissagem. Singularmente neste domínio, atuadores por flexão são aplicados na modificação da orientação de painéis solares. O mecanismo é baseado em uma tira fina de LMF que funciona como dobradiça, de modo que na fase martensítica o elemento é curvado para alcançar uma conformação em que os painéis são acondicionados, com o aquecimento ocorre a reversão da articulação, deslocando os painéis. A Figura 20 apresenta a imagem em detalhe do atuador LMF com formato de tira e sua localização na estrutura final, este sistema recebeu o nome *Lightweight Flexible Solar Array*.

Figura 20 – Sistema de atuação de painéis baseado em tiras de LMF



Fonte – Carpenter e Lyons (2001)

Robótica

Na área da robótica, as LMF encontraram diversos usos e se consolidam como um domínio de pesquisa em franco desenvolvimento. As iniciativas enfocam na elaboração de sistemas programáveis e multifuncionais projetados para manipular materiais, partes, ferramentas ou dispositivos específicos, através de movimentos organizados para executar tarefas.

Sreekumar et al. (2007) resumiu que existem alguns fatores no emprego de LMF em aplicações robóticas, que afetam o fenômeno físico durante o processo de atuação, a saber: forma do atuador, força necessária para deformar o atuador, técnica de aquecimento e resfriamento escolhida, sensores incorporados para medir parâmetros como posição, temperatura, força, resistência, somado ao tipo de esquema de controle implementado.

As áreas de aplicação dos dispositivos robóticos acionados por LMF são subdivididas em: cirurgias minimamente invasiva, micro-atuadores e garras, robôs subaquáticos, membros artificiais, robôs auto-reconfiguráveis, robôs autônomos ambulantes e manipuladores paralelos (SREEKUMAR et al., 2007; JANI et al., 2014; RODRIGUE et al., 2016).

O desafio de obter dimensões cada vez menores, com respostas cada vez mais rápidas, sem desperdiçar eficiência e potência, é uma tônica para este domínio. Entre os mais importantes casos, podem ser citados:

Dilibal, Tabanli e Dikicioglu (2004) apresentaram um protótipo robótico, análogo a uma mão, constituído por itens em LMF na região terminal acoplado a um tubo flexível

onde transita um fluido, como exposto na Figura 21. O atuador emprega o EMFR e o movimento dos “dedos” é controlado pela temperatura do fluido que aquece ou arrefece a liga LMF. Esse arranjo em relação aos atuadores convencional demonstrou vantagens, no que diz respeito a um maior controle da força aplicada reduzindo os riscos em seu emprego, prioritariamente no processo de inativação de minas terrestres.

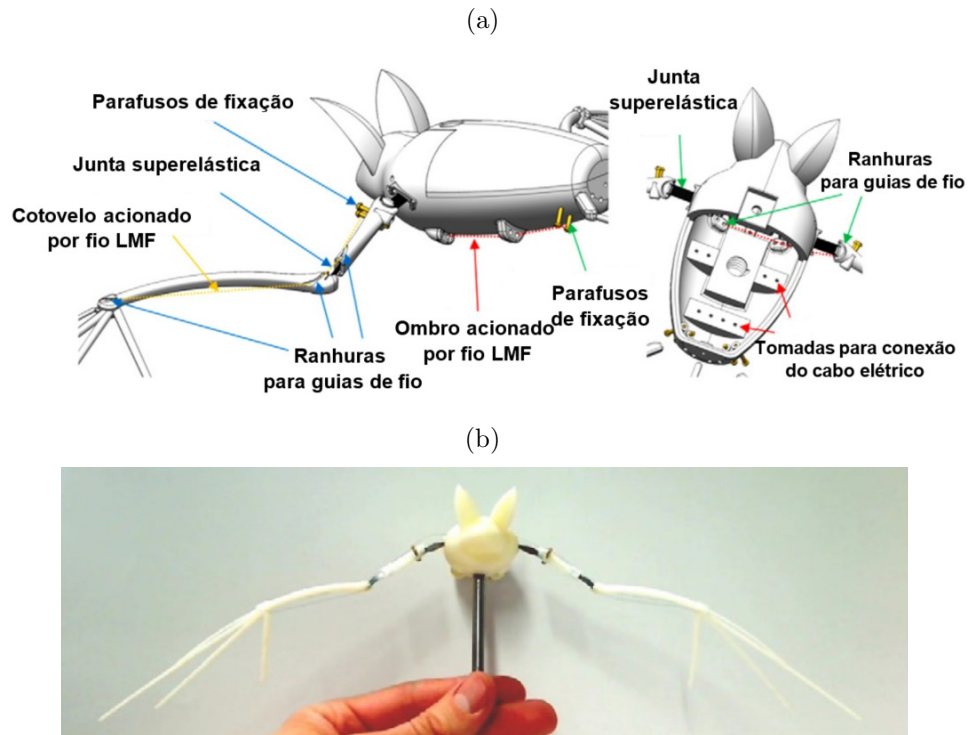
Figura 21 – Garra atuada por LMF utilizada para limpeza de campos minados



Fonte – Dilibal, Tabanlı e Dikicioglu (2004)

Furst, Bunget e Seelecke (2012) desenvolveram um conceito inspirado biologicamente em um morcego para uma plataforma, que integra elementos em LMF dentro de uma estrutura esquelética concebida através de prototipagem rápida. Neste trabalho, fios de LMF são utilizados como agentes análogos a músculos biológicos, ademais a LMF na condição superelástica são implementados como articulações flexíveis capazes de grandes ângulos de flexão. Embora os organismos biológicos tenham uma matriz de detecção intrínseca composta de nervos, os fios de LMF fornecem também sensoriamento automático em virtude de uma modificação de resistência elétrica dependente da fase constituinte. Na Figura 22, vê-se os principais constituintes do protótipo combinando impressão 3D e novas técnicas para embutir fios LMF.

Figura 22 – Projeto de um robô bio-inspirado : (a) Componentes do protótipo e (b) Morcego bio-inspirado com dois ombros e cotovelos acionados por LMF



Fonte – Furst, Bunget e Seelecke (2012)

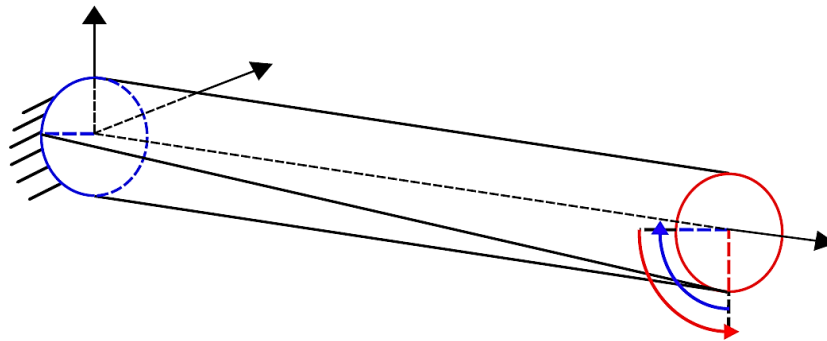
2.3 Atuadores Torcionais de LMF

O movimento final atingido por um atuador de LMF pode ser linear, rotacional ou mesmo tridimensional. Dentre as diversas categorias, distingue-se os atuadores torcionais, que se caracterizam por produzirem um movimento rotacional como resposta a um momento que tende a torcer um elemento em torno de seu eixo longitudinal. A Figura 23 mostra de forma esquemática um modelo de elemento submetido a um momento torçor ordinário.

Na sequência, expõe-se os artigos que mais contribuíram para a presente pesquisa no que tange a aplicação de atuadores torcionais de LMF. A apresentação será concisa, sugerindo-se para um estudo mais acurado a leitura dos textos originais. As pesquisas seguem uma ordem cronológica, segmentada consoante as diversas formas, que esses atuadores podem ser manufaturados, de modo a evidenciar os avanços tecnológicos arregimentados.

Song (2007) propôs um novo tipo de atuador torsional de LMF, com uma abordagem de controle robusta baseada em modos deslizantes. Este atuador rotativo emprega um fio de NiTi de 0,38 mm de diâmetro envolto em um fuso não condutor de 29,2 mm de

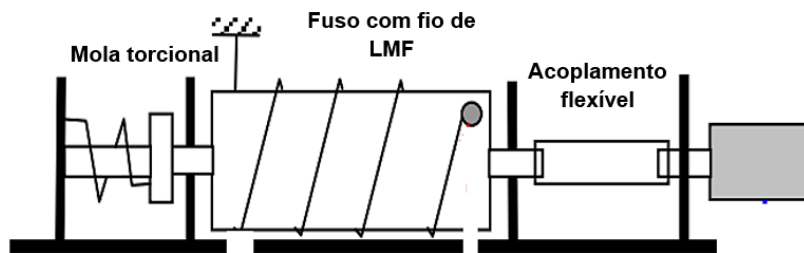
Figura 23 – Detalhe de elemento com seção transversal circular sujeito a momentos de torção



Fonte – Hu, Rabenoroso e Ouisse (2021)

diâmetro, no qual uma extremidade do fio foi fixada ao fuso e a outra extremidade presa a placa de base. Neste sistema, o fuso foi conectado a uma mola de torção pré-tensionada e após o aquecimento do fio através de efeito Joule, há contração que possibilita o giro do fuso, desde que a outra extremidade esteja rigidamente conectada a placa de base. O esboço do modelo bidimensional para o atuador rotativo está demonstrado na Figura 24.

Figura 24 – Representação do plano de ação do atuador e associação de suas partes constituintes



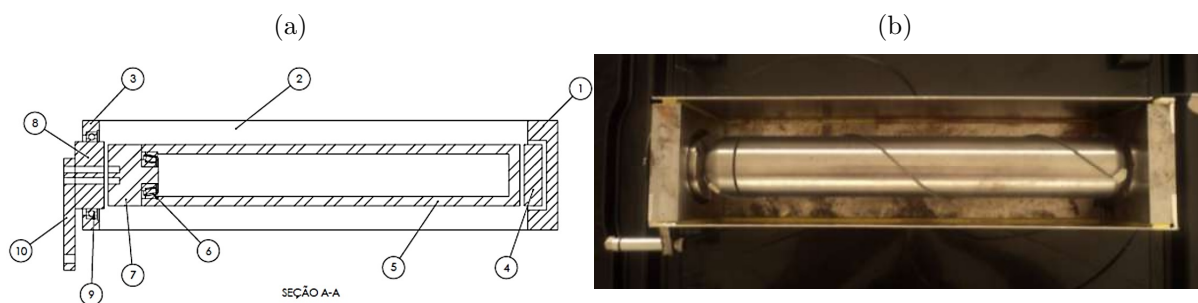
Fonte – Song (2007)

Os resultados indicaram que o atuador pode prover com segurança um torque de aproximadamente 2,65 kg.cm. Além disso, o autor salienta os proveitos auferidos com a estratégia de controle robusto em confronto com o controle PD, em que o sistema pode alcançar uma rotação de 100° com erro em estado estacionário de $0,2^\circ$.

Em sua dissertação de mestrado, Bravo (2013) modelou e concebeu um atuador torcional para a investigação experimental do deslocamento angular e torque gerados pela recuperação de forma, semelhante ao trabalho de Song (2007). Nesta proposta, desenvolveu-se uma formulação simplificada para o projeto do atuador torcional levando

em conta como variáveis de projeto: o comprimento e o diâmetro do atuador, o diâmetro do fio e o ângulo de enrolamento. Dentro deste escopo, foi manufaturado um banco de prova linear para caracterizar a recuperação de forma do material e as forças geradas sob deformação longitudinal de dois diâmetros distintos de fios de NiTi, como fonte de aquecimento foi empregado água em ebulição. Em suma, observou-se que os resultados experimentais atingidos são consistentes com a análise teórica, principalmente considerando as limitações do experimento de torção. Os resultados de deslocamento angular apontaram 18° para os dois fios utilizados ao considerar uma deformação recuperável por EMF de aproximadamente 3%. Em termos de força de recuperação, foi possível a obtenção de até 1100 N. A autora concluiu que o conceito proposto é válido para aplicações no setor aeronáutico. Na Figura 25a, em primeiro plano, é apresentado um corte de seção completa do atuador para evidenciar as peças que o compõem, além do posicionamento do fio sobre o mesmo. Enquanto na Figura 25b é apresentado a configuração final do protótipo.

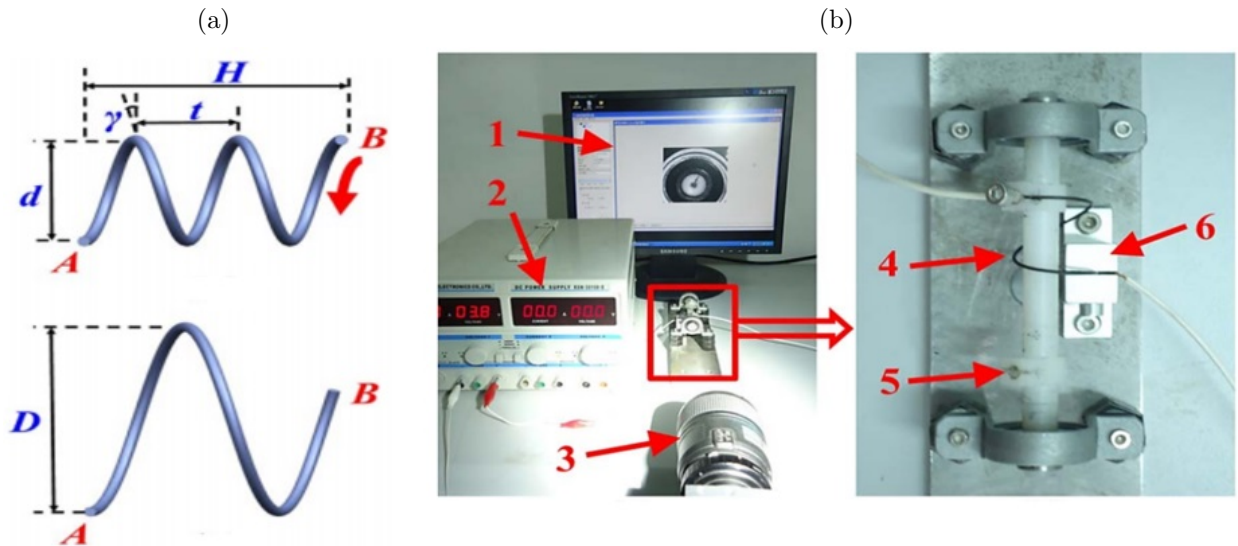
Figura 25 – (a) Detalhe do corte de seção exibindo as partes do atuador e (b) Atuador com fio de NiTi instalado



Fonte – Bravo (2013)

Yan, Huang e Zhang (2014) apresentaram a proposta de um atuador de torção, que não precisa de mecanismo de conversão de movimento e pode gerar movimento rotativo diretamente por meio da modificação de curvatura da espira, Figura 26a, associado a transformação de fase em um fio de LMF, consequência direta do trabalho realizado por Song (2007). A organização dos elementos que perfazem a unidade de atuação pode ser observada na Figura 26b.

Figura 26 – Configuração experimental para o atuador utilizado no estudo: (a) Atuador de torção LMF proposto em fase de martensita e austenita e (b) Experimento: 1 – Computador, 2 – Fonte de potência, 3 – Câmera, 4 – Fio de LMF, 5 – Eixo de plástico, 6 – Fixador



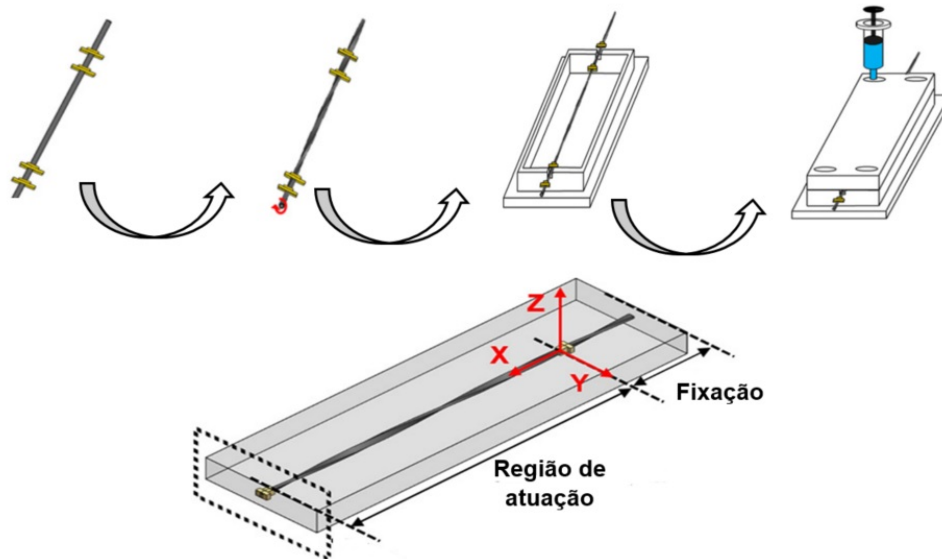
Fonte – Yan, Huang e Zhang (2014)

Uma série de experimentos foi conduzida para investigar o desempenho do atuador em termos de torque sob variação de distintos parâmetros geométricos, a saber: diâmetro principal na fase martensítica e austenítica, além do ângulo de hélice. Ficou constatado que o ângulo de rotação máximo pende para aumentar proporcionalmente a diferença no número de espiras entre as fases, bem como o torque de saída cresce com o aumento do ângulo de hélice e do diâmetro médio na fase de austenita, contudo reduz com a elevação do diâmetro médio na fase de martensita.

Neste contexto apareceram também proveitos fundamentados em compósitos ativos, que têm a habilidade de executar funções por meio da detecção e atuação realizadas por materiais funcionais embebidos no interior da estrutura. Shim et al. (2015) fabricaram utilizando um fio de NiTi (55%Ni – 45%Ti), um novo material compósito com uma matriz polimérica (PDMS) envolta no fio mencionado previamente, com pré-tensão inicial antes da cura. O novo material, classificado como *Smart Soft Composite* (SSC), foi capaz de produzir deformações contínuas e com alta magnitude. O mesmo é atuado por corrente elétrica, de modo que, quanto maior seu valor, mais rapidamente o ângulo de torção é alcançado. A pré-tensão aplicada no fio é diretamente ligada ao momento torçor produzido. Assim, fios rotacionados com ângulos maiores antes da cura do material produzem maior momento

torçor. A Figura 27, a seguir, mostra os materiais e métodos empregados, evidenciando o processo de fabricação do atuador inteligente.

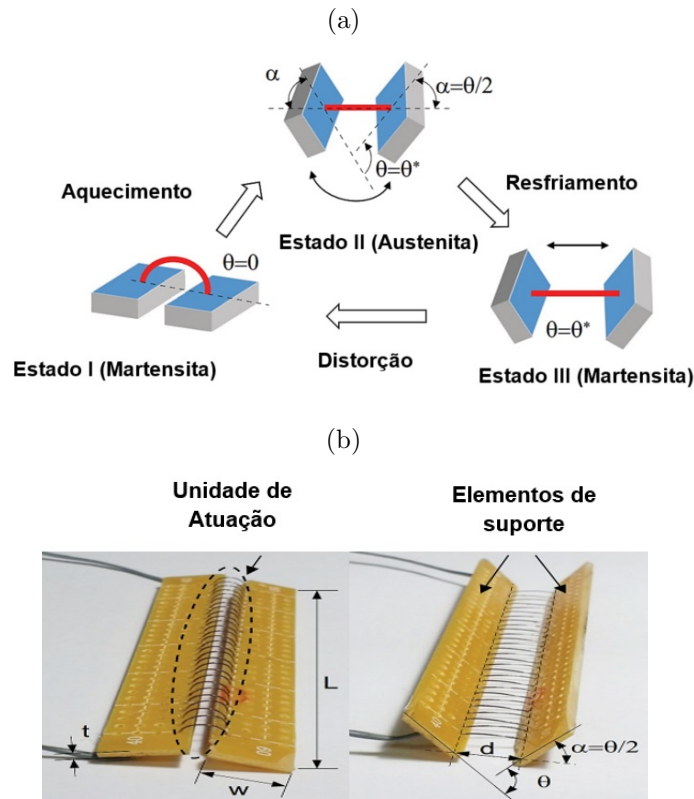
Figura 27 – Representação esquemática do método de fabricação de um atuador de torção constituído por fio de NiTi e matriz polimérica



Fonte – Adaptado de Shim et al. (2015)

Shin et al. (2016) criaram um atuador modular torsional fundamentado mais uma vez em fios de LMF. A Figura 28a demonstra o princípio de funcionamento do atuador: a unidade de atuação é previamente deformada em forma de arco através de carregamento mecânico à temperatura ambiente. Aquecendo o elemento de LMF, a unidade de atuação restaura sua forma linear original enquanto se contrai. Ao resfriar a unidade de LMF, a unidade de atuação é extraída, mantendo sua forma anterior. Os autores consideraram a caracterização térmica e mecânica de uma unidade modular, seguido da configuração acoplando módulos em série. Este atuador, por consequência, pode ser empregado diretamente como um robô biologicamente inspirado ou *soft robot*. A partir de experimentos, os autores detectaram que o movimento de rolamento e a modificação de forma ocasionada pela ativação das unidades de atuação, alcançam a performance desejada para a aplicação alvo. A Figura 28b resume o módulo de atuação citado.

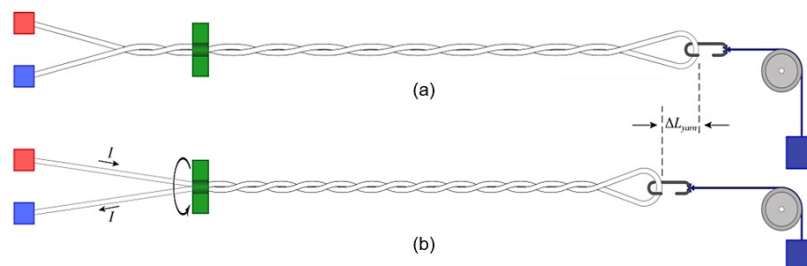
Figura 28 – (a) Esquema do atuador modular utilizando fios de LMF e os respectivos estados termomecânicos e (b) Protótipo de atuador de torção compreendendo uma unidade de atuação e dois



Fonte – Shin et al. (2016)

Mirvakili e Hunter (2017) descreveram um novo atuador de torção composto, simplesmente, de um microfio de NiTi com aproximadamente 25 μm de diâmetro, onde uma extremidade foi particionada em duas, conectadas a contatos elétricos, conforme ilustrado na Figura 29. Na parte central foi acrescida uma peça em alumínio para investigar o movimento desenvolvido pelo atuador, enquanto na outra extremidade foi acoplado uma polia com massa.

Figura 29 – (a) estrutura do atuador e seu ciclo de trabalho e (b) Movimento ocasionado pela passagem da corrente elétrica sobre os microfios de nitinol

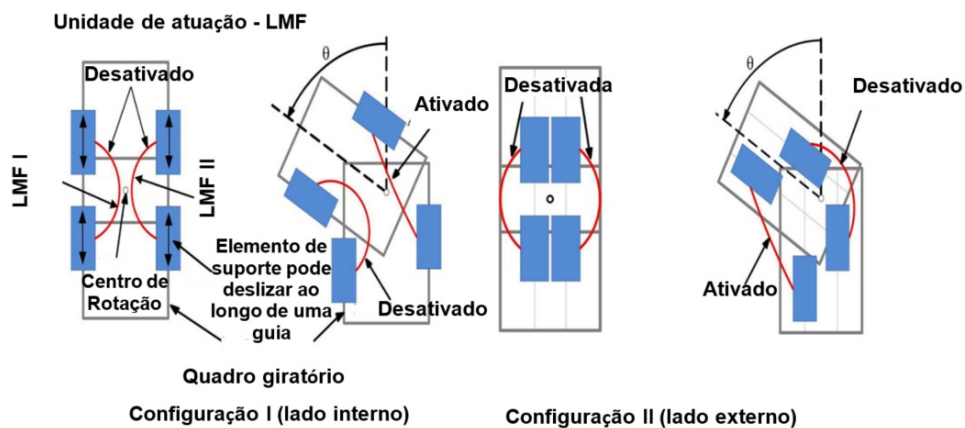


Fonte – Mirvakili e Hunter (2017)

O princípio de funcionamento deste atuador está baseado na fixação das extremidades, o que possibilita a ação de rotação em apenas parte de seu comprimento. Notadamente, a região a ser atuada estabelece um momento torçor sobre o segmento não atuado, de modo que nesta porção um torque oposto e crescente se estabelece conforme a rotação prossiga. A caracterização termomecânica deste elemento dispôs para a mensuração da velocidade e curso gerado, uma câmera de alta velocidade (1000 fps) associado a um algoritmo em MATLAB para extração dos dados. Os autores comprovaram que a atuação linear muito pequena no fio nos permite empregar este atuador em dispositivos no qual o comprimento deve ser constante e apenas o curso de torção é desejável.

Ainda no mesmo período, Kim et al. (2019) publicaram um estudo referente a atuadores rotacional em LMF, no qual abordaram um novo conceito para fornecer deslocamentos angulares nos sentidos horário e anti-horário. Usaram o mesmo princípio adotado por Shin et al. (2016), isto é, unidades (módulos) formada por fios de LMF “costuradas” sob determinado aspecto, que emulavam o sistema musculoesquelético humano. Para melhor visualização do atuador estudado, um esquema dos itens que compõem o elemento proposto é mostrado na Figura 30.

Figura 30 – Configurações dos atuadores rotativos LMF bidirecionais

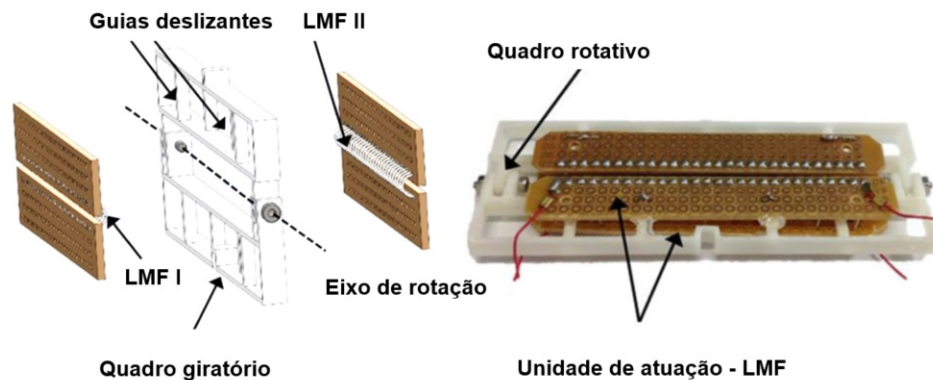


Fonte – Kim et al. (2019)

Em relação ao conceito desenvolvido anteriormente, no qual o atuador LMF facultava o movimento de rotação em apenas uma direção, mas não invertia sua direção quando resfriado sem o auxílio de um esforço externo, os autores destacam que o novo atuador pode ser ativado de modo independente através um par de unidades antagônicas para fornecer movimentos rotativos bidirecionais. Dependendo da direção de rotação desejada, a unidade

de atuação LMF I ou LMF II é ativada enquanto a outra unidade de atuação é desativada. As extremidades das unidades de atuação LMF são rigidamente fixadas aos elementos de suporte que municiam uma conexão à estrutura rotativa como mostrado na Figura 31. Quanto a caracterização do atuador, os autores assumiram a necessidade experimental de discriminar a rigidez torcional, propriedades elétricas e velocidades de resposta térmica para diversas condições de corrente de entrada e temperaturas correspondentes.

Figura 31 – Protótipo do atuador bidirecional LMF

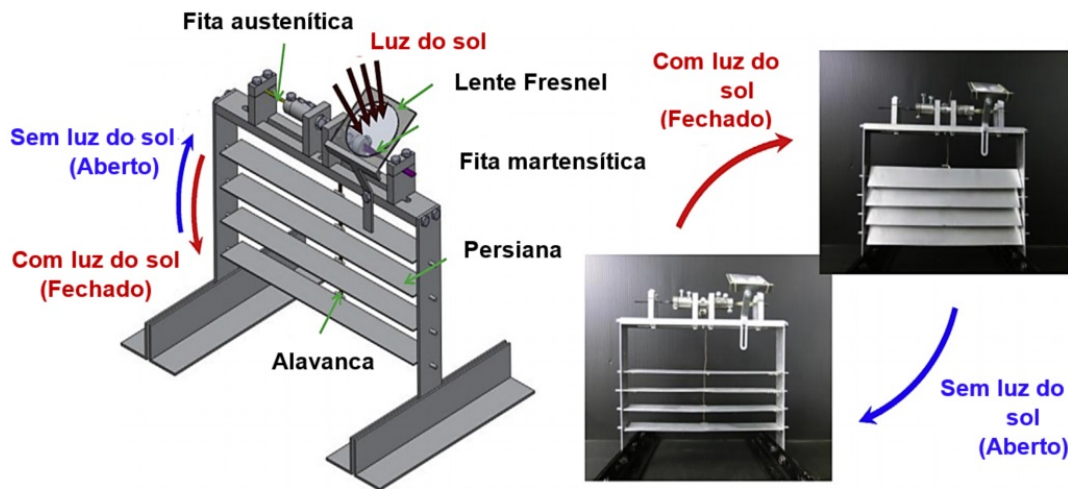


Fonte – Kim et al. (2019)

Tobushi et al. (2013) ensaiaram fitas de NiTi submetidas a esforços de torção (alternada e pulsante) e carregamentos cíclicos, visando compreender o comportamento microestrutural e mecânico do elemento. Este estudo considerou fitas martensíticas medindo 0,25 mm de espessura e 5 mm de largura, além de espécimes na fase austenítica com 0,25 mm de espessura e 2,9 mm de largura. Os resultados reportam que a transformação martensítica aparece primeiro ao longo da borda da fita devido ao alongamento prévio e cresce até a região central. Ao mesmo tempo, a vida em fadiga na torção alternada constatada foi menor do que na torção pulsante. Foi investigado, também, que a vida em fadiga tanto na torção pulsante quanto na torção alternada é expressa pela relação unificada do trabalho dissipado em cada ciclo. Através de duas provas de conceitos, os autores concluíram que os elementos em LMF na forma de fitas podem ser usados com segurança em aplicações práticas sem qualquer risco de falha por fadiga. A Figura 32 apresenta um desenho esquemático trazendo uma prova de conceito, que remete a um dispositivo movido a energia solar, com detalhes do posicionamento dos atuadores.

Alguns trabalhos se debruçaram sob o elemento mecânico mola. Pioneiramente, Yoshida et al. (1999) desenvolveram estudos sobre um modelo miniaturizado de um sistema

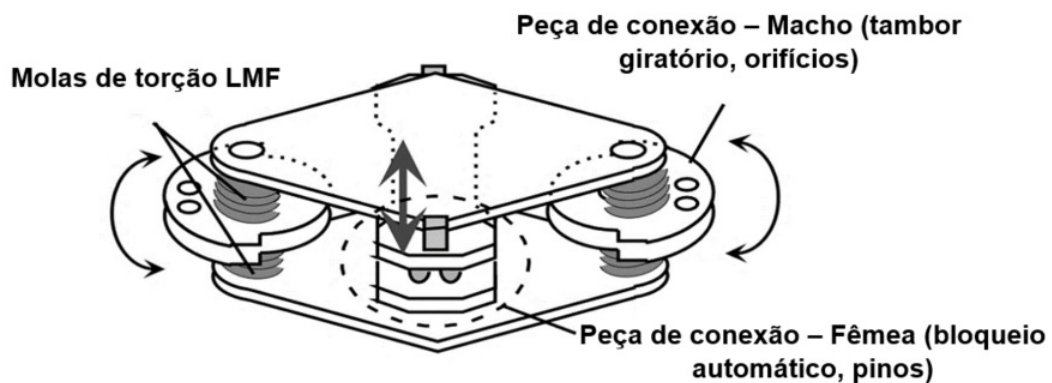
Figura 32 – Modelo esquemático do experimento da fita de LMF proposto para o dispositivo



Fonte – Tobushi et al. (2013)

robótico modular autoconfigurável, apresentando o acionamento por meio de duas molas de torção em LMF a base de NiTiCu. Além de considerações quanto aos parâmetros de torque e movimentação desenvolvidos, foi estabelecido o uso destas unidades para construir um sistema reconfigurável 3D, evidenciando que o algoritmo de autoconfiguração distribuída desenvolvido para a disposição em 2D pode ser aplicado às unidades mais elaboradas. Uma visão qualitativa das diferentes partes que compõem o mecanismo pode ser vista na Figura 33 .

Figura 33 – Vista esquemática de uma unidade de atuação

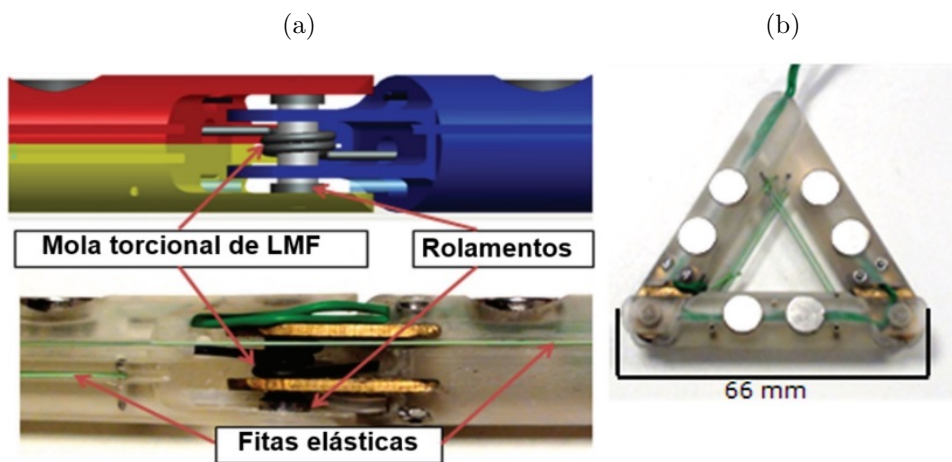


Fonte – Adaptado de Yoshida et al. (1999)

Salerno et al. (2013) projetaram um dispositivo torcional de LMF para uso cirúrgico. Para realizar uma intervenção minimamente invasiva, um dispositivo inicialmente cilíndrico com dimensões compatíveis aos de vias do sistema digestório foi introduzido pela boca do

paciente para alocação intra-abdominal. O dispositivo em questão possui duas articulações, onde estão dispostas molas torcionais. Ao promover uma atuação com corrente elétrica, o mecanismo se transforma em uma plataforma triangular, que é a uma estrutura estável com o uso de ímãs. Para que o objeto volte a configuração inicial, elástico restauradores promovem a força necessária ao se anular a corrente de atuação. O esquema do atuador torcional empregado e o detalhe do dispositivo são mostrados na Figura 34.

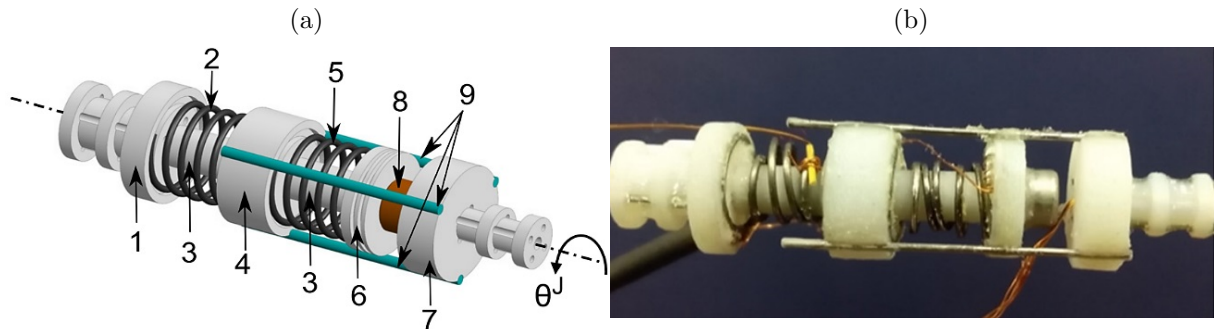
Figura 34 – (a) Representação CAD (parte superior) e protótipo fabricado (parte inferior) do atuador LMF e (b) Protótipo do dispositivo de ancoragem com atuação torcional



Fonte – Adaptado de Salerno et al. (2013)

Sheng e Desai (2015) criaram um atuador com molas torcionais de LMF para juntas robóticas na escala de centímetros que interagem com o ambiente em que se encontram. O atuador é constituído por um conjunto com duas molas torcionais LMF antagonistas, que possibilitam a criação de um mecanismo que gera valores de torque relativamente elevados para o tamanho miniaturizado do mecanismo. Este avanço tecnológico evita o projeto de atuadores torcionais convencionais elétricos ou hidráulicos que são inerentemente problemáticos na adequação a espaços físicos limitados. A Figura 35a é uma representação esquemática do atuador proposto, e depois um protótipo do atuador desenvolvido, Figura 35b.

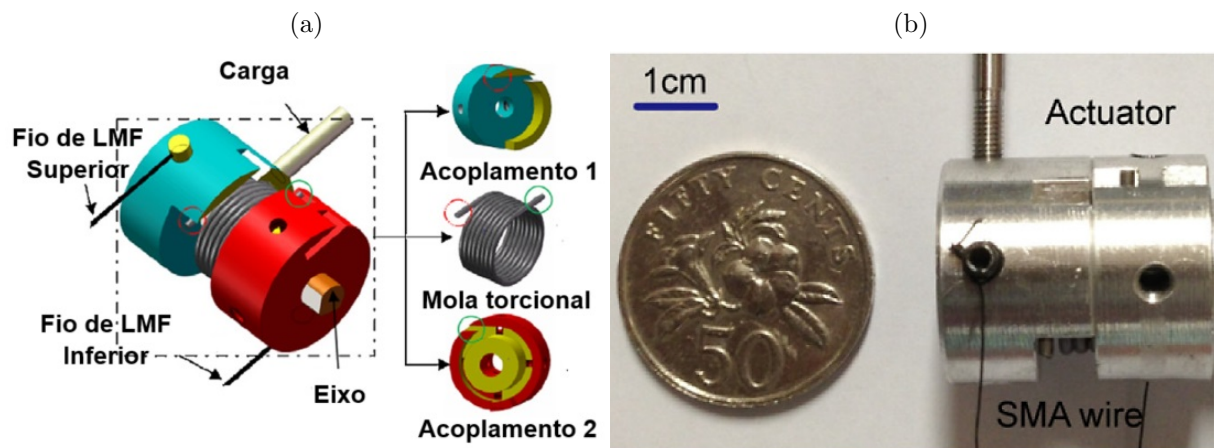
Figura 35 – (a) Esquema do protótipo e (b) Modelo do atuador torcional com molas de LMF



Fonte – Sheng e Desai (2015)

No trabalho Guo et al. (2015) foram expostos a elaboração assim como controle de um atuador em LMF inspirado na estrutura biológica do cotovelo humano. Os autores mostram na Figura 36a o modelo bioinspirado proposto, em outras palavras, dois fios de LMF, dois acoplamentos e uma mola de torção emulam músculos, ossos e tendões, respectivamente e na Figura 36b o protótipo do atuador em LMF.

Figura 36 – Atuador em LMF: (a) esquema do modelo em CAD do atuador bioinspirado com seus componentes integrados e (b) representação do protótipo real

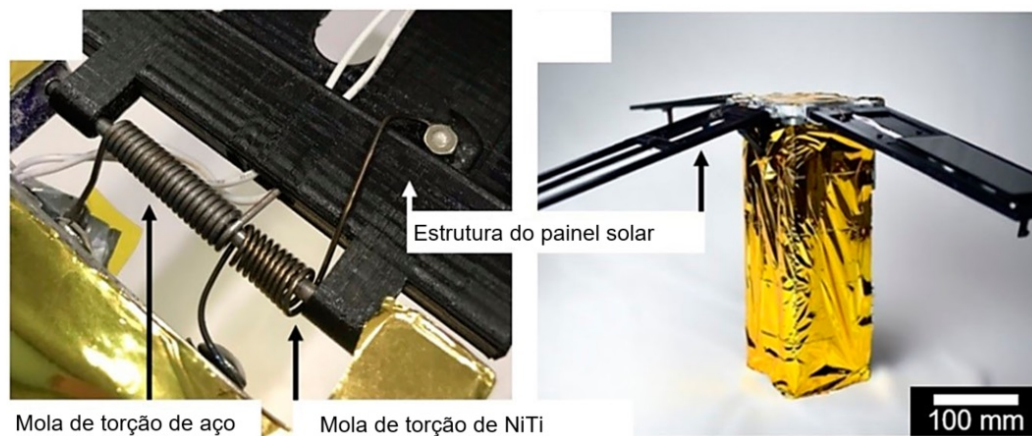


Fonte – Guo et al. (2015)

Gantz et al. (2022) desenvolveram um mecanismo inteligente capaz de reconfigurar a forma de painéis solares com a utilização de elementos ativos. Os autores propuseram um protótipo fundamentado na colaboração entre 3 mecanismos, a saber: retenção, orientação e abertura. Os mecanismos de retenção e orientação contam com acionamento em regime permanente acionado por molas de extensão de NiTi. O mecanismo de abertura utiliza molas de torção em regime pseudoelásticas para amortecer a liberação dos painéis e minimizar

acelerações. Quando o protótipo atinge a altitude desejada, a fonte de alimentação envia uma pequena quantidade de corrente para fornecer aquecimento resistivo ao atuador LMF, o que permite que os painéis solares se movam em direção às suas posições ativas. O mecanismo de orientação incorpora dois elementos LMF em oposição para ajudar os painéis a rastrear o sol. Os dois elementos opostos estão conectados a um único eixo, que controla a rotação do painel solar principal. Este projeto foi empreendido no âmbito da iniciativa CASMART (*Consortium for the Advancement of Shape Memory Alloy Research and Technology*), que trabalha para promover o crescimento e a adaptação de tecnologias de atuação, com o objetivo de alcançar uma nova compreensão dos materiais por meio de experimentação e simulações. A Figura 37 a e b exibem, respectivamente, o detalhe do mecanismo de atuação realçando uma mola de torção de NiTi e a geometria final do protótipo.

Figura 37 – Painel solar: (a) Mecanismo de abertura e (b) representação do protótipo CubeSat

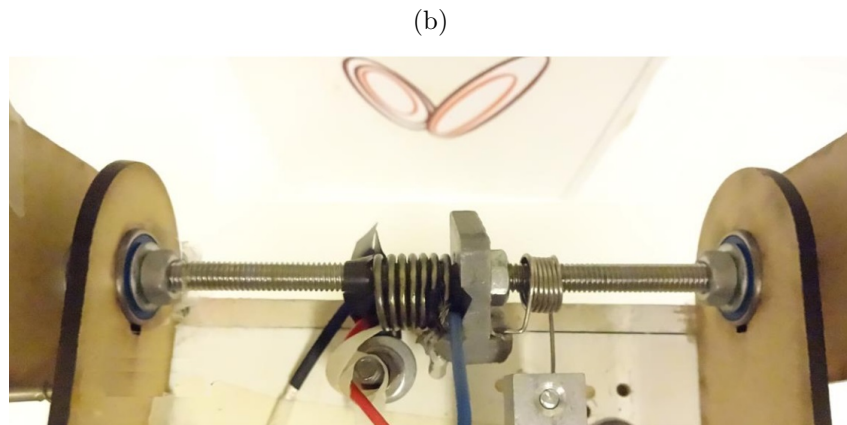
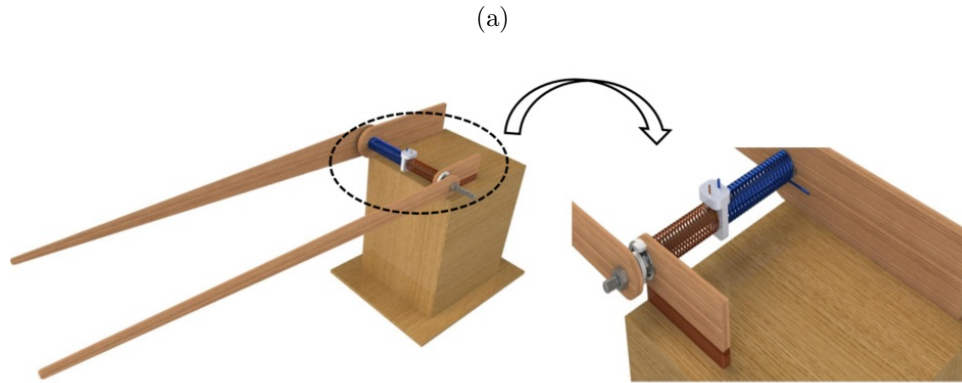


Fonte – Gantz et al. (2022)

Silva (2018) investigou a “morfagem” de *winglets* empregando atuadores com LMF. Apresentam-se dois modelos alternativos de atuação em configuração bias: sistema mola-polia e sistema com molas torcionais. O estudo apresenta duas provas de conceitos e constrói dois protótipos para verificações experimentais. Os dois modelos conceituais representam as condições de aplicação da asa em escala reduzida. A Figura 38a exibe a maquete virtual, exclusivamente, do sistema com molas torcionais e os detalhes da montagem experimental, Figura 38b. Ademais, ainda foram efetuadas diversas investigações paramétricas a fim de avaliar a influência do escoamento do ar, sensibilidade do diâmetro do fio LMF e índice de mola. Os resultados revelaram as condições em que é possível obter

a variação desejada da geometria do winglet e a capacidade de atuação a partir de molas LMF.

Figura 38 – (a) Detalhe conceitual do atuador torcional para aplicação em um Winglet e (b) Atuador LMF e elástico linear em destaque



Fonte – Silva (2018)

Ferro (2018) apresentou uma metodologia para a criação de quirodáctilos a serem implementados em próteses para amputados. As próteses foram fabricadas utilizando prototipagem rápida e aproveitando como atuadores, molas torcionais de NiTi. Foram estudados diferentes métodos, tanto de acionamento quanto de atuadores para a execução dos movimentos antropomórficos do membro amputado. No que diz respeito aos atuadores, foi enfatizado a análise de molas de torção com diferentes tratamentos térmicos, a fim de estabelecer a melhor combinação para a realização dos movimentos e força. A força atingida por cada mola de torção que compõem o sistema foi de aproximadamente 7 N e o acionamento em todas as falanges chegou-se ao quantitativo de 21 N. Na Figura 39a tem-se a geometria escolhida para o protótipo e a demonstração dos ângulos de rotação das falanges, conforme exibe a Figura 39b.

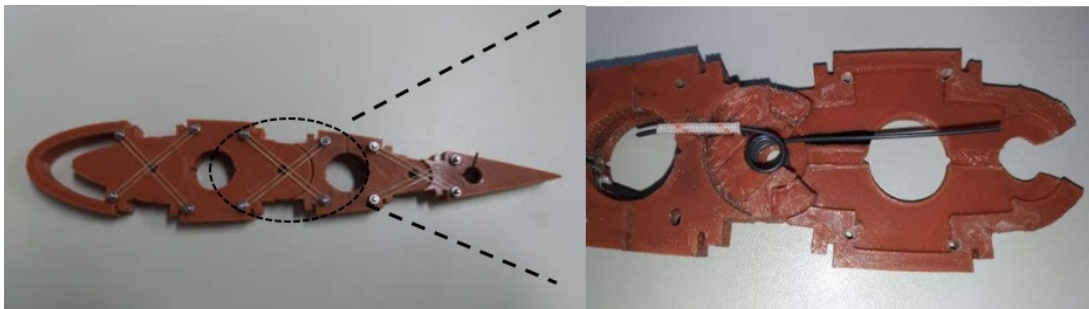
Figura 39 – Modelo 3D impresso em PLA com adição de mola torcional: (a) Montagem das falanges distal e media e (b) Perpendicularidade da base do protótipo do dedo humanoide



Fonte – Ferro (2018)

O estudo de Santos (2019) propõe o projeto e a confecção por manufatura aditiva de uma nervura inspirada no perfil NACA 0020, dividida em quatro segmentos articulados entre si por rótulas e molas torcionais de NiTi. O protótipo construído foi ensaiado para a definição, por captura de imagens, da faixa de configurações geométricas que conseguiram ser alcançadas por ativações individuais e combinadas das três molas torcionais. Para cada uma destas configurações, simulações numéricas foram implementadas com o uso do programa XFOIL, objetivando a caracterização aerodinâmica das configurações. Os resultados conquistados indicaram problemas de natureza construtivo que prejudicaram o pleno funcionamento do conceito, não obstante credencia o método ora apresentado como sendo viável no contexto de asas de geometria adaptativa. O protótipo em questão e a configuração, em detalhes, indicando o posicionamento da mola de LMF são exibidos na Figura 40.

Figura 40 – Nervura impressa em PLA com detalhe para o posicionamento da mola torcional de NiTi



Fonte – Santos (2019)

No trabalho desenvolvido por Davidson, Liang e Lobitz (1996) aborda-se o desdobramento de um dos primeiros estudos na literatura relativo a atuadores torcionais a base de LMF. Especificamente nesta pesquisa, a discussão sobrevém sob um elemento em formato de haste constituído por uma liga equiatômica NiTi, que conta com comprimento de 13,35 cm atrelado a um diâmetro equivalente de 1 cm, no qual foram testadas as informações básicas necessárias ao projeto de um atuador, que incluíram as relações torque-rotação, torque-temperatura e um estudo pioneiro de fadiga funcional. Compete reportar, que neste trabalho ainda há execução de uma modelagem teórica do atuador de torção. Os resultados desta pesquisa sugeriram que eixos maciços em LMF são atuadores poderosos, proporcionando altos valores de torque. No mesmo ano, Liang et al. (1996) partiram do relatório proposto Davidson, Liang e Lobitz (1996) para propor aplicações de atuadores torcionais no controle ativo de pás de rotor de helicópteros.

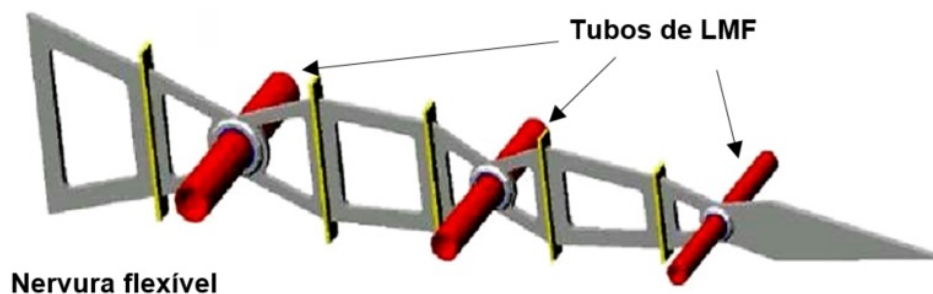
Jardine et al. (1996) investigaram experimentalmente a adoção de tubos de NiTi com EMF, a fim de produzir pequenas mudanças na torção e curvatura de asas, em aeronaves militares de alto desempenho. As configurações dos atuadores foram dimensionadas não apenas para ajustar-se dentro de um modelo em escala, como também compensar o efeito da rigidez estrutural dos sistemas que perfazem a asa. Os resultados detectaram que após algum condicionamento, o tubo de 2,54 cm ergueu mais de 31 kg a uma distância de 45 cm do centro de rotação, o que corresponde a um torque de 141 N.m. A rotação gerada pelo tubo foi medida em torno de $4,5^\circ$. Isso corresponde a uma tensão de recuperação de aproximadamente 200 MPa. Além disso, Lobitz et al. (1996) acrescentaram a demonstração do uso de hastes LMF para controlar a forma de coletores solares. Seu conceito empregava um arranjo de hastes de NiTi para obter os comprimentos focais desejados na placa do coletor.

Prahlad e Chopra (2007) investigaram o efeito da torção pura no comportamento de hastes e tubos formados de LMF, empregando modelos constitutivos do atuador e caracterização experimental. A compreensão fundamental destes atuadores está relacionada a aplicações, que engloba a modificação da distribuição de torção em uma pá tiltrotor, objetivando eficiência de voo em diversas circunstâncias. O comportamento do atuador foi descrito por um modelo de torção, envolvendo a extensão da formulação unidimensional (uniaxial) da fenomenologia LMF, isto é, os parâmetros para o modelo uniaxial derivados do teste de uma haste ou tubo de LMF são usados para prever as características de torção do mesmo material. Os autores também apresentaram uma investigação experimental

abrangente e correlação do modelo com o comportamento de tensão e torção de hastes e tubos LMF. De maneira geral, os resultados indicaram que o modelo teórico demonstra boa concordância com os dados experimentais em uma ampla gama de condições termomecânicas.

Icardi e Ferrero (2009) apresentaram um estudo preliminar que teve como objetivo verificar a viabilidade de uma asa adaptativa para um pequeno avião não tripulado (UAV), que é totalmente acionada por dispositivos de LMF. A capacidade da asa em suportar a carga aerodinâmica, a potência requerida pelos atuadores e sua força e torque durante o voo são examinados por meio de simulações por elementos finitos. Tubos concêntricos de torção LMF são empregados para o controle de curvatura da asa. A Figura 41 ilustra esses tubos LMF com deformação limitada a 4%, para permitir uma recuperação completa da LMF, uma rotação de 40° na ponta da asa também foi alcançada.

Figura 41 – Nervura flexível para controle de arqueamento, destacando tubos de torção em LMF

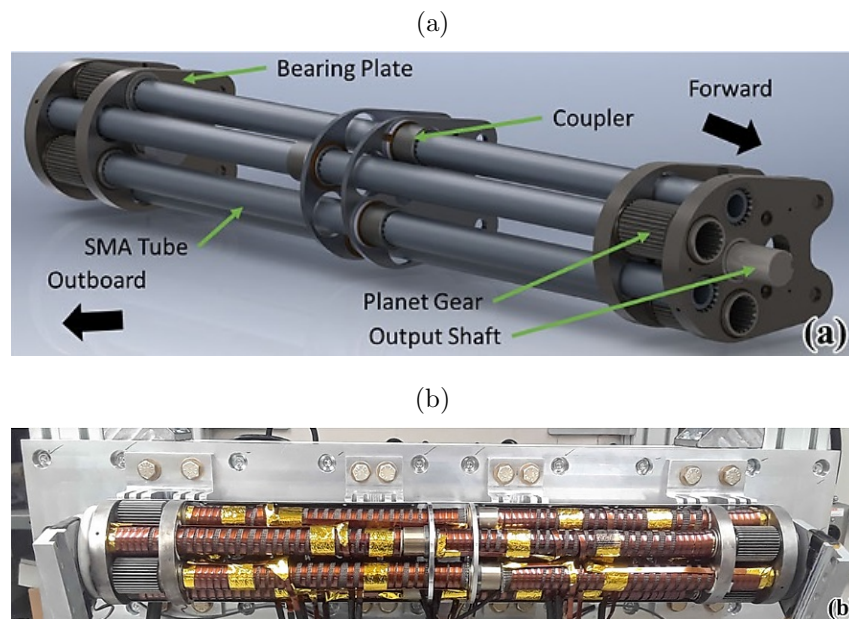


Fonte – Icardi e Ferrero (2009)

Mais recentemente, devido à demanda por LMF de alta temperatura, as ligas de NiTiHf se tornaram fortes candidatas a atuadores rotativos. Estas ligas possuem alta temperatura de transformação (A_f), correspondente a 500 °C, além de boa estabilidade e baixo custo em comparação com outras ligas consideradas de alta temperatura. Benafan e Gaydos (2017) apresentaram um exame detalhado da capacidade de tubos de torque de NiTiHf sujeitos a ciclagem termomecânica (0–175 N.m). Os autores mostraram que, até o presente momento, eram escassos os estudos com dados empíricos sobre o dimensionamento de tubos de torque com comprimento, diâmetro externo e espessura de parede variáveis, exceto os dados limitados relatados por Jardine, Bartley-Cho e Flanagan (1999) e Keefe e Carman (2000). Assim foi verificado o potencial torque-ângulo, EMFR e estabilidade dimensional dos elementos em apreço.

Em um estudo posterior, Benafan et al. (2019) desenvolveram um atuador de torção bidirecional utilizando tubo LMF antagonista para o projeto de asa adaptativa denominado SAW sob tutela da NASA. O tubo LMF possui 3 mm de espessura e 304 mm de comprimento, resultando em um movimento de dobra de $\pm 70^\circ$ das asas durante um teste de voo. A Figura 42a indica o aspecto geométrico do atuador através do CAD e sua forma real, Figura 42b.

Figura 42 – Renderização do atuador de 2.260 N.m e (b) Dispositivo real conectado à bancada de teste do F/A-18



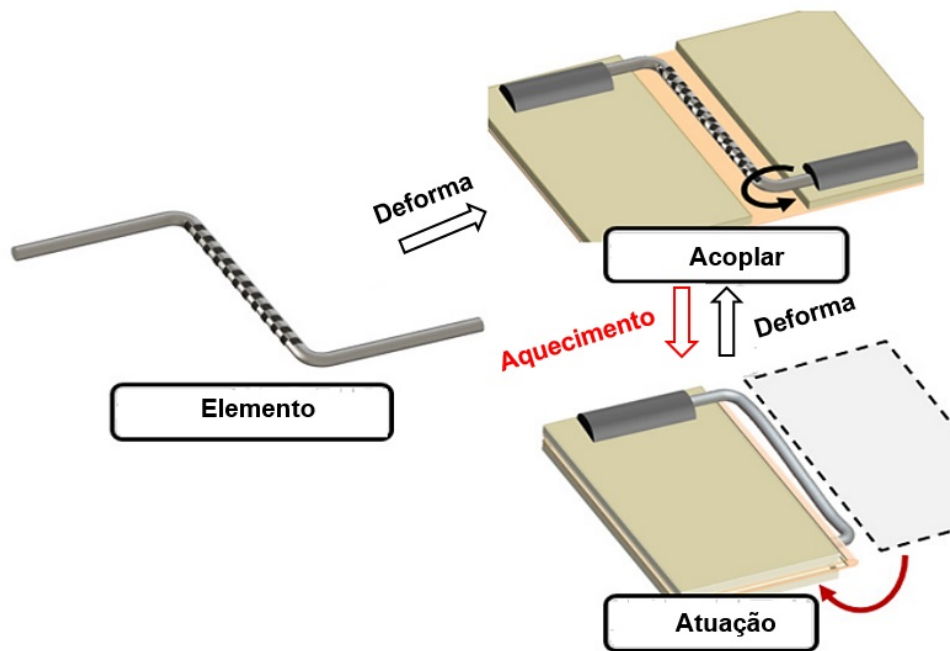
Fonte – Benafan et al. (2019)

Stroud e Hartl (2020) realizaram uma compilação abrangente de estudos em atuação torcional de LMF, sobretudo de elementos tubulares e hastes. Uma modelagem do elemento foi delineada e o desempenho teórico demonstrado em confronto com os dados experimentais produzidos anteriormente. Consideraram que as abordagens envolvendo modelagem de alta fidelidade representaram com razoável precisão o comportamento dos tubos de LMF, enquanto as equações de elasticidade revelaram suficientes como aproximação de primeira ordem para alguns aspectos do desempenho do tubo e haste. Os autores concluem com uma discussão sobre os desenvolvimentos futuros necessários para permitir as aplicações comerciais destes elementos.

Do exposto, a fim de desenvolver novos atuadores com base em LMF, outras geometrias foram testadas. Koh, Kim e Cho (2014) obtiveram um atuador baseado em um fio torcido de LMF, que ao ser incorporado em estruturas origênicas materializam

a ação rápida de dobra sob aquecimento. A Figura 42 exibe o esquema com o princípio de funcionamento do atuador: o aquecimento provoca a recuperação da forma original do elemento de LMF, o que causa a rotação da extremidade, e provoca o movimento de fechamento da estrutura enquanto fio restabelece sua condição original sem deformação.

Figura 43 – Atuador de LMF baseado em fio retorcido disposto em uma configuração antagonista



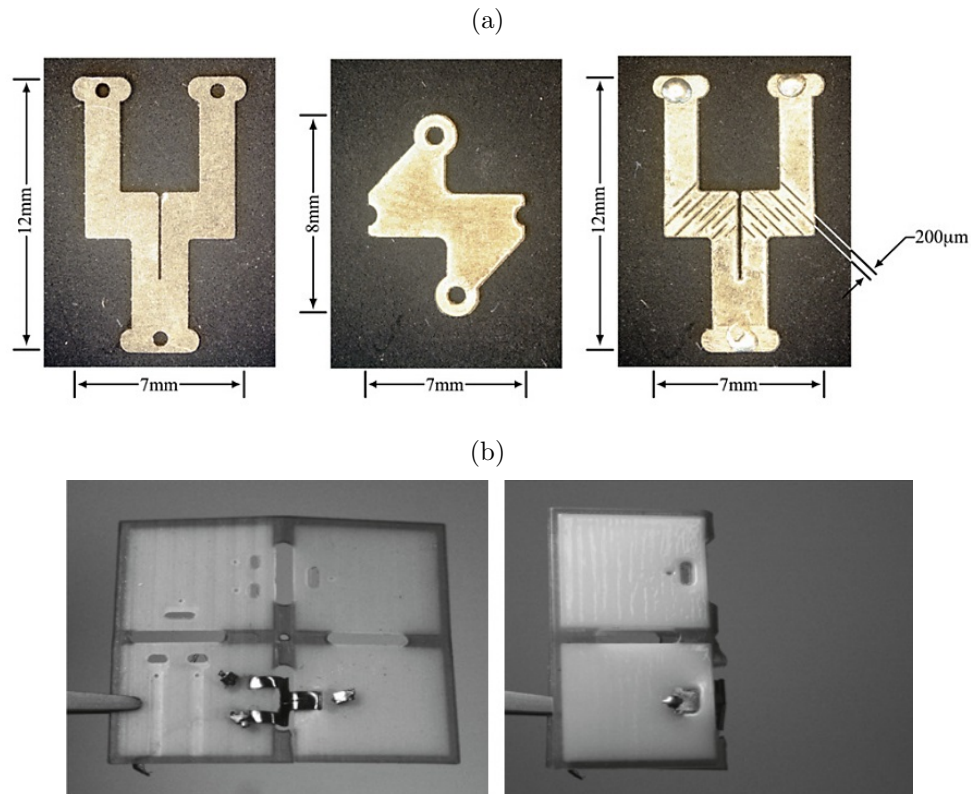
Fonte – Koh, Kim e Cho (2014)

O projeto prevê que a quantidade de rotação depende do comprimento do fio, ou seja, um fio de LMF com 12 mm de comprimento e cerca de $200\ \mu\text{m}$ de diâmetro pode induzir uma rotação de 540° . Neste conceito os fios de LMF foram dispostos em pares lado a lado para girar as faces em ambas direções. O torque máximo de 70 mN.cm foi obtido neste arranjo antagônico.

Paik, Hawkes e Wood (2010) propuseram é um atuador torcional de baixo perfil utilizando uma liga de NiTi, reservado a aplicações robóticas em meso e micro-escala. Baseados no princípio de design do atuador, os autores testaram vários parâmetros de projeto e variantes de fabricação. Basicamente, o aquecimento foi proporcionado por efeito Joule convencional com um elemento de aquecimento externo de NiCr para concentrar o calor nas regiões, onde se almejava maiores níveis de deformação. Os resultados mostraram alto torque e densidades de energia sem a necessidade de mecanismos auxiliares para amplificação de torque. A Figura 44a é uma representação esquemática das geometrias

para o atuador torcional, e depois do princípio de funcionamento, com destaque para a capacidade de movimento de 180° , Figura 44b .

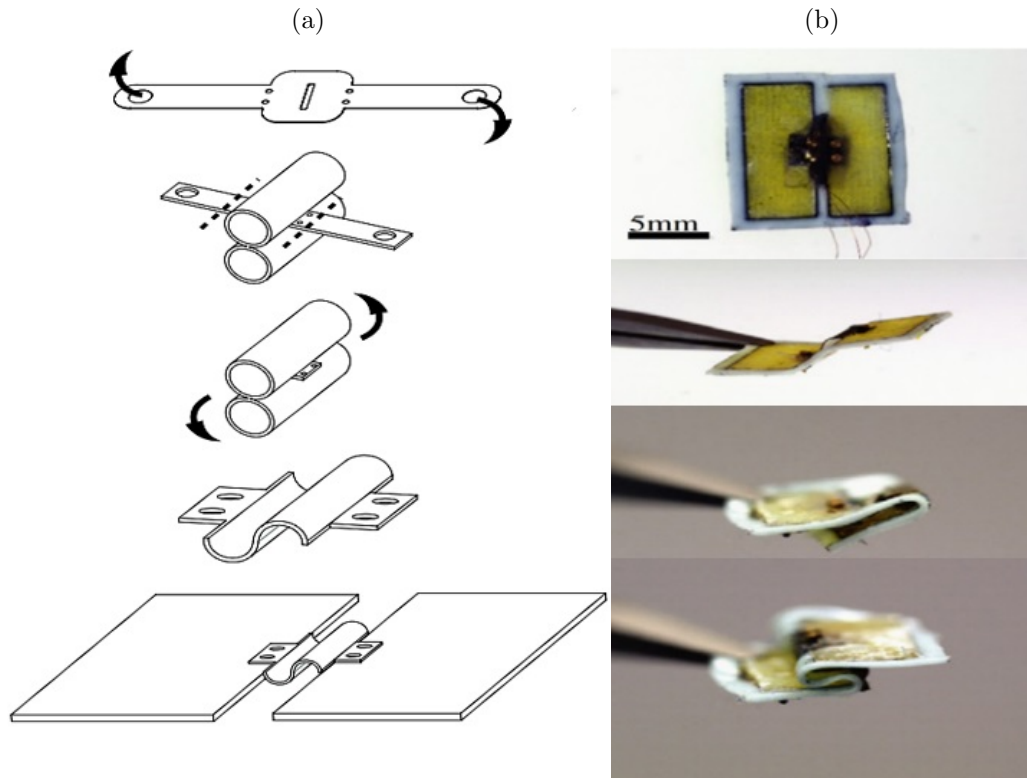
Figura 44 – (a) Tipos de atuadores torcionais de LMF com padrão de nervuras para uma trajetória de resistência máxima e (b) Posição sem acionamento e acionado do origami robótico



Fonte – Paik, Hawkes e Wood (2010)

Em outro trabalho, sob as mesmas condições do anterior, (PAIK; WOOD, 2012) complementam o trabalho apresentando um atuador bidirecional que produz dois movimentos opostos de 180° . Ao mesmo tempo, observaram que o aquecimento indireto por meio de um elemento externo manifestou tempo de resposta e eficiência energética superiores aos atuadores de LMF aquecidos de modo convencional por efeito Joule. Entre as suas principais conclusões está o fato que o projeto do atuador permitiu um processo de recozimento mais simples, em confronto ao atuador citado previamente, simultaneamente proporcionou isolamento térmico em duas regiões de atuação. A Figura 45a mostra a configuração do processo de fabricação empregada para a obtenção do atuador bidirecional e a esquerda é esclarecido o princípio de funcionamento do elemento desenvolvido, conforme exemplifica a Figura 45b.

Figura 45 – (a) Esquema mecânico do processo de fabricação do atuador bidirecional e (b) detalhe do modo de atuação

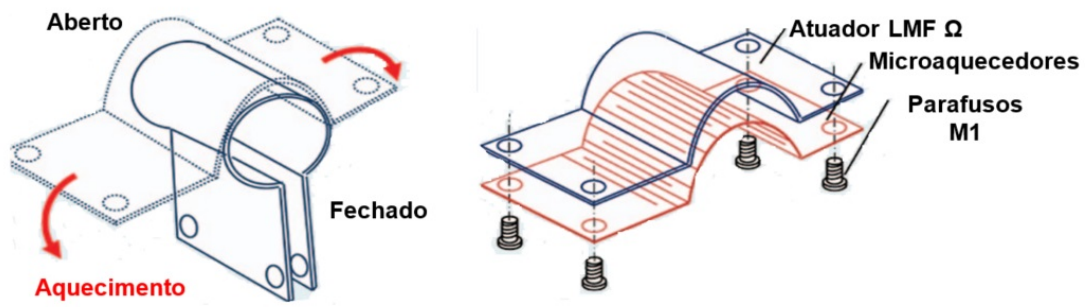


Fonte – Paik e Wood (2012)

Neste trabalho, Zhakypov, Huang e Paik (2016) projetam um atuador torcional unidirecional com movimento de dobra regido por uma folha a base de LMF e o compara a outros atuadores com características funcionais semelhantes. O atuador proposto foi capaz de girar cerca de 180° , fornecendo 34,1 mNm de torque a partir de uma folha de NiTi $12 \times 8 \times 0,1 \text{ mm}^3$ e 0,47 W de potência de entrada. Conforme pode ser visto na Figura 46, o elemento desenvolvido apresenta uma curvatura particular que reduz o volume de armazenamento e comparativamente, a outros exemplares torcionais que empregavam fios de LMF garantem maior faixa de rotação e torque.

Como é possível perceber, o capítulo teve um caráter mais teórico e focado na descrição das LMF e seus atuadores, uma vez que se torna necessário entender o comportamento termomecânico padrão destes materiais, a fim de satisfazer o projeto tecnológico em questão. A seguir, serão apresentadas as caracterizações realizadas e os principais detalhes construtivos para o atuador referência deste trabalho.

Figura 46 – Representação esquemática do atuador desenvolvido em Ω



Fonte – Zhakypov, Huang e Paik (2016)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo foi estruturado de modo a reunir informações relevantes, a fim de atender os objetivos traçados previamente para este trabalho de Tese. Desta maneira, serão descritos detalhadamente os materiais, equipamentos, experimentos e metodologias empregados para a consecução desta etapa de pesquisa. Convém ressaltar, que todas as atividades deste trabalho foram desenvolvidas nas instalações do LASEA/UFPB, LAMMEA/UFCG e LVI/UFCG.

3.1 *Processo Metodológico*

O processo metodológico empregado neste trabalho segue o organograma ilustrado na Figura 47.

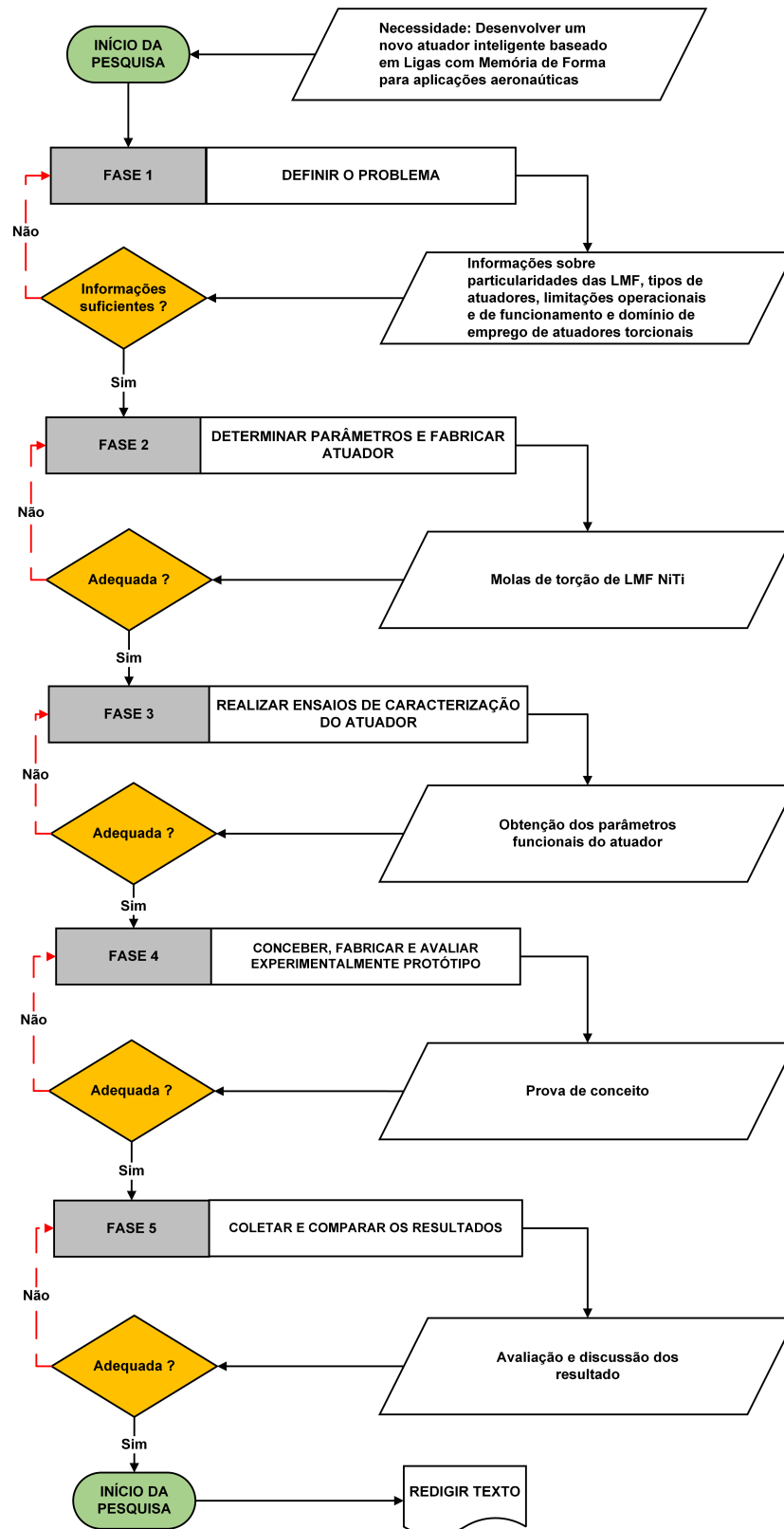
A necessidade que originou o trabalho de Tese foi utilizar atuadores baseado em ligas NiTi com EMF em sistemas de natureza aeronáutica, consoante ressaltado no capítulo introdutório. A partir deste momento, principiaram-se as atividades de pesquisa.

Desta maneira, foram estipuladas cinco fases, assim determinadas: Fase 1 – Definir o problema; Fase 2 – Determinar parâmetros e fabricar atuador; Fase 3 – Realizar ensaios de caracterização do atuador; Fase 4 – Conceber, fabricar e avaliar experimentalmente protótipo de leme e Fase 5 – Coletar e examinar os resultados. Cada uma destas fases é fragmentada em etapas a serem cumpridas com suas respectivas ferramentas de auxílio.

3.2 *Fase 1 – Definição do problema*

Na Fase 1, indica-se a necessidade que conduziu ao início da pesquisa. Realiza-se a revisão da literatura com o objetivo de se levantar conhecimentos a respeito do tema em estudo. Esta fase se subdivide em quatro etapas ilustradas na Figura 48. Sendo estas: pesquisar dados no que concerne aos materiais inteligentes (Etapa 1.1), pesquisar informações acerca das Ligas com Memória de Forma (LMF) (Etapa 1.2), pesquisar noções sobre atuadores em LMF e suas possíveis aplicações (Etapa 1.3) e, finalmente, pesquisar documentos relativos a atuadores torcionais em LMF (Etapa 1.4).

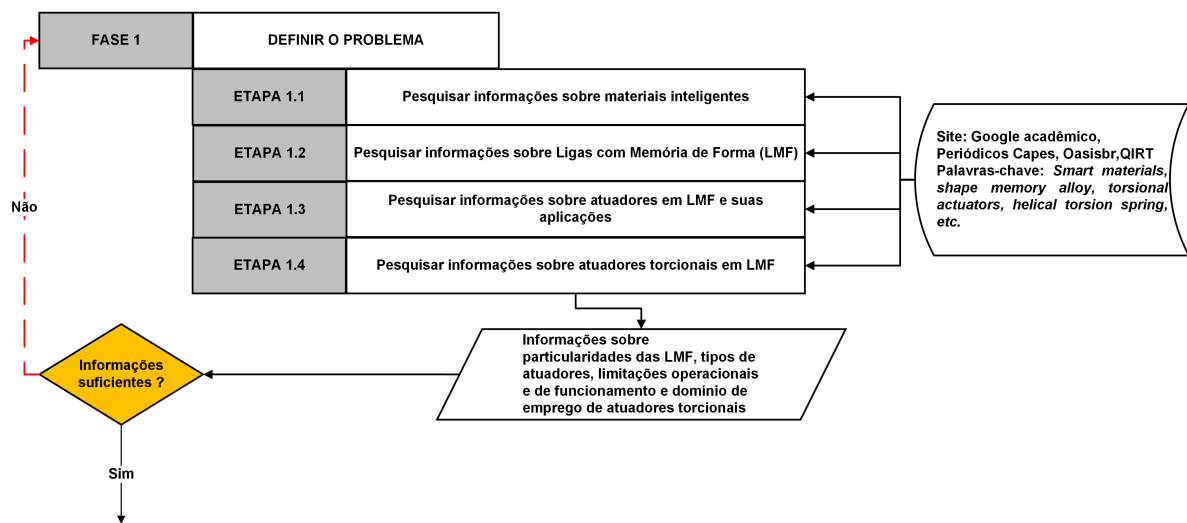
Figura 47 – Processo metodológico utilizado no desenvolvimento da pesquisa



Fonte – Autoria Própria (2021)

As pesquisas foram realizadas por meio de livros, catálogos e em materiais disponíveis em sites online como Google acadêmico, Periódicos Capes, Oasisbr, QIRT, com a utilização das seguintes palavras-chave: *smart materials*, *shape memory alloys*, *torsional actuators*, *helical torsion spring*, etc. Com a conclusão desta fase foi possível compreender os diferentes tipos de materiais inteligentes e as vantagens e desvantagens atrelado ao uso de cada um. Além disso, as particularidades que permeiam as LMF devido às suas notáveis propriedades relacionadas a uma série de comportamentos termomecânicos complexos. Os parâmetros que influenciam no comportamento e resposta dos atuadores em LMF, além dos métodos de controle e suas aplicações. Ainda nesta fase, foi possível também entender a disseminação do emprego de atuadores torcionais, mais especificamente os associados a LMF, que podem produzir força e/ou deslocamento (trabalho mecânico) durante seu ciclo de funcionamento, proeminente em relação aos materiais clássicos.

Figura 48 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 1)

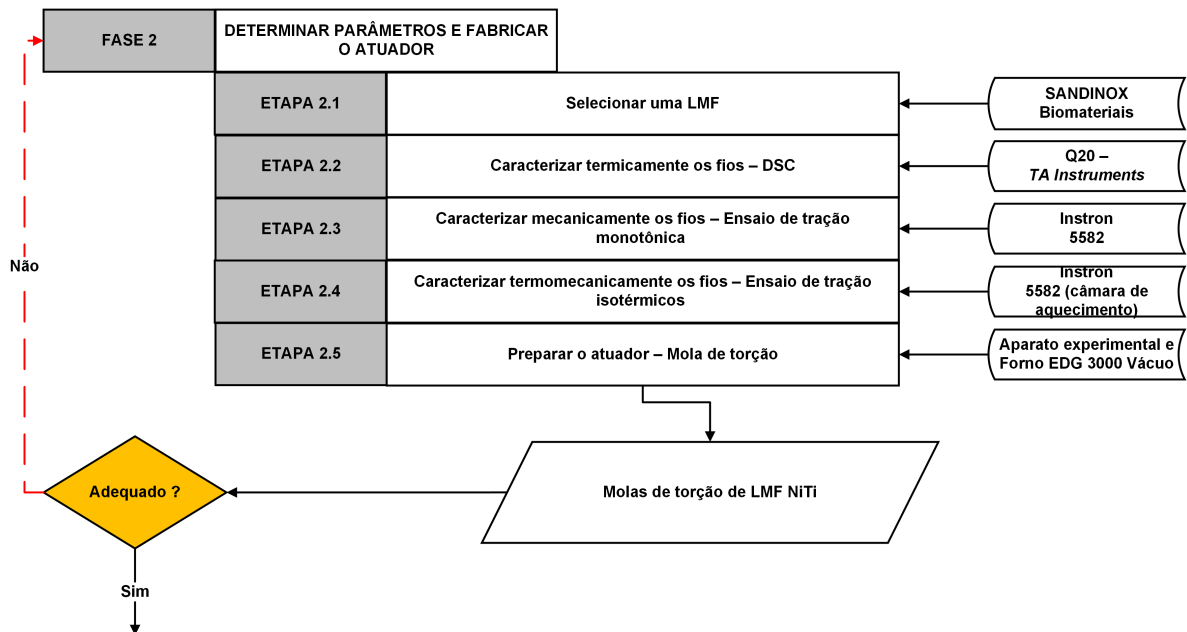


Fonte – Autoria Própria (2021)

3.3 Fase 2 – Determinação de parâmetros e fabricação do atuador

A Fase 2 destina-se a fabricação do atuador em apreço, como como é apresentado de forma esquemática na Figura 49.

Figura 49 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 2)



Fonte – Autoria Própria (2021)

Na etapa 2.1, a seleção teve como requisitos básicos: as propriedades termomecânicas, o diâmetro dos fios das ligas e a quantidade disponível de material, em estoque. Para o projeto e fabricação das molas torcionais, foram selecionados fios comerciais ASTM F2063 com composição 56% Ni – 44% Ti em massa e diâmetros de 0,9 mm, 1,2 mm e 1,5 mm trefilados à frio, fabricados pela *Fort Wayne Metals* (EUA) e fornecidos no Brasil por intermédio da empresa SANDINOX Biomateriais.

As LMF com essas propriedades, em tese, viabilizam elementos com superelasticidade na temperatura ambiente. Esses elementos devem funcionar segundo um propósito específico, ou melhor, se torcidos a temperatura ambiente e mantidos sob deformação constante enquanto são aquecidos, geram força. É ainda importante que, para além de ser operacional, o atuador resultante atenda às seguintes recomendações: massa e dimensões reduzidos, sendo o aquecimento efetuado por meio de efeito Joule (atuador elétrico) e o resfriamento por convecção natural, atrelado à ativação da estrutura mecânica sem a necessidade de sistemas de transmissão intermediários.

Na Tabela 3 foi preenchida de acordo com as especificações disponibilizadas pelo fabricante, o qual faz a ressalva de que estes são apenas uma referência, dado que algumas das propriedades são seriamente dependentes de tratamentos térmicos e da temperatura de ensaio.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do fio de NiTi utilizado no trabalho

Propriedades Mecânicas do Fio Superelástico			
	Alongamento (%)	Tensão de Escoamento (MPa)	Resistência a tração (MPa)
Fio de 0,9 mm	N/A	N/A	N/A
Fio de 1,2 mm	15,5	583	1499
Fio de 1,5 mm	18,2	501	1352

Fonte – Certificado de qualidade Sandinox N^o 37303/20

Uma vez que o fornecedor dos fios disponibiliza apenas informação básicas sobre os fios, houve a necessidade de se realizar um estudo de caracterização dos fios. Este estudo consiste de dois tipos de testes diferentes:

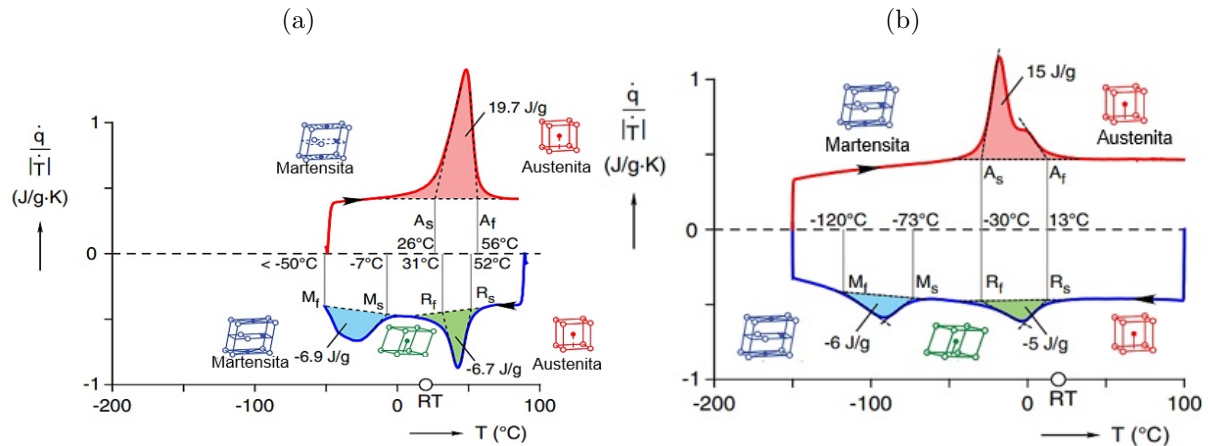
- Testes para determinar as temperaturas de transformação de fase do fio realizadas em um equipamento DSC;
- Testes de Tração para caracterizar o comportamento mecânico do fio empreendido em uma máquina de ensaios mecânicos.

Na etapa 2.2 procede-se a uma caracterização térmica dos fios por meio de um calorímetro DSC. A técnica DSC é muito utilizada para verificar as temperaturas críticas de transformação, além da histerese térmica e entalpia de transformação. Para as ligas NiTi esta técnica é normatizada pela ASTM 2004-17 (*Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis*). Assim é possível através da visualização gráfica, avaliar se a transformação de fase acontece em uma ou mais etapas.

Esse método mede a diferença de fluxo de calor entre uma amostra e uma referência padrão em função da temperatura, em uma atmosfera controlada. As temperaturas são demarcadas no ponto de intersecção das linhas base com a extensão das retas de maior inclinação de pico da curva, via adaptação da norma supracitada. É apresentado nas Figuras 50a e 50b exemplos de resultados de um teste de DSC, expondo os valores característicos das temperaturas de transformação martensítica e austenitização de um fio de NiTi, respectivamente.

Nos ensaios realizados utilizou-se um calorímetro DSC modelo Q20 da empresa *TA Instruments* munido com cadinho de alumínio não hermético e um segundo porta amostra de mesmo material usado como referência na célula de ensaio, existente no Laboratório

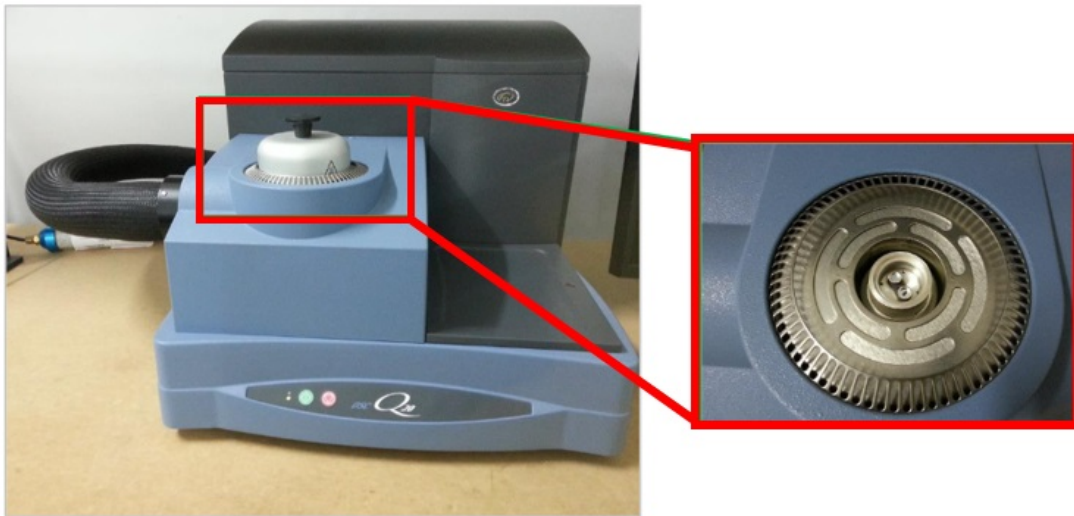
Figura 50 – Curva esquemática típica do resultado de DSC de uma liga NiTi: (a) fio EMF e (b) fio SE



Fonte – Shaw et al. (2008)

Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LAMMEA). O equipamento pode ser visualizado na Figura 51.

Figura 51 – Calorímetro DSC modelo Q20 da *TA Instruments*, com detalhe do interior



Fonte – Autoria Própria (2021)

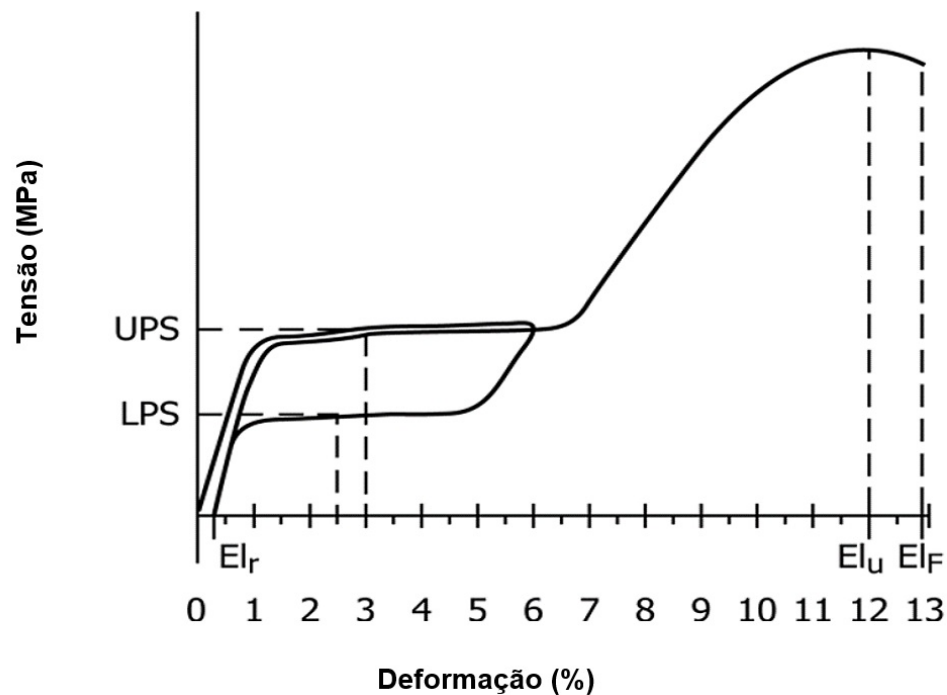
Foram realizados ensaios de DSC nos fios antes, e após a conformação/tratamento térmico, para se examinar o quanto a conformação e o tratamento térmico influenciam nas temperaturas de transformação de fase. Durante o ensaio, o material foi inicialmente aquecido a partir da temperatura ambiente até 75 °C e em seguida resfriado até -75 °C. Nestes ensaios utilizou-se uma taxa de aquecimento/resfriamento de 5 °C/min.

A etapa 2.3 foi marcada pela caracterização mecânica dos fios de NiTi, onde efetivou-se ensaios de tração monotônicos, em que a carga é aplicada numa única direção e de forma crescente. Esse teste tem por objetivo determinar as propriedades mecânicas do material quando submetidos a esforços ao longo do seu eixo, particularmente níveis de tensão, deformação, patamar de transformação de fase induzida por carregamento e módulos de elasticidade, calculados pelo ajuste linear dos pontos na região de proporcionalidade nas curvas arregimentadas ($\sigma \times \epsilon$). Os ensaios foram realizados conforme preconizado pela norma ASTM F2516-14 (*Standard Test Method for Tension Testing of Nickel-Titanium Superelastic Materials*), que trata dos testes de tração em fios de LMF superelásticos.

A Figura 52 representa uma ilustração de uma típica curva tensão-deformação de uma liga NiTi em regime superelástico, indicando quais pontos do gráfico devem ser empregados para o cálculo dos resultados. Neste caso, UPS (*Upper Plateau Strength*) é o platô de transformação superior onde ocorre a transformação de austenita para martensita, já LPS (*Lower Plateau Strength*) representa o platô de transformação inferior onde no descarregamento ocorre a reversão da martensita para austenita, EL_u é o parâmetro que define a deformação uniforme que está no valor máximo de tensão encontrado antes da fratura, EL_f corresponde a deformação no momento da fratura e, por último, EL_r é a deformação residual encontrada.

Os ensaios mecânicos foram realizados no LAMMEA utilizando-se uma máquina de ensaios eletromecânica, da marca Instron, modelo 5582, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Foram manipulados corpos de prova com comprimento útil de aproximadamente 25 mm, no estado como fornecidos, à temperatura ambiente de 25 ± 2 °C. O ensaio consistiu em submeter o fio a um primeiro ciclo de carregamento até 6% de deformação seguido de um descarregamento até um nível de tensão de 7 MPa e posterior carregamento até a ruptura, ambos os trechos com taxas predefinidas segundo a seção transversal do fio. De acordo com o preceito estabelecido na norma, o ensaio de tração foi executado a uma taxa de 0,5 mm/min para o primeiro ciclo, seguido pelo segundo ciclo até a ruptura com uma taxa mais rápida de 5 mm/min. Para aquisição dos dados de deformação longitudinal foi empregado AVE (*Advanced Video Extensometer*) com especificações adequadas para as condições de ensaio. Na Figura 53 pode-se identificar o diagrama esquemático para a realização desse ensaio juntamente com o detalhe do fio de NiTi instalado entre as garras de fixação.

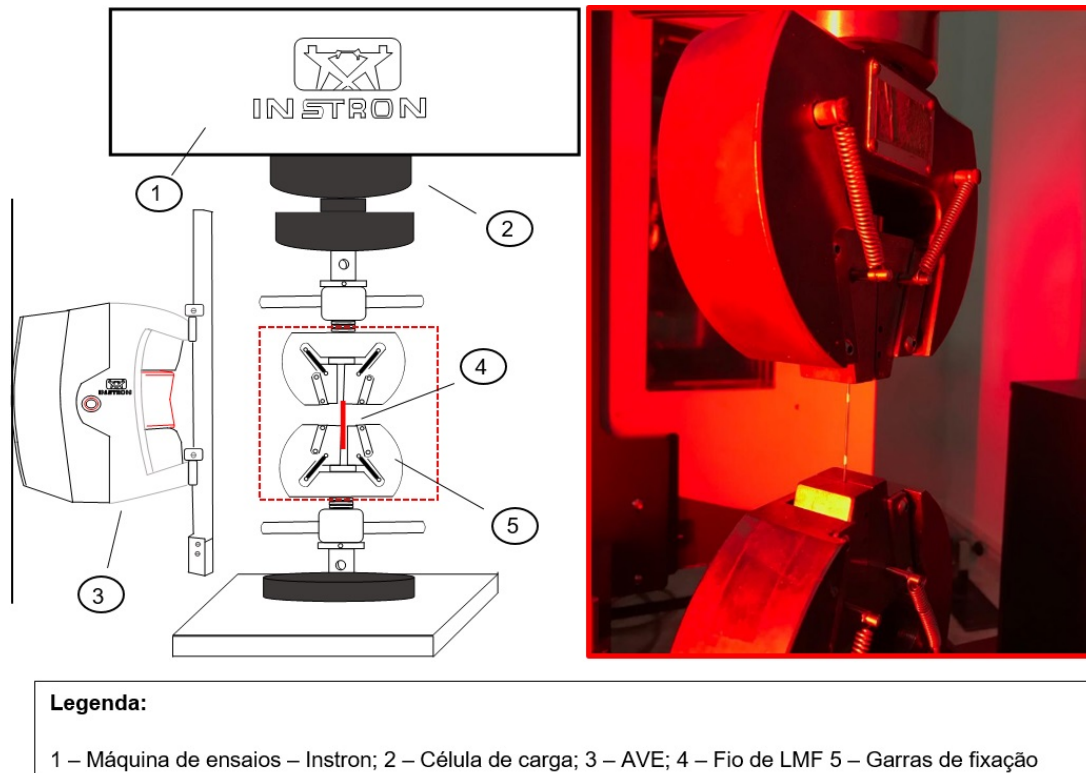
Figura 52 – Diagrama tensão-deformação típico de LMF NiTi superelástica seguindo a norma ASTM F2516



Fonte – Norma ASTM F2516-14 (2021)

Na etapa 2.4 foram executados ensaios cíclicos de tração uniaxial a diferentes temperaturas. Desta maneira, foi empregada a mesma máquina de ensaios universal mencionada previamente, nesta oportunidade aparelhada com uma câmara térmica para controle de temperatura. Os ensaios isotérmicos foram executados entre 30 °C e 75 °C intercalados a cada 15 °C, sob controle de deformação entre 4,5% e 10 MPa, utilizando uma taxa de deformação de 1%/min. Por sua vez, cada fio de LMF foi submetido a um tratamento térmico com aquecimento a 500 °C ao longo de 30 minutos, seguido de resfriamento em ar à temperatura ambiente, este procedimento foi concretizado com o objetivo de simular o efeito do *shape-setting*, abordado em maiores detalhes posteriormente. A partir desses resultados, foi possível mapear a evolução do comportamento mecânico em função da temperatura destes componentes de LMF NiTi, assim como quantificar esse desempenho por intermédio da determinação dos coeficientes C_A e C_M , que representam o aumento das tensões críticas de transformação de fase em função da temperatura. É fornecido por meio da Figura 54 uma vista, onde estão discriminados os principais elementos da montagem experimental.

Figura 53 – Desenho esquemático da máquina de ensaios universal marca Instron modelo 5582. Detalhe mostrando corpo de prova

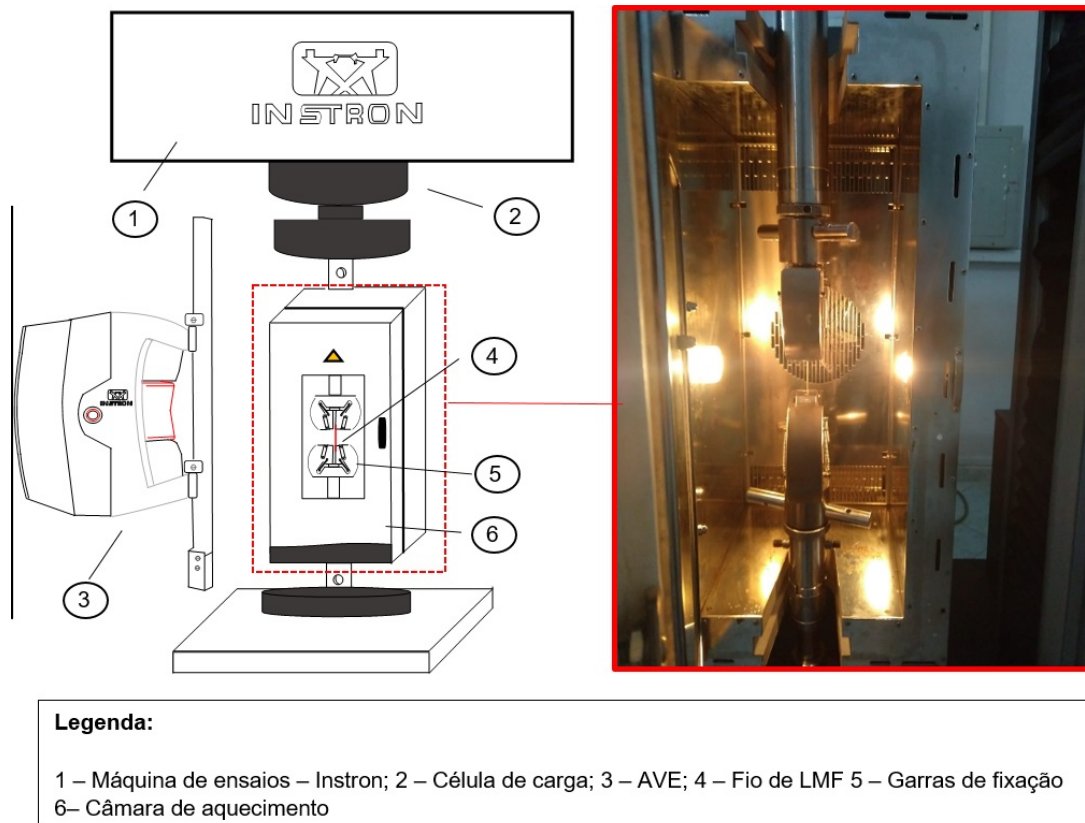


Fonte – Autoria Própria (2021)

Concluídas as etapas precedentes foi possível iniciar a fabricação das molas helicoidais de torção. As molas helicoidais se distinguem unicamente na disposição das extremidades e nos esforços que estão submetidas. O método de fabricação de molas de LMF percorre duas etapas: a fixação na disposição geométrica desejada e o tratamento térmico posterior, estas duas etapas perfazem o procedimento denominado de *shape-setting*.

A seleção dos parâmetros da mola levou em consideração o índice de mola ou índice de curvatura (C), quociente entre o diâmetro médio da mola ou espira (D) e diâmetro do fio (d), relacionado a estabilidade da mesma. Estabeleceu-se que este fator deve possuir valores na faixa de 4 e 12, uma vez que abaixo de 4 a mola torna-se de difícil fabricação, e acima de 12 transforma-se em frágil e pode ser emaranhada com facilidade (BROWN, 1981; MOTT; VAVREK; WANG, 2017; NORTON, 2013). Desta forma, priorizou-se a faixa ideal 7 a 10 para aplicações de cargas mais elevadas. Outro aspecto relevante para a manufatura da mola é o número espiras ativas (N_a), relativo a este parâmetro os valores devem ser superiores 2 e inferior a 15.

Figura 54 – Desenho esquemático do sistema eletromecânico Instron 5582. Detalhe mostrando corpo de prova montado dentro da câmara térmica



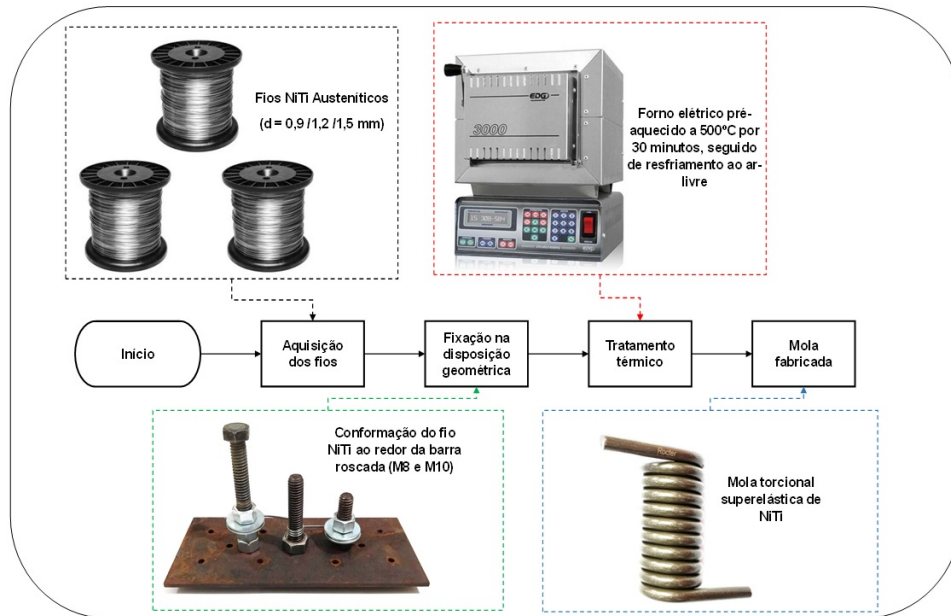
Fonte – Autoria Própria (2021)

A etapa 2.5 buscou inspiração nos procedimentos adotados por Follador et al. (2012), Heidari et al. (2016), Rao, Srinivasa e Reddy (2015), Sheng e Desai (2015). Para moldar um determinado comprimento de fio de LMF no formato de espiras helicoidais foi preciso enrolá-lo a um eixo cilíndrico que estabelece o diâmetro interno da mola. Utilizou-se uma barra roscada para definir um formato adequado para a mola. E posteriormente, foram fixadas as suas extremidades.

A preparação dos atuadores foi realizada com auxílio de um torno mecânico. O aparato empregado para moldar o fio foi fixado a placa de 3 castanhas do torno. Em seguida, o conjunto foi rotacionado manualmente, a fim de enrolar o fio em volta das hélices da barra roscada (padrão métrico M8 e M10). Ressalta-se que, o fio conforme recebido pelo fabricante externava resistência a conformação devido ao alto grau de encruamento. Ao mesmo tempo, para impedir qualquer escorregamento do fio com relação as hélices da barra, as extremidades dos fios foram acondicionadas dentro de arruelas e em seguida tensionadas, sendo finalmente presas com o emprego de porcas. É apresentado na Figura

55 abaixo esquematicamente o processo termomecânico, assim como os dispositivos de fabricação para a obtenção de molas torcionais desenvolvidas neste trabalho.

Figura 55 – Fluxograma de fabricação de molas torcionais de NiTi



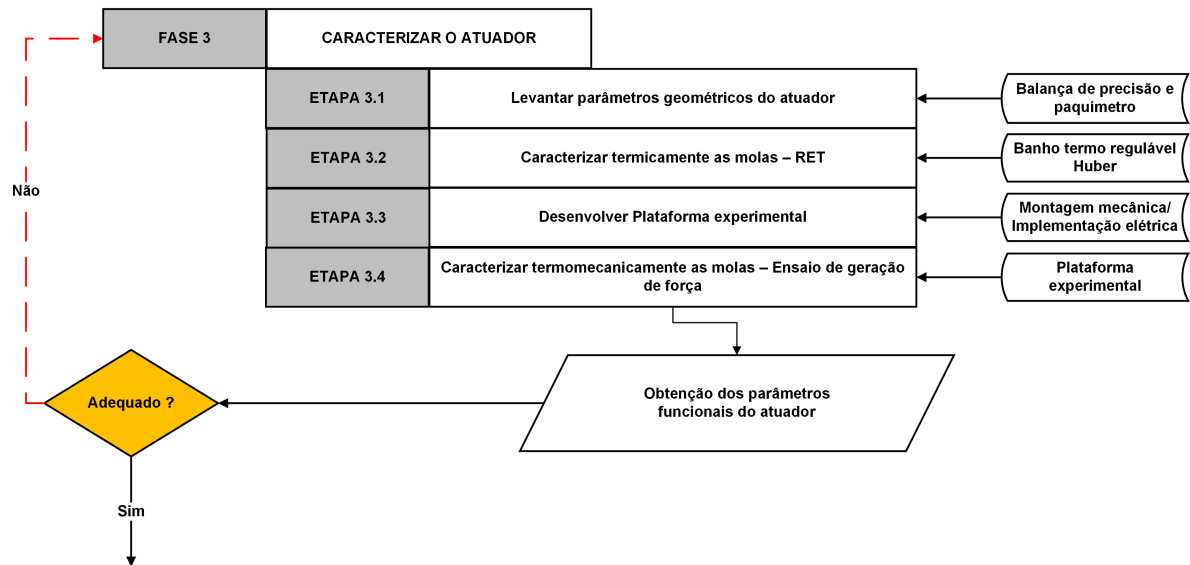
Fonte – Autoria Própria (2021)

Posteriormente, todo o sistema foi submetido a um tratamento térmico, que consistiu no uso de um forno elétrico EDG 3000, com atmosfera controlada a vácuo e sistema de aquecimento através de um conjunto de resistência embutidas de refratários. Toda montagem passou por aquecimento a 500°C por um intervalo de 30 minutos, logo após executou-se um resfriamento ao ar livre (FOLLADOR et al., 2012; SHENG; DESAI, 2015; HEIDARI et al., 2016).

3.4 Fase 3 – Caracterização do atuador

Na Fase 3, realiza-se a escolha e caracterização dos elementos atuadores que serão utilizados na estrutura. Esta fase se subdivide em quatro etapas, como ilustrado na Figura 56.

Figura 56 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 3)



Fonte – Autoria Própria (2021)

Na etapa 3.1 são levantadas e expostas por meio da Tabela 4 as principais variáveis estruturais recolhidas do produto final (molas fabricadas). Vale salientar, que as molas foram separadas em dois grupos distintos, examinadas em função do diâmetro da barra roscada ao qual cada uma foi conformada, desta maneira a nomenclatura das molas será representada por M8 e M10.

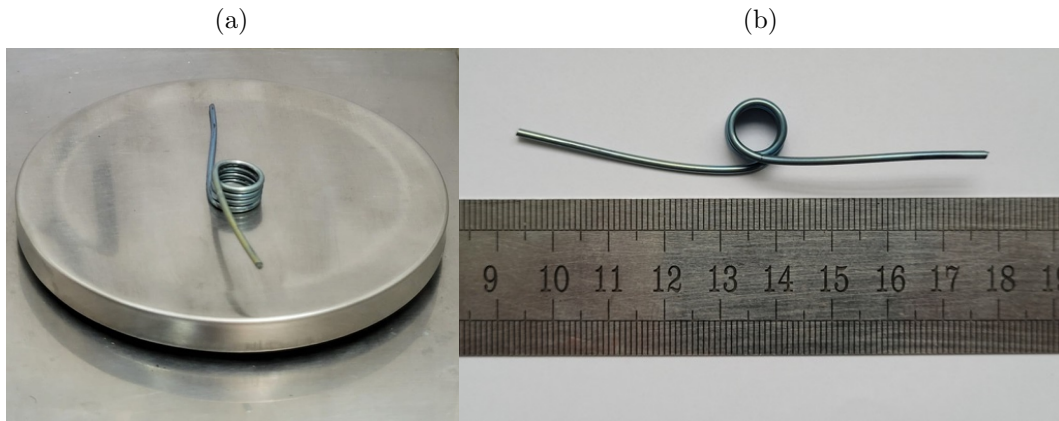
Tabela 4 – Parâmetros das molas torcionais produzidas

M8			
Diâmetro de fio (d)	0,9 mm	1,2 mm	1,5 mm
Diâmetro médio da mola (D)	8,5 mm	9,9 mm	10,5 mm
Índice de mola (C)	9,4	8,2	7
Número de espiras ativas (Na)	3	3	3
Comprimento indeformado da mola (h_0)	5 mm	6 mm	7,5 mm
Massa da mola (m)	0,626 g	1,284 g	2,023 g
M10			
Diâmetro de fio (d)	0,9 mm	1,2 mm	1,5 mm
Diâmetro médio da mola (D)	10,9 mm	11,2 mm	12,2 mm
Índice de mola (C)	12,1	9,3	8,1
Número de espiras ativas (Na)	3	3	3
Comprimento indeformado da mola (h_0)	6,3 mm	7 mm	7,4 mm
Massa da mola (m)	0,859 g	1,577 g	2,471 g

Fonte – Autoria Própria (2021)

Para as medições efetuadas foi utilizada uma balança eletrônica de precisão, modelo Marte – AL200C representado na Figura 57a e um paquímetro digital. Na fotografia da Figura 57b é verificado as dimensões de uma das molas obtidas.

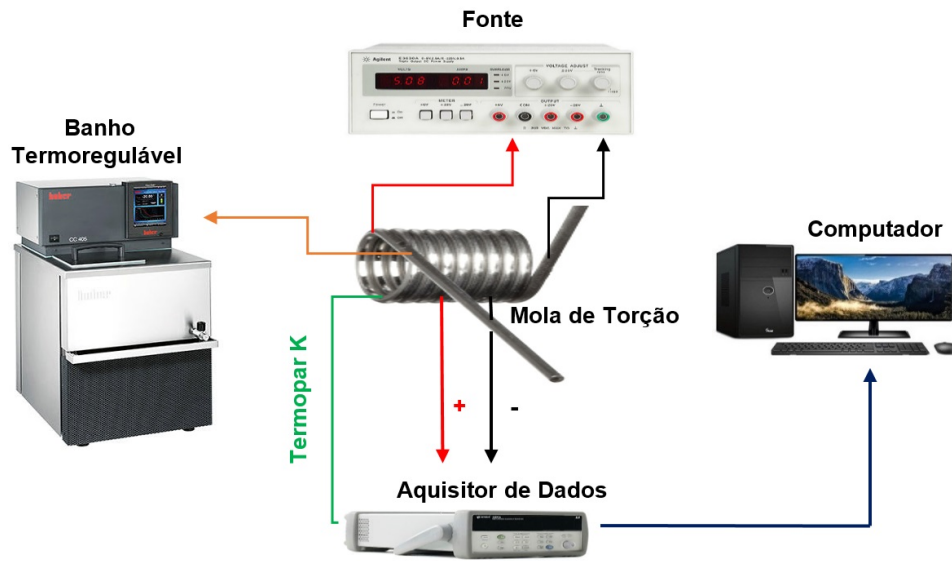
Figura 57 – Mapeamento de parâmetros das molas torcionais produzidas: (a) Balança eletrônica e (b) Régua milimetrada



Fonte – Autoria Própria (2021)

Na etapa 3.2, com as molas já fabricadas, procedeu-se a uma caracterização térmica de cada um dos componentes gerados, por meio da medição da resistência elétrica em função da temperatura (RET). O RET é uma técnica de caracterização térmica utilizada desde os primórdios das análises envolvendo LMF, constituindo-se em um método efetivo para medir as temperaturas críticas de transformação de fase. O princípio básico deste método incide em promover a passagem de uma corrente (i) contínua e constante pela amostra de LMF, com o intuito de medir a queda de tensão elétrica (ddp) que ocorre durante os ciclos de aquecimento e resfriamento. A mudança significativa da resistividade com a variação de temperatura gera picos na curva de análise, representando a mudança de fase do material. A Figura 58 é representativa dos componentes utilizados para o ensaio de RET.

Figura 58 – Esquema dos dispositivos empregados no ensaio RET



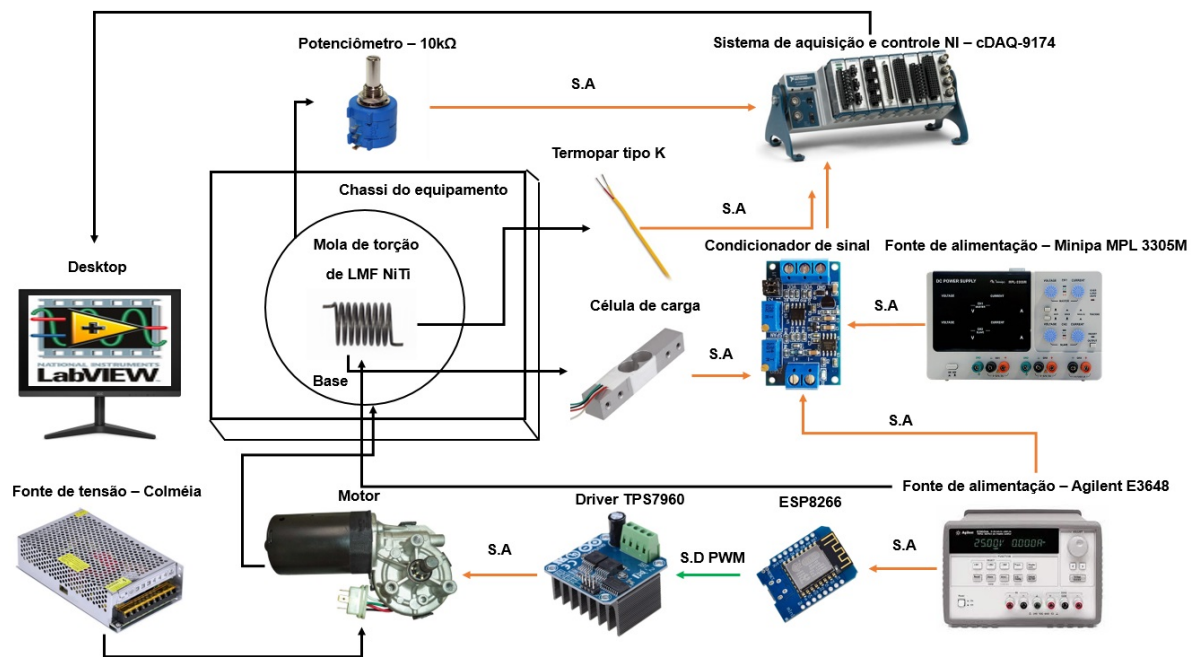
Fonte – Autoria Própria (2021)

Este ensaio foi aplicado nas molas torcionais, onde em cada uma foi soldada em quatro pontos regularmente espaçados. Pelos terminais mais externos flui uma corrente contínua estabilizada de 1 A, empregando uma fonte de alimentação modelo E3633A, da marca *Agilent*. A fonte foi ligada nas extremidades do canal de alimentação e a diferença de potencial foi mensurada nos outros dois eletrodos internos, por meio de um aquisitor de dados, modelo 34970, da marca *Agilent*, que envia o sinal medido para um computador. A variação de temperatura da mola ao longo do ensaio, foi preparado por um banho termoregulável modelo CC-902, da marca *Hubber*, na faixa de temperatura de 100 °C à - 60 °C, com uma taxa de aquecimento e arrefecimento de 5 °C/min. Os valores de temperatura foram medidos utilizando um microtermopar do tipo K com diâmetro de 100 μm .

Na etapa 3.3 interessou-se em efetuar a análise do potencial mecânico produzido pela mola de torção em função da temperatura, através de um ensaio próprio. De modo particular, no teste de geração de força é imprescindível primeiramente promover uma deformação no componente até um determinado nível, mantida a deformação, o mesmo deve ser submetido a uma elevação de temperatura. O aquecimento do atuador fará com que o próprio tente transformar de fase e como a deformação está restrita ocorrerá geração de carga para tentar transpor o bloqueio e retomar ao seu estado original.

A realização deste ensaio, sucedeu-se a partir da adaptação de uma estrutura física desenvolvida no Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas (LASEA), que conseguisse captar os dados termomecânico produzidos pelas molas de LMF, simples construção, boa resposta e confiabilidade experimental. Foram apontados os seguintes requisitos fundamentais: peso da estrutura, dimensões físicas, comprimento e diâmetro do atuador (mola de torção), somado a distância do sensor para medição de carga. Uma visão geral da máquina e seus principais elementos estruturais pode ser conferida no diagrama exibido na Figura 59. As conexões em preto representam as conexões físicas, em laranja os circuitos de potência e em verde as comunicações de dados: sinal analógico (S.A), sinal digital (S.D) e sinal PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por largura de pulso). O detalhamento e especificações dos componentes da plataforma de ensaio é apresentado mais abaixo.

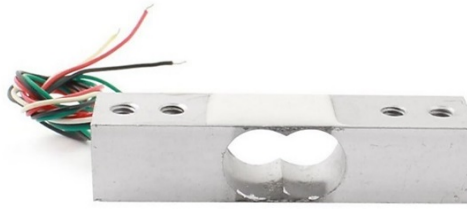
Figura 59 – Arranjo experimental esquemático para geração de força em molas de torção de LMF NiTi



Fonte – Autoria Própria (2022)

A medição da carga produzida pela mola de torção quando se aplica uma corrente foi executada por um transdutor de força em formato de viga, modelo CZL 635, com carga nominal de 50 N ($0 \sim 5$ kg) e sensibilidade de $1,0 \pm 0,15$ mV/V. A célula de carga é retratada na Figura 60.

Figura 60 – Célula de carga utilizada na plataforma experimental

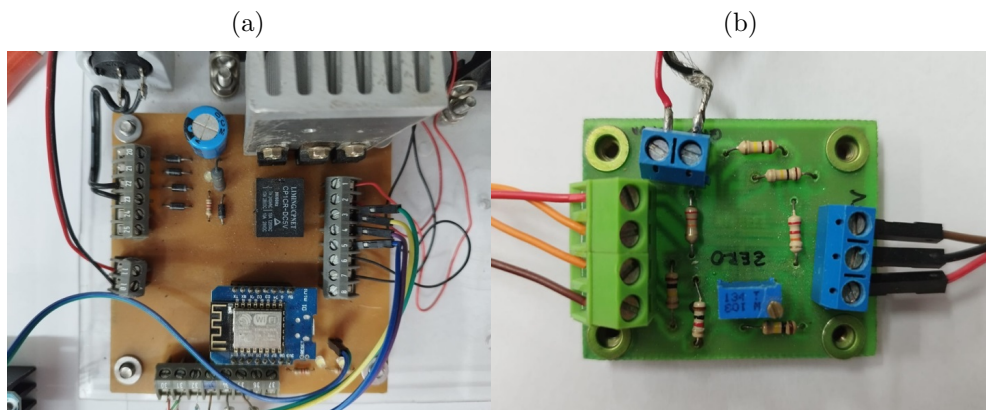


Fonte – Autoria Própria (2022)

Este transdutor opera em ponte completa por meio de quatro extensômetros conectados a estrutura. O sinal derivado dos extensômetros foi convertido em sinais elétricos através de pequenas resistências, que são interligadas ao elemento estrutural. Ao passo que a área sensível é deformada, a resistência varia em proporção à carga imposta. Na parte que cuida do condicionamento, com o intuito de adequar o sinal proveniente das pontes de Wheatstone, um circuito eletrônico especializado foi projetado.

No momento de realizar o condicionamento de sinal proveniente da célula de carga, utilizou-se um amplificador de instrumentação de modelo INA 118, fabricado pela *Texas Instruments*®. Este circuito é abastecido por uma fonte de alimentação E3648, produzida pela empresa *Agilent*, com uma tensão elétrica equivalente a 12 V. Vale salientar que essa fonte permite tanto o controle de corrente como o controle de tensão, nas escalas de 8V/20A e 20V/10A. São exibidas nas Figuras 61a e 61b os circuitos eletrônicos em seu estágio final.

Figura 61 – Circuitos Eletrônicos: (a) Circuito condicionador de sinais para calibração da célula de carga e (b) Circuito amplificador de corrente



Fonte – Autoria Própria (2022)

Antes da realização do ensaio, a fim de que a célula de carga fosse empregada no experimento de maneira adequada, foi imprescindível calibrá-la. A metodologia de calibração consiste na mudança da entrada do sensor lentamente, de modo que esta apresente valores constantes sucessivamente, enquanto a saída do sensor é gravada. Assim sendo, a calibração deu-se com o ajuste da tensão registrada pelo sistema de aquisição em 0 V, quando não houver carga aplicada na célula e uma tensão de 10 V para a carga máxima que se deseja medir. Nesse sentido, foram colocadas massas conhecidas, representando a carga a ser medida na forma de carregamento, para que os resultados de tensão elétrica fossem convertidos em valores físicos através do *hardware* e disponibilizados via interface gráfica para monitoramento do valor estimado de força. Após a aquisição de dados e calibração, esta célula de carga foi simplesmente engastada na estrutura física, através de uma chapa dobrada de aço em forma de “L”.

A ativação das molas de LMF ocorreu pelo aquecimento resistivo causado pela passagem de uma corrente elétrica (efeito Joule) e o resfriamento foi efetuado por convecção natural. Desta maneira, adotou-se como responsável por fornecer a corrente elétrica para todo comprimento útil do atuador, uma fonte de alimentação CC regulada em 0-30V/0-5A, comumente utilizada em bancadas experimentais, conforme é evidenciado na Figura 62.

Figura 62 – Fonte de alimentação *Agilent E3648*



Fonte – Autoria Própria (2022)

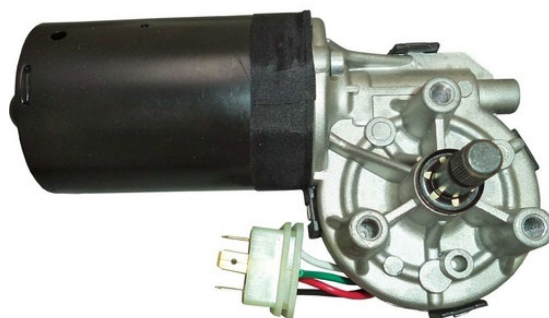
Os dados de temperatura foram captados em tempo real através do método de medição com contato, utilizando um termopar do tipo K, bastante usual, em geral, devido a sua grande faixa de atuação até 1200 °C. Este sensor térmico possui 0,5 mm de diâmetro e foi fixado ao longo das espiras do atuador por meio de uma descarga capacitiva, pelo

fato desse tipo de procedimento ser de simples aplicação e suportar altas temperaturas. As respostas dos sinais provenientes da medição foram arregimentadas com o auxílio de um circuito integrado AD595, que é um amplificador de instrumentação para termopar do tipo K, conectado no conector J2, numa microplaqueta monolítica, foi usado para combinar uma referência de 0 °C com um amplificador pré-calibrado, produzindo uma elevação de 10 mV/°C como tensão de saída diretamente do sinal advindo do termopar. O referido módulo realiza a compensação de junta fria, digitalizando a saída de termopares tipo K numa resolução de 12-bits e enviando o sinal lido para a placa de aquisição de dados.

Na plataforma de teste arquitetada, o esforço de torção e em sequência, o movimento de rotação foi transferido para a mola de LMF, alojada em acoplamentos fabricados e devidamente restritos na base pelo uso de elementos fixadores. A medição, simultânea, da posição angular do sistema foi concretizada através de um potenciômetro multivoltas, que nada mais é que um resistor variável, o que permite que a modificação de sua resistência seja correlacionada com o deslocamento sofrido pelo ângulo de rotação de seu eixo. No caso específico deste trabalho, na base do equipamento há um marcador graduado de deslocamento angular para visualizar o desenrolar do experimento e calibração do próprio potenciômetro.

Além disso, a força externa foi fornecida por um motor de para-brisa de 12 V, alimentado por uma fonte chaveada colmeia de 12V/10A bivolt estabilizada. A variação dos valores de tensão foi proporcional à variação do ciclo de trabalho de um sinal PWM, de modo que o controle de tensão foi feito recorrendo a um potenciômetro. Isto permitiu o manuseio da velocidade de rotação no sistema desenvolvido. É apresentada na Figura 63 o motor utilizado.

Figura 63 – Motor de para-brisa empregado na movimentação da base experimental



Fonte – Autoria Própria (2022)

A aquisição, processamento e controle de dados nos atuadores e sensores foram processados por intermédio de uma plataforma modular CompactDAQ, modelo NI cDAQ 9174, pertencente a empresa *National Instruments*. Ela é equipada com 4 slots de placas de aquisição, potência disponível de 15 W, tensão de entrada de 9 V, 30 V e conexão USB (NATIONAL, 2022a). A imagem do chassi NI cDAQ em conjunto com seus slots pode ser visto na Figura 64.

Figura 64 – Sistema de aquisição e controle de dados NI – cDAQ-9174



Fonte – Autoria Própria (2022)

O módulo NI 9201, também da *National Instruments*, é uma unidade da série C com 8 canais de entrada analógica e uma taxa máxima agregada de 500 kS/s. Este módulo também possui proteção contra sobretensão de até 100 V para conexões de sinais incorretamente direcionadas (NATIONAL, 2022b). Ele foi empregado, para aquisição específica de sinais de tensão oriundos da célula de carga. A leitura em escala de temperatura ($^{\circ}\text{C}$), realizou-se com o acoplamento do termopar ao módulo NI 9213. Este modulo consegue a leitura de até 16 termopares simultaneamente, com uma taxa de amostragem de 75 S/s. Utilizando 12 ou menos canais, essa taxa de amostragem pode chegar a 100 S/s em cada canal (NATIONAL, 2022c).

Para fornecer o sinal analógico de saída do controlador, foi selecionado o módulo NI 9263 da *National Instruments*. O NI 9263 dispõem de 4 canais atualizados simultaneamente a 100 kS/s, também possui proteção contra sobretensão em ± 30 V, proteção contra curto-circuito, o que possibilita uma rápida taxa de variação, elevada exatidão e diversos dispositivos de proteção (NATIONAL, 2022d). A escolha destes equipamentos da Empresa *National Instruments* deve-se a disponibilidade existente destes equipamentos no LASEA.

Este experimento foi gerenciado por um algoritmo, desenvolvido através da ferramenta LabVIEW, que permite a obtenção de dados de temperatura, força, deslocamento além de número de ciclos executados na mola durante cada ensaio. A frequência de amostragem para aquisição foi configurada em 10 Hz a partir das características dos sensores. Esse programa além de mostrar as variáveis físicas em tempo real, e admitir variações na configuração do experimento, também é responsável por armazenar os dados coletados em um arquivo de texto, que pode posteriormente ser processado por meio de vários programas de análise de dados como, por exemplo, o OriginLab, MATLAB, Excel, etc.

De posse dos módulos constituintes do sistema de medição, estabeleceu-se que cada mola de LMF seria alojada em suportes que viabilizariam o momento torçor empreendido. Estes suportes são constituídos de PTFE (Politetrafluoretileno), conhecido como Teflon[®], selecionado devido a fácil usinagem, boa margem de temperatura de trabalho (-180 °C a 250 °C), além do bom isolamento elétrico e baixo coeficiente de atrito. Esse item garante versatilidade, pois é passível de permuta assegurando as mesmas condições de posicionamento para o atuador e que não haverá interferências nos resultados, decorrentes de sucessivas montagens e desmontagens. É destacada na Figura 65 os elementos em Teflon[®] que são utilizados no desenvolvimento deste trabalho.

Figura 65 – Partes principais dos suportes mecânicos fabricados com Teflon[®]



Fonte – Autoria Própria (2022)

Neste estudo, o procedimento adotado equivaleu a deformar cada mola de torção de LMF. Em cada ensaio, as molas foram submetidas a níveis distintos de deslocamento angular 15, 30, 45, 60, 90 e 120° em relação ao ângulo base do atuador. Estes ângulos foram contemplados, em razão do espectro de possíveis movimentações alcançadas por um leme. Vale salientar que, se restringiu o deslocamento máximo a 120°, posto que ângulos

próximos a meia volta derivariam em dificuldades construtivas para possíveis mecanismos de ordem prática resultantes deste atuador.

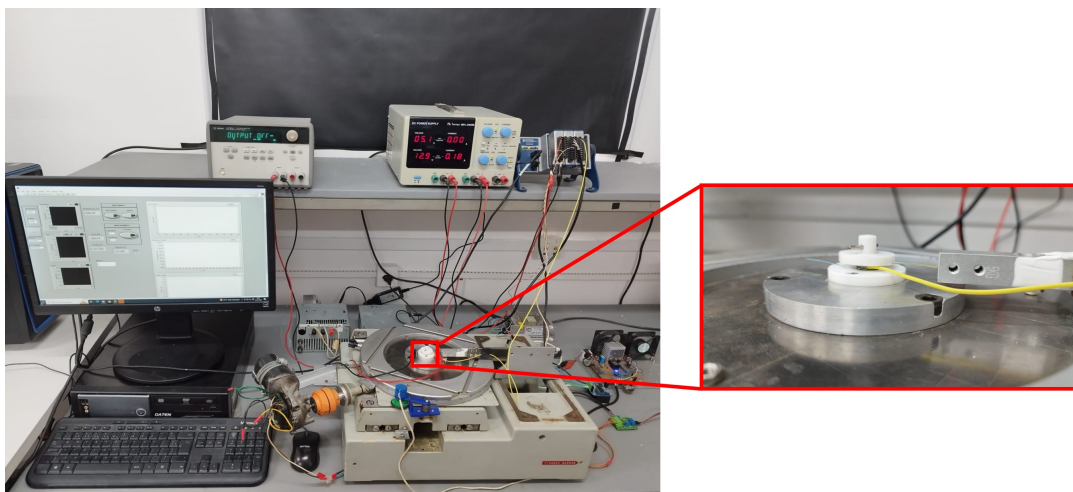
No que diz respeito a caracterização proposta, foram executados um total de 3 ensaios válidos com as molas de torção, como forma de preservar uma boa conformidade estatística. Esses ensaios foram realizados a partir de uma taxa de $3^\circ/\text{s}$, instituindo análises de natureza quasi-estáticas, em virtude da taxa de deformação usada.

A fim de preservar condições similares, definiu-se o término de cada procedimento, no momento que o termopar indicasse valores próximos a 90°C . Esta iniciativa, também, foi adotada como forma de reduzir a possibilidade de perda das propriedades funcionais devido à fadiga. Posteriormente, um intervalo de resfriamento foi considerado para que a temperatura da mola entrasse em equilíbrio com a temperatura do laboratório e fosse possível iniciar o teste na condição de 0 A. Sem remover a mola do sistema, esta foi sujeita as novas condições de corrente, exemplificando: 5 A. Esta metodologia foi repetida para as demais configurações de mola.

A temperatura ambiente observada durante os ensaios foi próximo de 25°C controlada pelo ar-condicionado do laboratório e quantificada com o auxílio de um termopar. Cabe dizer que em experimentos rápidos, concretizados no espaço de poucos minutos, não há como detectar o efeito da temperatura ambiente na plataforma. Todavia, para a realização de experimentos longos, cuja duração se dá no espaço de algumas horas, a temperatura ambiente afeta de sobremaneira as medições, inviabilizando qualquer tentativa de teste, por conseguinte uma possibilidade seria a construção de um ambiente que mantivesse a temperatura constante até o fim do experimento. Na Figura 66 é mostrado o esquema real do experimento montado para a obtenção dos resultados experimentais das molas em apreço.

Os circuitos de condicionamento de sinais empregados foram alojados em uma caixa plástica, proporcionando uma isolação elétrica, térmica e evitando-se resíduos que poderiam, porventura, interferir no funcionamento elétrico. Outro cuidado importante, deu-se com o isolamento elétrico entre a mola e a célula de carga, de modo a evitar correntes oriundas de outros equipamentos, foi colocado um revestimento de fita isolante no local de contato.

Figura 66 – Vista da bancada experimental desenvolvida, com detalhe para disposição da mola

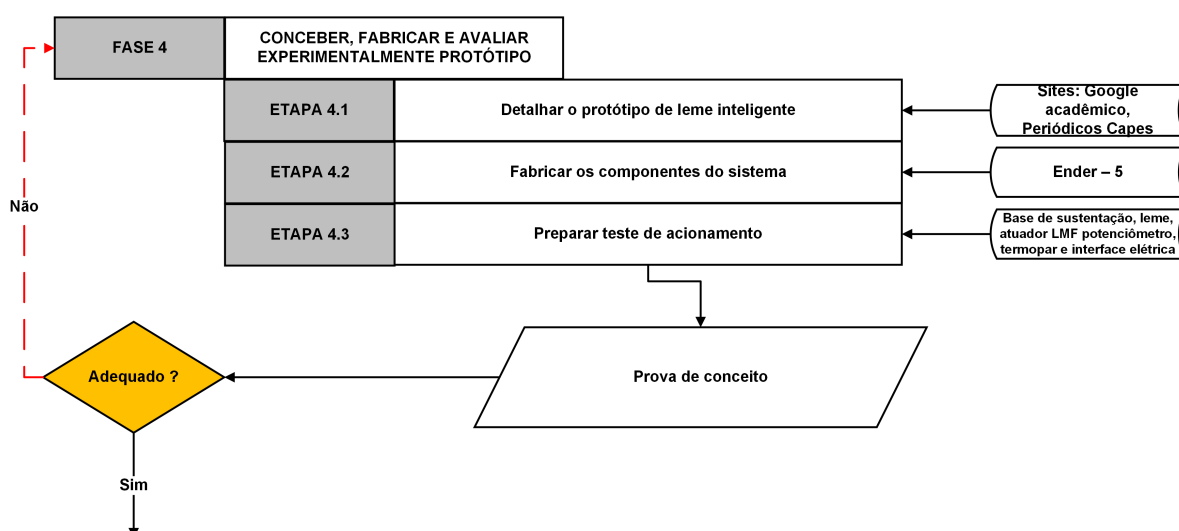


Fonte – Autoria Própria (2022)

3.5 Fase 4 – Concepção, fabricação e avaliação experimental do protótipo

Na Figura 67 é demonstrado de forma esquemática a sequência de procedimentos para os testes, as medições e as análises realizadas.

Figura 67 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 4)

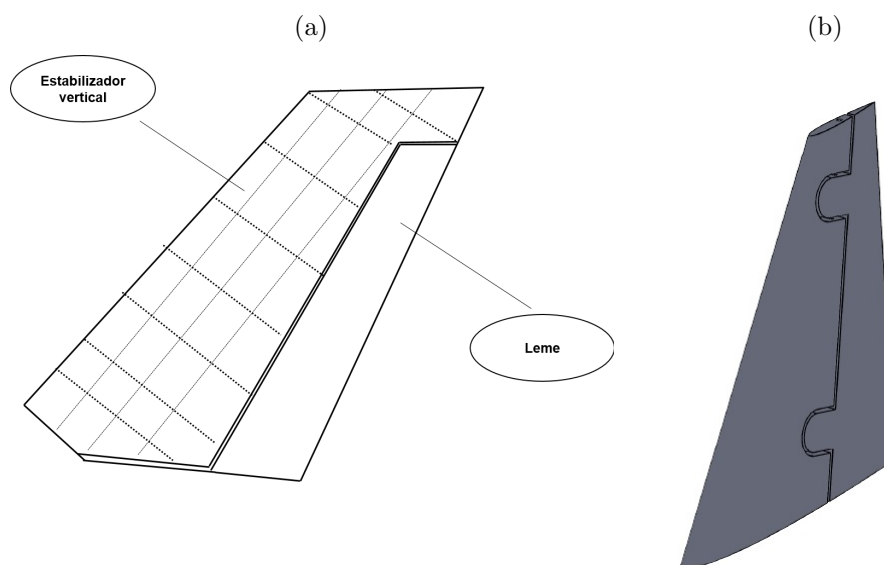


Fonte – Autoria Própria (2022)

Na etapa 4.1 descreve-se o protótipo de leme utilizando um modelo simplificado que representa a geometria de uma empenagem vertical. A descrição do subsistema leme, de forma complementar, foi disponibilizada no Anexo C. A ideia foi promover o acionamento

a partir de elementos em LMF. Na Figura 68a é ilustrado o leme instalado no estabilizador vertical. Os elementos de movimentação da superfície móvel são as articulações, ou pares cinemáticos do sistema mecânico, de maneira que a atuação pretendida deve provocar a rotação ao redor de uma junta. Na Figura 68b é exibido o projeto do protótipo virtual 3D e para realização dos desenhos utilizou-se o programa CAD *SOLIDWORKS* versão 2018 da *Dassault Systèmes*.

Figura 68 – (a) Representação esquemática da empenagem vertical e (b) Projeção em perspectiva do leme aeronáutico desenvolvido



Fonte –Autoria Própria (2022)

Especificamente, tanto para a raiz quanto para a extremidade da empenagem vertical foi selecionado um aerofólio com perfil NACA 0012. A escolha de um perfil simétrico foi feita para maximizar os efeitos da reconfiguração de forma, uma vez que a curvatura poderá variar a partir de 0%, enquanto outros perfis já possuem curvatura pré-estabelecida, coincidentemente, é um perfil bastante empregado em experimentos e trabalhos acadêmicos com os quais será possível comparar os futuros resultados produzidos nesta área do conhecimento.

Na Tabela 5 foram elencados os dados geométricos com os respectivos valores adotados para o protótipo. Na construção do demonstrador preconizou-se uma estrutura de baixo peso e funcionamento estável, no qual haveria a possibilidade de alteração para melhor atender os requisitos de projeto, além de refinamento do desempenho com a incorporação de novas variáveis.

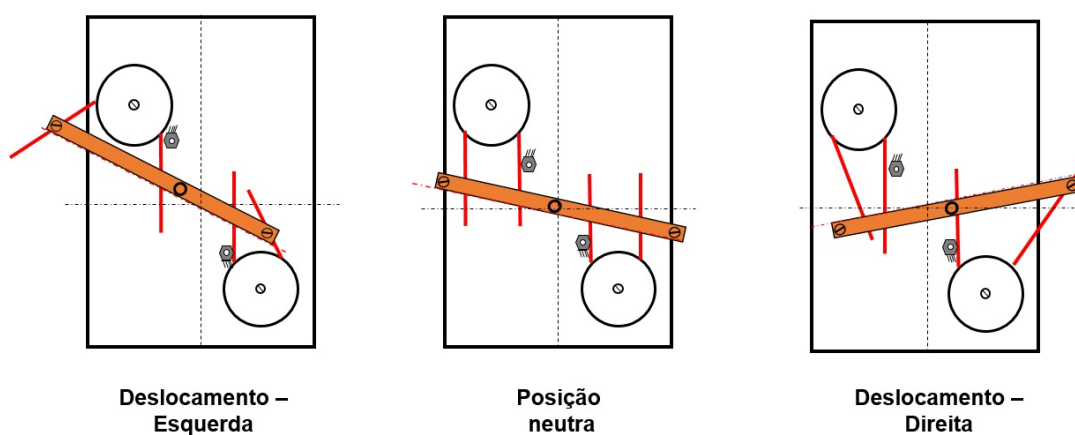
Tabela 5 – Dados geométricos da empenagem vertical idealizada

Variável	
Corda na raiz (cm)	25
Corda na ponta (cm)	7,8
Envergadura do leme (cm)	28
Corda na raiz do leme (cm)	9
Corda na ponta do leme (cm)	2,8
Perfil	NACA 0012
Fonte – Autoria Própria (2022)	

A estrutura funcional, retrata a cadeia de processos parciais que o sistema técnico regula, transformando e/ou convertendo energia, material e sinal. O sistema foi definido com interesse que o leme seja atuado por molas de torção de LMF NiTi para efetuar o movimento de guinada (direita-esquerda) e o seu retorno para a posição inicial fosse cumprido por uma força de restauração.

Considerando as informações descritas anteriormente, foi idealizado um sistema para permitir a atuação independente de cada mola, de modo a, por conseguinte, executar movimentos longitudinais em sentidos opostos. Tradicionalmente as LMF são utilizadas de forma ativa sob regime EMF ou em aplicações passivas sob regime de SE. Todavia, esses dois efeitos coexistem e foram combinados nas molas empregadas neste conceito. A contribuição de cada efeito depende das condições de carga e temperatura que o atuador estiver submetido. Uma visualização prévia do princípio funcional para os atuadores utilizados no modelo representativo de leme pode ser observada na Figura 69.

Figura 69 – Princípio de operação dos atuadores do modelo conceitual



Fonte – Autoria Própria (2022)

Nesse aspecto, adaptou-se dois atuadores de LMF, pré-tensionados, em forma de molas dentro de acoplamentos confeccionados em acrílico, utilizados graças a elevada estabilidade térmica e dimensional, associado as boas propriedades estéticas. Nesse estado, enquanto uma extremidade da mola é fixada em um anteparo a outra extremidade percorre um ângulo de 120° , de modo que ao serem ativadas eletricamente cada qual descreverá uma trajetória rotacional própria.

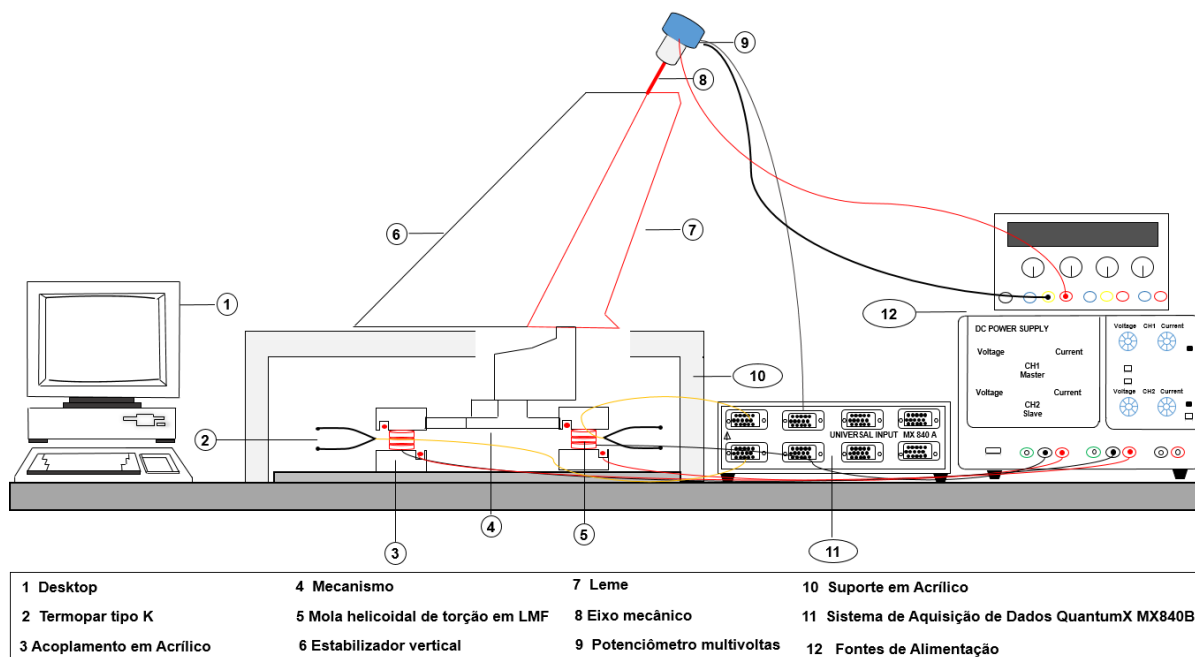
E ainda, no sistema torcional, uma estrutura polimérica em ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno), em laranja foi articulada as extremidades de cada mola. Esta estrutura tem pino guia na parte central, que ocupa o papel de conexão a outra estrutura fixada na região inferior do leme, transmitindo movimento para o mesmo.

Na etapa 4.2 realiza-se a manufatura das peças que integram o protótipo. Esta foi realizada em uma impressora baseada na tecnologia FDM, modelo *Ender-5*. Durante a fabricação dos componentes, o ambiente foi climatizado a 20°C , sem fluxo de ar direcionado ao equipamento. As peças foram processadas de modo individual, previamente, modeladas em um programa CAD e exportadas em formato *Standard Triangle Language (STL)* em representação binária, que pôde ser lido pela impressora. De vários materiais disponíveis foi utilizado um rolo de filamento de 1 kg com 1,75 mm de diâmetro constituído em PETG (Politereftalato de Etileno Glicol). O PETG foi selecionado em razão da disponibilidade, facilidade de impressão, boa tenacidade afora um visual nobre no resultado final do produto.

A etapa 4.3 procede-se aos testes de acionamento, que tem por objetivo calcular a resposta do sistema em função dos parâmetros de entrada. Isto é realizado através de um sinal de corrente recebido pelo atuador e subsequentemente observando a leitura da resposta alcançada pelo sensor angular (potenciômetro). O esquema de instrumentação e componentes pode ser observado na Figura 70.

O acionamento dos atuadores foi gerado por efeito Joule, no qual manuseou-se uma fonte de alimentação *Agilent E3633A* para reproduzir o aquecimento, sendo aplicado uma entrada de corrente de 5 A, escolha fundamentada no experimento realizado, e apresentado em detalhes na fase 3. Para o resfriamento utilizou-se o ar a temperatura ambiente do laboratório. Em seguida foi inserido em cada mola, um microtermopar tipo K, para monitoramento de valores de temperatura. A fixação de cada sensor nas espiras foi efetuado mais uma vez por meio de uma descarga capacitiva.

Figura 70 – Diagrama esquemático da configuração experimental para o acionamento do leme



Fonte – Autoria Própria (2022)

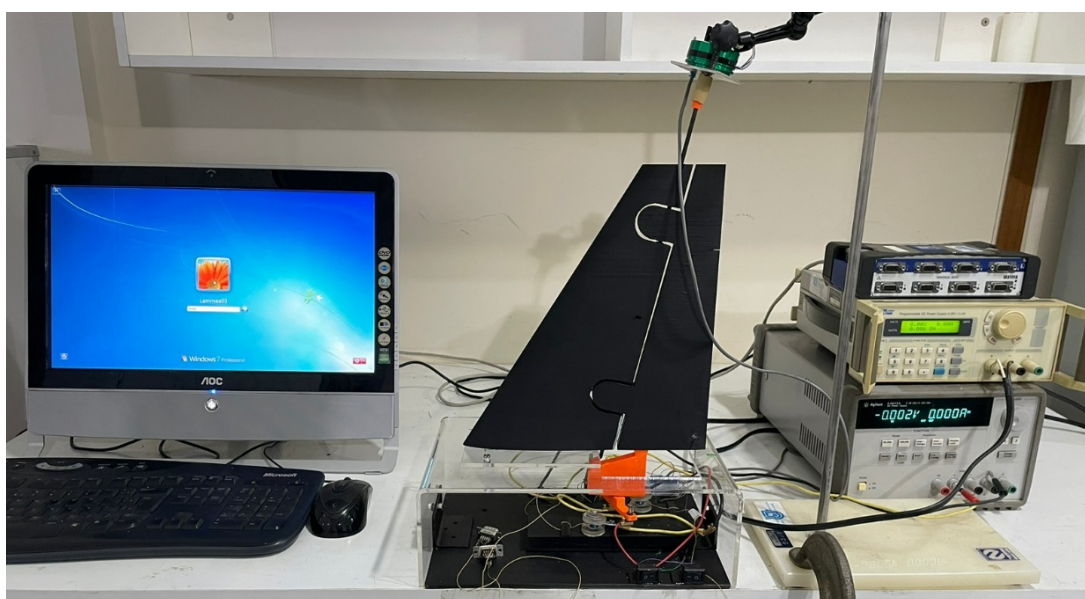
A instrumentação para mensurar o deslocamento angular sofrido pelo leme, foi composta de um potenciômetro com rolamentos internos e baixo atrito. Este sensor foi acoplado ao eixo de movimento do leme através de uma bucha, de modo, que a variação dos valores emitidos representassem a variação angular do leme. Este potenciômetro apresenta $100\ \Omega$ e foi alimentado por uma fonte de 10 V e corrente de 0,45 A. Compete lembrar que videogrametria pode ser uma alternativa para este tipo de situação, contudo o emprego do potenciômetro torna a captação mais simples, não demandando outros equipamentos, como uma câmera de alta velocidade. Adicionalmente, a coleta via potenciômetro é mais rápida, pois, não é necessário muito tempo para o processamento de dados.

Para se obter uma melhor precisão dos resultados, foi indispensável se fazer a calibração estática do potenciômetro. A calibração do potenciômetro foi implementada e amparada em um transferidor mecânico. Foi estabelecida uma correspondência entre o ângulo zero do deslocamento do potenciômetro coincidindo-se com o ângulo zero do transferidor e obtida uma determinada tensão. A partir daí foi-se variando o posicionamento do eixo do potenciômetro e anotando-se as tensões. O potenciômetro foi calibrado já estando conectado ao conjunto formado pela bucha e eixo do leme.

Todos os dados foram registrados em um computador por intermédio de um aparelho de condicionamento e aquisição de dados HBM, série Quantum X, modelo MX840A. Esta unidade de aquisição contém 8 canais multifuncionais, oferecendo um conversor analógico/digital de 24 bits por canal e taxa de amostragem de até 19200 Hz por canal. Os sinais provenientes das medições foram capturados a uma frequência de amostragem de 150 Hz. Esta taxa foi definida por reproduzirem ensaios de natureza quase-estática e concomitantemente ocasionar uma redução das oscilações indesejadas ao sistema.

O leme foi montado em um suporte em acrílico de forma que viabilize rigidez suficiente para evitar distorções no decorrer do experimento, além do mais esta estrutura foi projetada para que seja possível modificações e adequações de dispositivos nela posicionados. Na Figura 71 tem-se uma fotografia do sistema completo, incluindo sistema mecânico e eletrônico.

Figura 71 – Detalhe da bancada de teste de acionamento

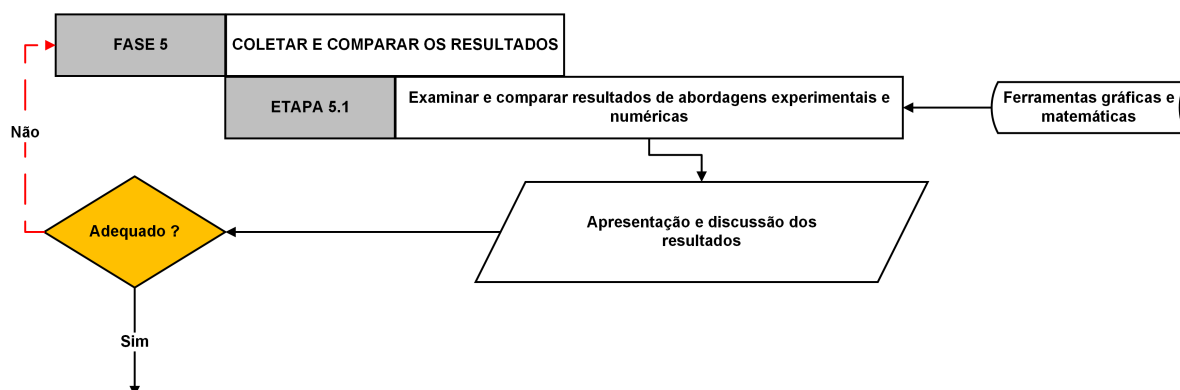


Fonte – Autoria Própria (2022)

3.6 Fase 5 – Análise de dados e comparação dos resultados obtido

A Fase 5 dedica-se a análise dos dados arregimentados e comparação dos resultados experimentais. A principal etapa para a conclusão desta fase pode ser resumida de forma bastante clara através do esquema apresentado na Figura 72.

Figura 72 – Fluxograma da metodologia utilizada durante a pesquisa (Fase 5)



Fonte – Autoria Própria (2022)

Na Etapa 5.1 fez-se uso de *softwares* e ferramentas gráficas Microsoft Excel, Origin-Lab, MATLAB com o intuito de realizar a comparação dos resultados obtidos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após concluídas as etapas metodológicas precedentes. Neste capítulo serão apresentados os resultados experimentais, logrados nas análises desenvolvidos em atuadores termoconformados a partir de fios NiTi. Desta forma, a primeira etapa tem a ver com a caracterização térmica e mecânica de fios. Na sequência, serão retratadas as principais consequências das informações coletadas na plataforma experimental, desenvolvida para testar o comportamento termoelástico da mola de torção de LMF. Depois disso, será exposto os testes de acionamento com os atuadores torcionais instalados no protótipo executado.

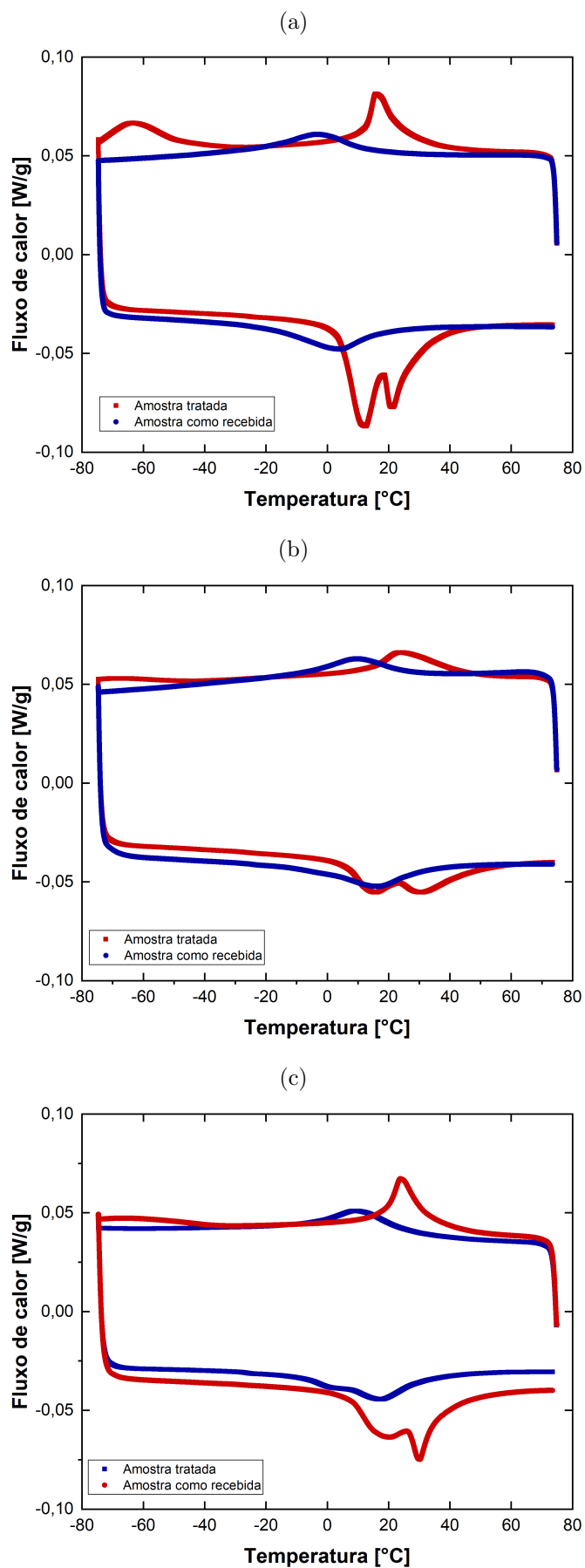
4.1 Caracterização de fios de LMF NiTi

4.1.1 Ensaios Térmicos de fios de LMF NiTi via DSC

Nesta análise foram efetuados ciclos térmicos em fios de LMF NiTi com 0,9 mm, 1,2 mm e 1,5 mm de diâmetro monitorando a variação do fluxo de calor em função da temperatura em dois estados distintos, conforme recebido e após a realização da conformação/tratamento térmico (*shape-setting*), a fim de assegurar-se das propriedades informadas pelo fabricante. Igualmente, examinar o quanto a conformação e o tratamento térmico interferem nas temperaturas de transformação de fase e na energia dispendida para a realização destas. A determinação das temperaturas críticas de transformação por meio dos termogramas foi abordada na seção 3.2, conforme exemplo apresentado nas Figuras 50a e 50b. As Figuras 73a, 73b e 73c logo abaixo representam as curvas obtidas nos ensaios de calorimetria de varredura para os fios antes e após o procedimento termomecânico (500 °C por 30 minutos).

Verifica-se nos termogramas ilustrados, que os fios de NiTi na condição como recebido, apresentam temperatura de austenitização final (A_f), informação relevante, para os objetivos do presente trabalho, valores consideravelmente distintos para cada diâmetro. Isto pode ser atribuído ao histórico de obtenção do fio por meio de trefilação durante o trabalho à frio, além da modificação de porcentagens atômicas de elementos como Ni e Ti dentro do mesmo lote de produção.

Figura 73 – Termogramas DSC como recebido e após o tratamento térmico de fios NiTi:
(a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm



Fonte – Autoria Própria (2022)

Ainda nos termogramas relatados, certifica-se que os fios NiTi, tanto de menor quanto de maior diâmetro, apresentam picos característicos de transformação direta (resfriamento) e reversa (aquecimento). O aspecto qualitativo dos picos em todos os períodos térmico revela, entretanto, que as energias de transformação de fase observadas ao longo do resfriamento foram menores do que o esperado para a transformação de fase direta. Isto indica, possivelmente, que se sucedem transformações intermediárias, ou melhor, compreendem a formação da martensita conhecida por fase R (romboédrica). A Tabela 6 resume as principais propriedades térmicas dos fios NiTi, arregimentadas a partir dos ensaios DSC.

Tabela 6 – Temperaturas de transformação de fase dos fios de NiTi

Amostra		Fio de 0,9 mm		Fio de 1,2 mm		Fio de 1,5 mm	
	Condição	Como recebido	Tratado	Como recebido	Tratado	Como recebido	Tratado
Resfriamento	Rs [°C]	12,7	26,7	26,3	35,1	27,9	34,3
	Rf [°C]	-23,9	12,1	-8,8	13,7	-6,1	17,9
	Ms [°C]		-42,9				
	Mf [°C]						
	ΔH_c [J/g]	3,42	4,54	3,22	8,10	3,24	4,14
Aquecimento	As [°C]	-19,8	17,9	-1,9	19,4	-2,2	22,6
	Af [°C]	18,4	31,2	31,2	38,2	33,3	36,2
	ΔH_h [J/g]	4,00	12,14	3,98	7,92	4,88	8,82
	Ht [°C]	6,96	3,47	7,11	5,62	7,83	6,39

Fonte – Autoria Própria (2022)

A partir dessas informações, é possível constatar que, as temperaturas A_s , A_f , R_s e R_f sofrem forte influência do tratamento térmico (efeitos da temperatura e tempo), de modo que após o recozimento efetuado seus valores elevam-se substancialmente. Segundo Czechowicz e Langbein (2015) este comportamento é esperado e ocorre devido ao decréscimo da densidade de discordâncias associado ao recozimento. As entalpias de transformação dos espécimes tratados manifestam alterações significativas em relação aos não tratado, e na contramão, para a mesma situação as histereses térmicas diminuem em função do tratamento térmico.

Adicionalmente, convém mencionar que em temperaturas mais baixas e tempos mais curtos de tratamento térmico, aparece o precipitado Ti_3Ni_4 com uma estrutura romboédrica. Como consequência, para tempos de tratamento térmico menores do que

360 minutos, frequentemente, os precipitados Ti_3Ni_4 e Ti_2Ni_3 interagem com as tensões internas do material, forçando o deslocamento da transformação martensítica para temperaturas mais baixas e permitindo a evolução da fase R (KHALIL-ALLAFI et al., 2004; LAGOUDAS, 2008). De certo modo, isto impossibilitou a visualização de todas as temperaturas de transformação nos termogramas da LMF NiTi, fora da faixa atingida pelo equipamento DSC utilizado neste trabalho (abaixo de - 75 °C).

No sentido de sumarizar os resultados, a Figura 74a e 74b focam na evolução das temperaturas críticas de transformação dos fios de LMF, comparando-os para demonstrar as implicações que conformação/tratamento originaram.

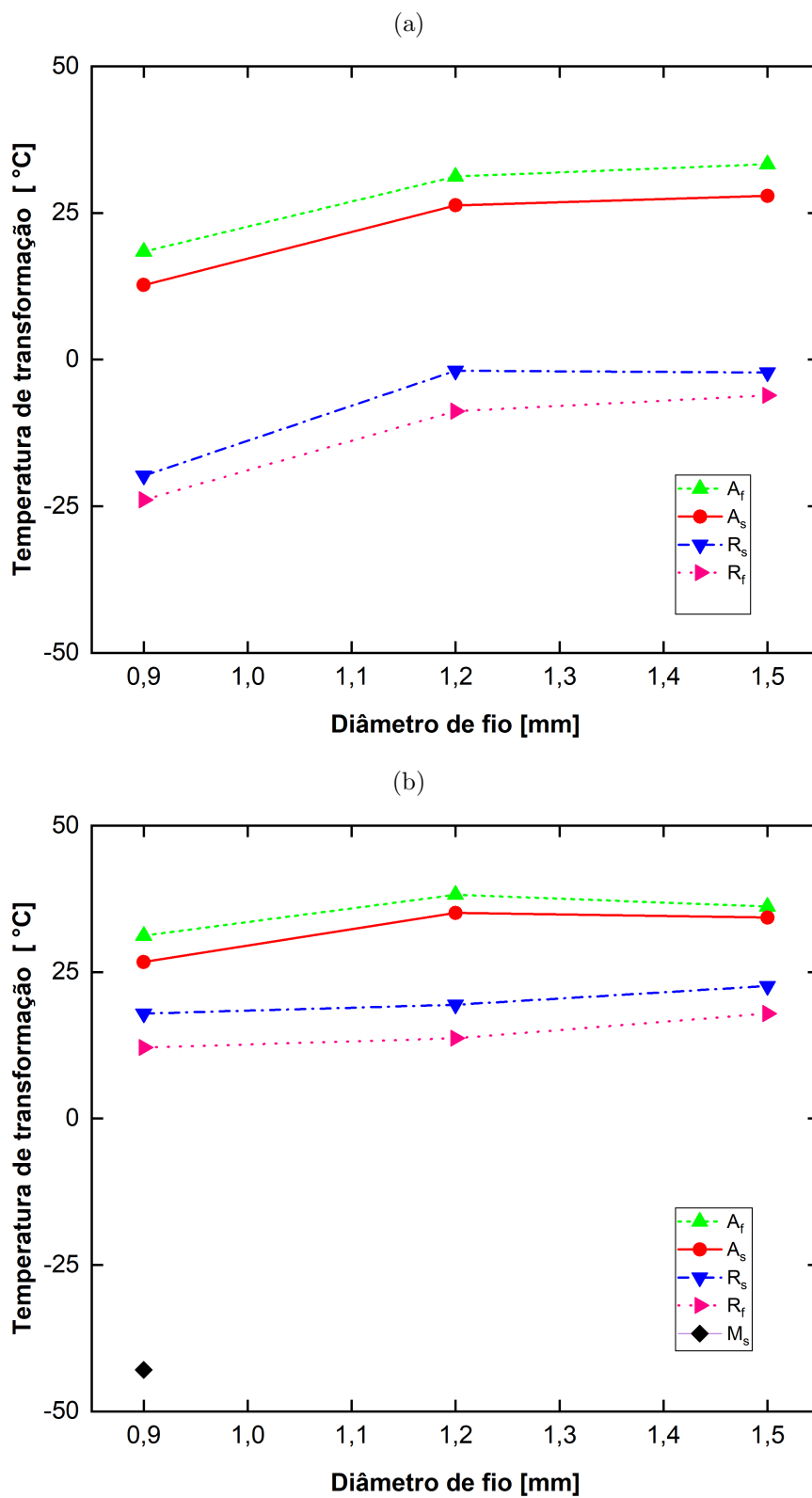
Os dados recolhidos refletem a mesma tendência de comportamento apontados nos estudos empreendidos por Asl, Kadkhodaei e Karimzadeh (2019), Heidari et al. (2016) acerca de espécimes retirados de molas helicoidais de LMF NiTi (1,5 mm de diâmetro), em regime de superelasticidade. Ainda relativo a estes trabalhos, os autores descobriram que para o intervalo de 550 a 650 °C as temperaturas críticas são reduzidas com exceção de M_s , estabelecendo um parâmetro limitante para este trabalho. Na prática, foi possível informar-se acerca das temperaturas de transformação de fios no estado como adquirido e após ter sofrido conformação seguido de tratamento térmico, e, com isso, confirmar a superelasticidade apenas do fio de 0,9 mm no estado como recebido, as demais situações demonstram que as amostras estão termoativadas para a aplicação final, uma vez que as mesmas expõem $A_f > 27\text{ °C} > M_s$.

4.1.2 Ensaios Mecânicos de tração a temperatura ambiente

Por meio das curvas tensão – deformação resultantes de ensaios monotônicos de tração em fios de NiTi na temperatura ambiente, de aproximadamente 27 °C, determinou-se os níveis de deformação mecânica a serem usados nas análises mecânicas. Os testes foram conduzidos levando em consideração as diretrizes de ensaio veiculadas pela norma ASTM F2516-14. Nesse contexto, nas Figuras 75, 76 e 77 observam-se as curvas tensão – deformação obtidas mediante este procedimento.

- Região I [0, 500 MPa]: os fios NiTi, no estado austenítico, com presença de deformação elástica praticamente linear (até 1-2%). Nesse estágio, ao cessar o esforço mecânico, o elemento retornará ao ponto de tensão zero seguindo uma trajetória também linear;

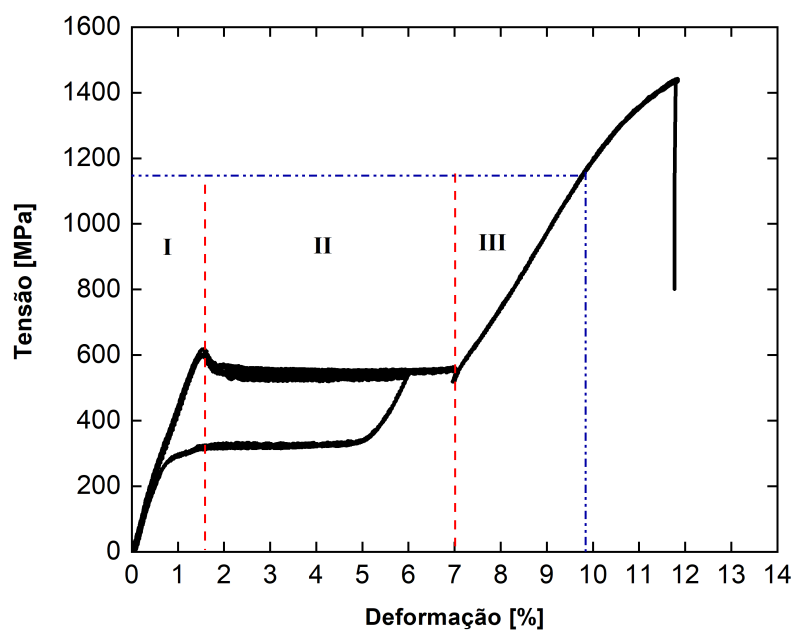
Figura 74 – Temperaturas de transformação de fase obtidas via DSC em função do diâmetro de fios NiTi: (a) Como recebida e (b) Tratado



Fonte – Autoria Própria (2022)

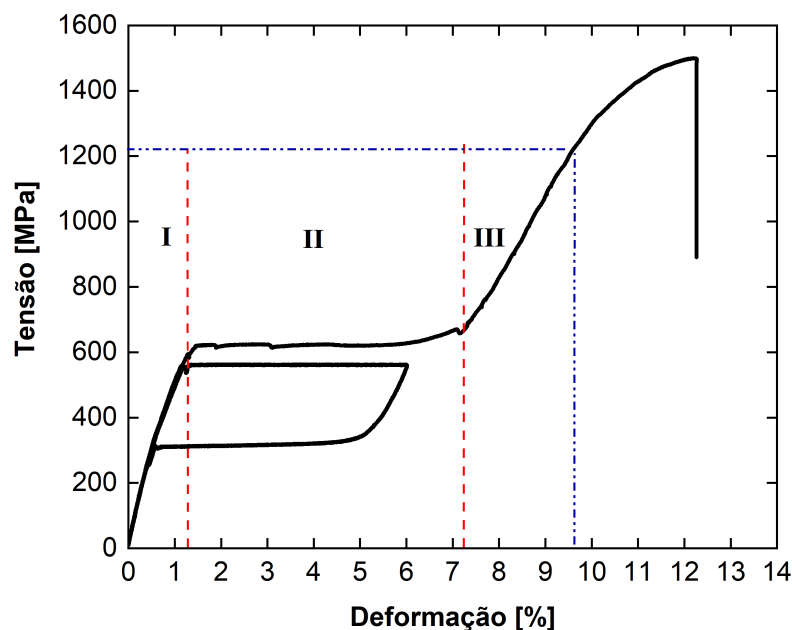
- Região II [a partir de 500 MPa até 600 MPa]: a austenita começa a transformar-se em martensita induzida pelo campo de tensão mecânica. Este comportamento é caracterizado por um patamar que tem início em aproximadamente 500 MPa prolongando-se até 600 MPa, com quase 6-8% de deformação. Ao cessar a carga nesta região tem-se o retorno ao ponto de deformação zero através de um caminho elástico não-linear. É que caracteriza o fenômeno denominado de superelasticidade;
- Região III [600 a ~ 1200 MPa]: os fios apresentando uma microestrutura completamente martensítica induzida por tensão inicia sua deformação linear elástica. Após 600 MPa a martensita induzida por tensão apresenta deformação elástica linear até cerca de 1200 MPa, para uma faixa entre 9 e 11%. A partir deste ponto a deformação passa a ser plástica, até a ruptura.

Figura 75 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 0,9 mm



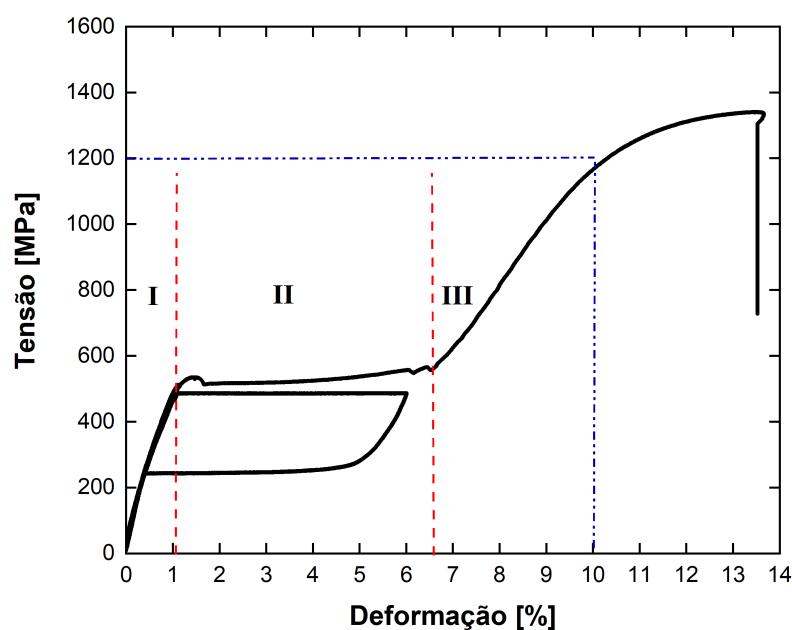
Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 76 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 1,2 mm



Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 77 – Curva tensão-deformação de fio NiTi, com diâmetro de 1,5 mm



Fonte – Autoria Própria (2022)

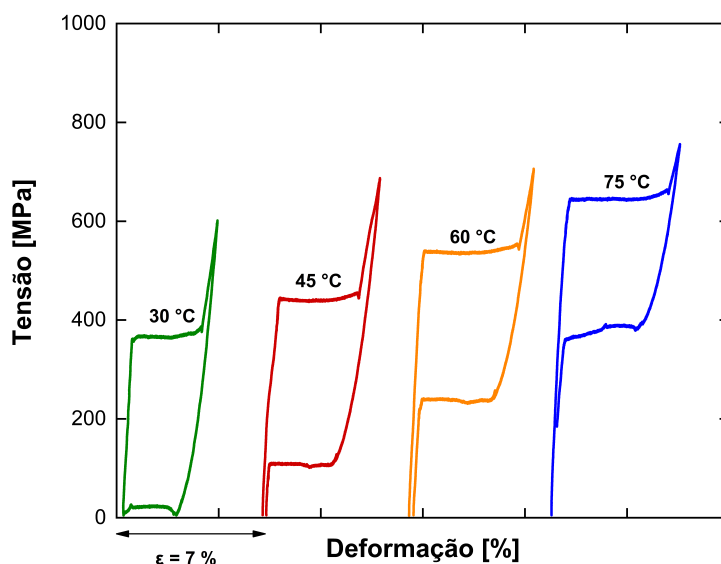
De forma geral, não se contempla nas Figuras 75, 76 e 77 quaisquer anomalias ou desvios nas curvas de superelasticidade que possam estar relacionadas à deformação oriundas da fase R, conforme observado algumas vezes na literatura (OTSUKA; WAYMAN, 1999). Neste contexto, as curvas mostram também que os fios NiTi superelásticos, de 0,9, 1,2 e 1,5 mm indicaram limite de ruptura da ordem de 1400 MPa com deformação total

recuperável situada entre 6 e 8%, enquanto que materiais metálicos clássicos apresentam deformação elástica limitada a apenas 0,2%.

4.1.3 Ensaios Mecânicos de tração a diferentes temperaturas

Realizou-se caracterizações de ordem termomecânica, a fim de verificar se a elevação da temperatura de ensaio desencadeia modificações na resposta mecânica do fio. Para tanto, foram executados ensaios de tração a temperaturas isotérmicas no intervalo de 30 a 75 °C sendo essas de: 30 °C, 45 °C, 60 °C e 75 °C. A partir desses resultados pode-se observar qualitativamente sua evolução, assim como quantificar esse comportamento através da determinação dos coeficientes C^A e C^M , que representam o aumento das tensões críticas de transformação de fase em função da temperatura. Nesse sentido, os efeitos da variação de temperatura sobre as curvas tensão-deformação para o fio 0,9 mm é indicado na Figura 78.

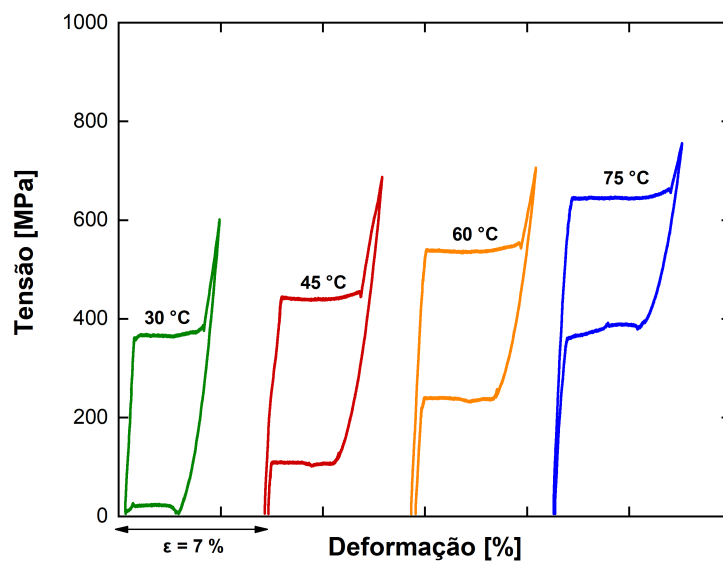
Figura 78 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 0,9 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio



Fonte – Autoria Própria (2022)

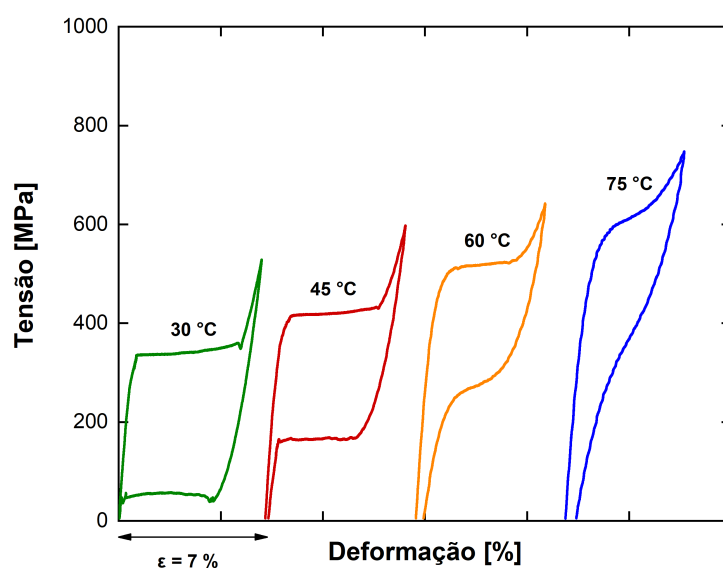
De maneira análoga às Figuras 79 e 80 apresentam a variação do comportamento termomecânico tensão-deformação dos fios 1,2 mm e 1,5 mm, respectivamente para a mesma faixa de temperatura considerada anteriormente.

Figura 79 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 1,2 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio



Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 80 – Resposta mecânica sob tração uniaxial do fio de 1,5 mm LMF NiTi em função da temperatura de ensaio



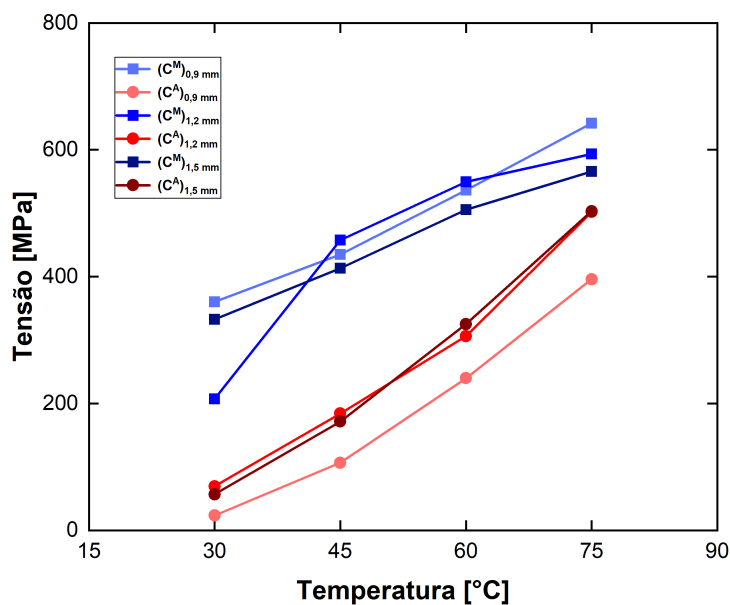
Fonte – Autoria Própria (2022)

Em relação à Figura 78 observa-se que mesmo externando uma estrutura cristalina quase integralmente austenítica (estrutura presente em altas temperaturas), o material ainda apresenta uma forte dependência térmica na sua resposta superelástica. É importante chamar a atenção para o fato de que a tensão necessária para gerar 7 % de deformação aumenta de cerca de 450 MPa a uma temperatura de 30 °C, para aproximadamente 800 MPa quando o material se encontra a 75 °C, no caso do fio de 0,9 mm. Do mesmo modo, para o fio

de 1,2 mm, o valor subiu de 450 MPa até 900 MPa, enquanto de 1,5 mm foi de 450 MPa para próximo de 900 MPa. Esse fenômeno acontece em consequência da estrutura austenítica encontrar-se estável a altas temperaturas e para induzir a transformação martensítica é necessário a aplicação de energia mecânica ao sistema. Por conseguinte, quanto maior o nível de energia térmica do material (temperatura), maior será a energia mecânica (tensão aplicada) demandada para induzir essa transformação. Este comportamento está na origem de uma lei de Clausius-Clapeyron, específica para LMF (OTSUKA; WAYMAN, 1999).

Diante as curvas mostradas nas Figuras 78, 79 e 80 foi possível calcular os coeficientes C^A e C^M para os fios NiTi examinados. O coeficiente C^A foi adquirido usando as tensões críticas finais de transformação reversa ao longo do descarregamento (σ_f^{MA}) enquanto que o coeficiente C^M foi colhido utilizando as tensões críticas de início da transformação direta no decorrer do carregamento (σ_s^{AM}). A Figura 81 ilustra o diagrama tensão–temperatura para as amostras de fios da LMF NiTi.

Figura 81 – Curvas de tensão crítica de transformação em função da temperatura de ensaio para o fio de LMF NiTi



Fonte – Autoria Própria (2022)

Com base nas curvas expressas na Figura 81 foi possível mensurar os coeficientes C^A e C^M de cada fio NiTi. Nesse contexto, os dados são resumidos na Tabela 7.

Tabela 7 – Comparação entre os coeficientes de influência de tensão para cada fio estudado

Coeficiente de influência de tensão[MPa/°C]	
(CM)0,9mm	6,31
(CA)0,9mm	8,34
(CM)1,2mm	8,34
(CA)1,2mm	9,47
(CM)1,5mm	5,27
(CA)1,5mm	9,95

Fonte – Autoria Própria (2022)

4.2 Caracterização de molas de LMF NiTi

4.2.1 Ensaios Térmicos de molas de LMF NiTi via RET

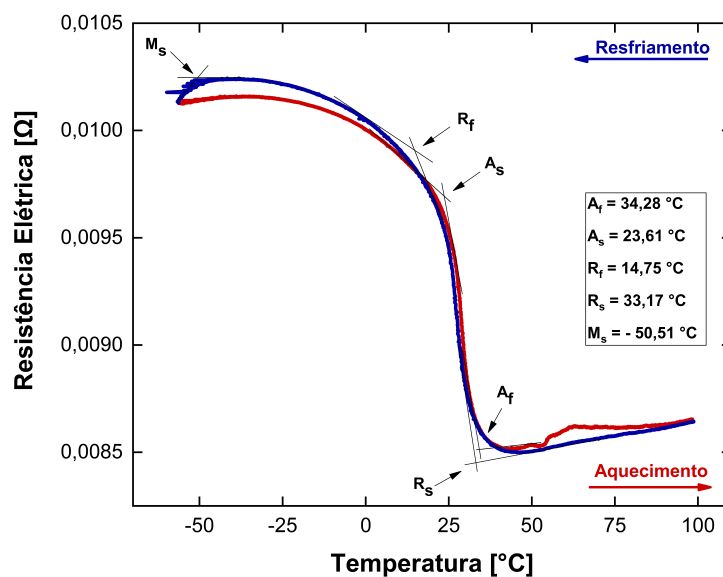
Nesse tópico, com as molas já fabricadas, foi formalizado um conjunto de ensaios térmicos utilizando o método de RET. Essa técnica foi selecionada por ser capaz de avaliar as temperaturas de transformação das molas inteiras, de modo não-destrutivo e sem aplicação de carregamento mecânico, de início. Desse modo, é possível determinar as temperaturas das molas de LMF de uma maneira global. Outro fator relevante para justificar a obtenção destes resultados é a possibilidade de traçar estratégias de controle a partir da realimentação da resistência elétrica, que podem levar ao projeto de atuadores mais elaborados.

Como comentado anteriormente, as molas foram divididas em dois grupos distintos, chamados M8 e M10, perfazendo um total de 6 espécimes testados. As Figuras 82, 83, 84, 85, 86, 87 destacam as curvas de resistência elétrica em função da temperatura coletadas para cada atuador.

Diante desses resultados, constatou-se que existem inflexões características de mudança de fase, indicando a variação das propriedades do material de acordo com a alteração da sua microestrutura. Constata-se também um comportamento inversamente linear de resistência elétrica com o resfriamento e por extensão com aquecimento durante um ciclo térmico completo. Através do método das tangentes, foi possível estimar as temperaturas de transformação R_s , R_f , M_s , A_s e A_f comumente verificadas na literatura (OTSUKA; WAYMAN, 1999), no entanto devido ao nível de resolução do equipamento empregado, não foi possível a demarcação do pico de temperatura correspondente a M_f

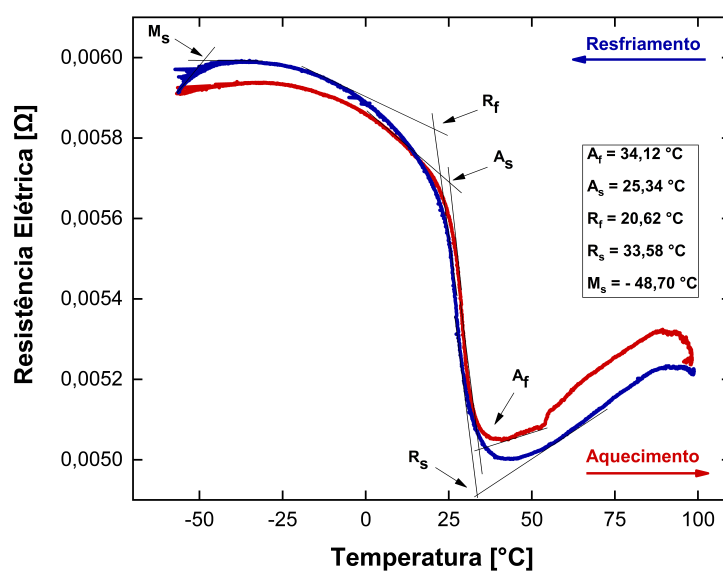
por este estar em uma temperatura muito baixa. Esse fato se torna importante, pois as curvas revelam que a transformação direta austenita–martensita ao longo do resfriamento é precedida da formação da fase R de estrutura romboédrica (ANTONUCCI et al., 2007; MATSUMOTO, 2004).

Figura 82 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 0,9 mm (M8)



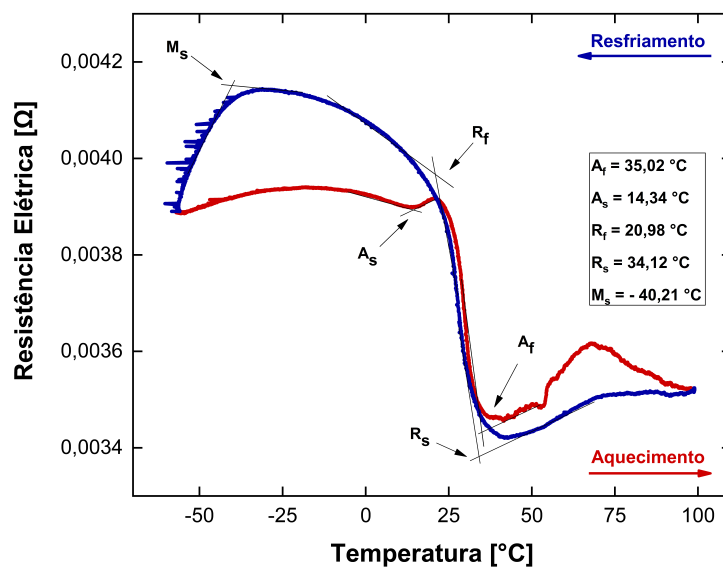
Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 83 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,2 mm (M8)



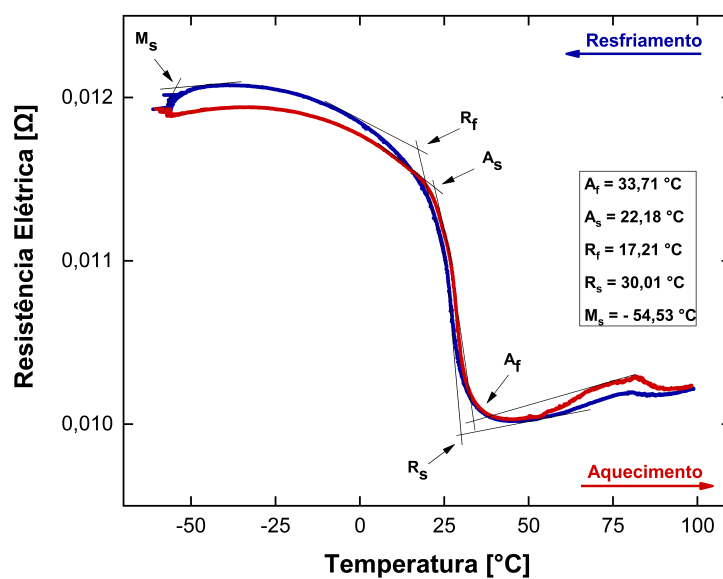
Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 84 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,5 mm (M8)



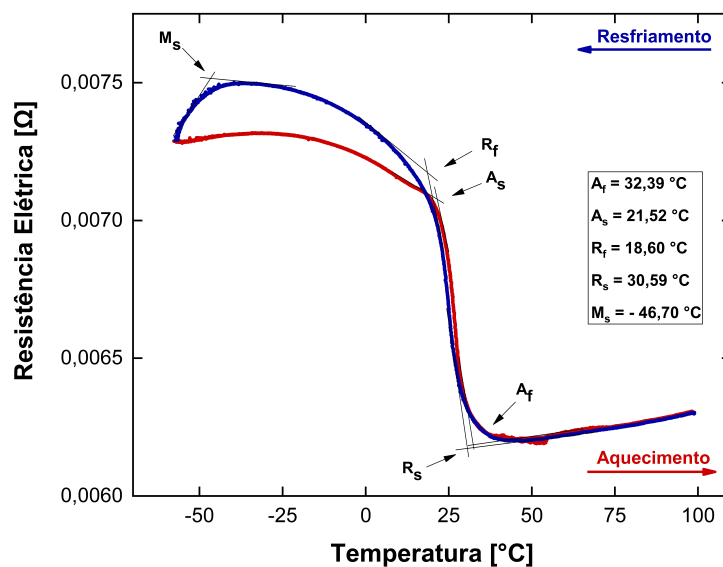
Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 85 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 0,9 mm (M10)



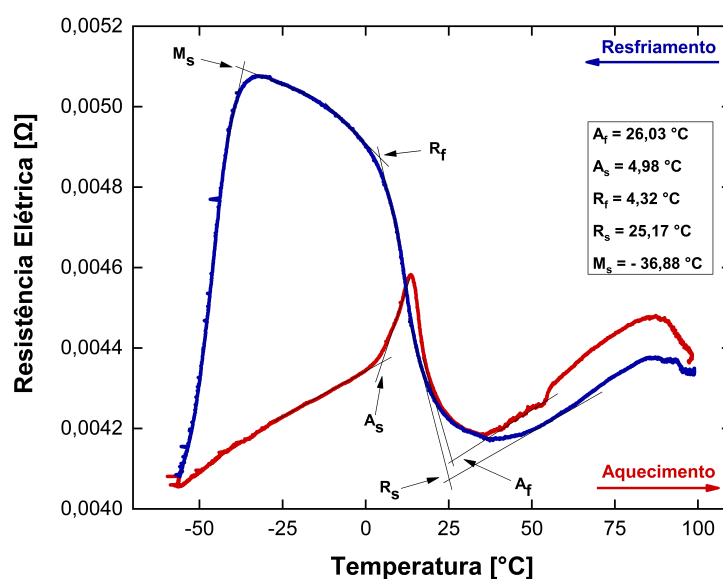
Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 86 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,2 mm (M10)



Fonte – Autoria Própria (2022)

Figura 87 – Curvas de transformação obtidas via RET para molas de torção de LMF NiTi do tipo 1,5 mm (M10)



Fonte – Autoria Própria (2022)

A partir da análise, é possível identificar que há um pequeno deslocamento dos picos referentes às temperaturas de transformação nas molas da categoria M8 em relação aqueles examinados em molas M10. A razão para isso pode estar relacionado com as tensões resultantes oriundas do enrolamento do arame (processo de conformação mecânica). Conforme abordado previamente, a mudança de estrutura de uma LMF pode ocorrer em

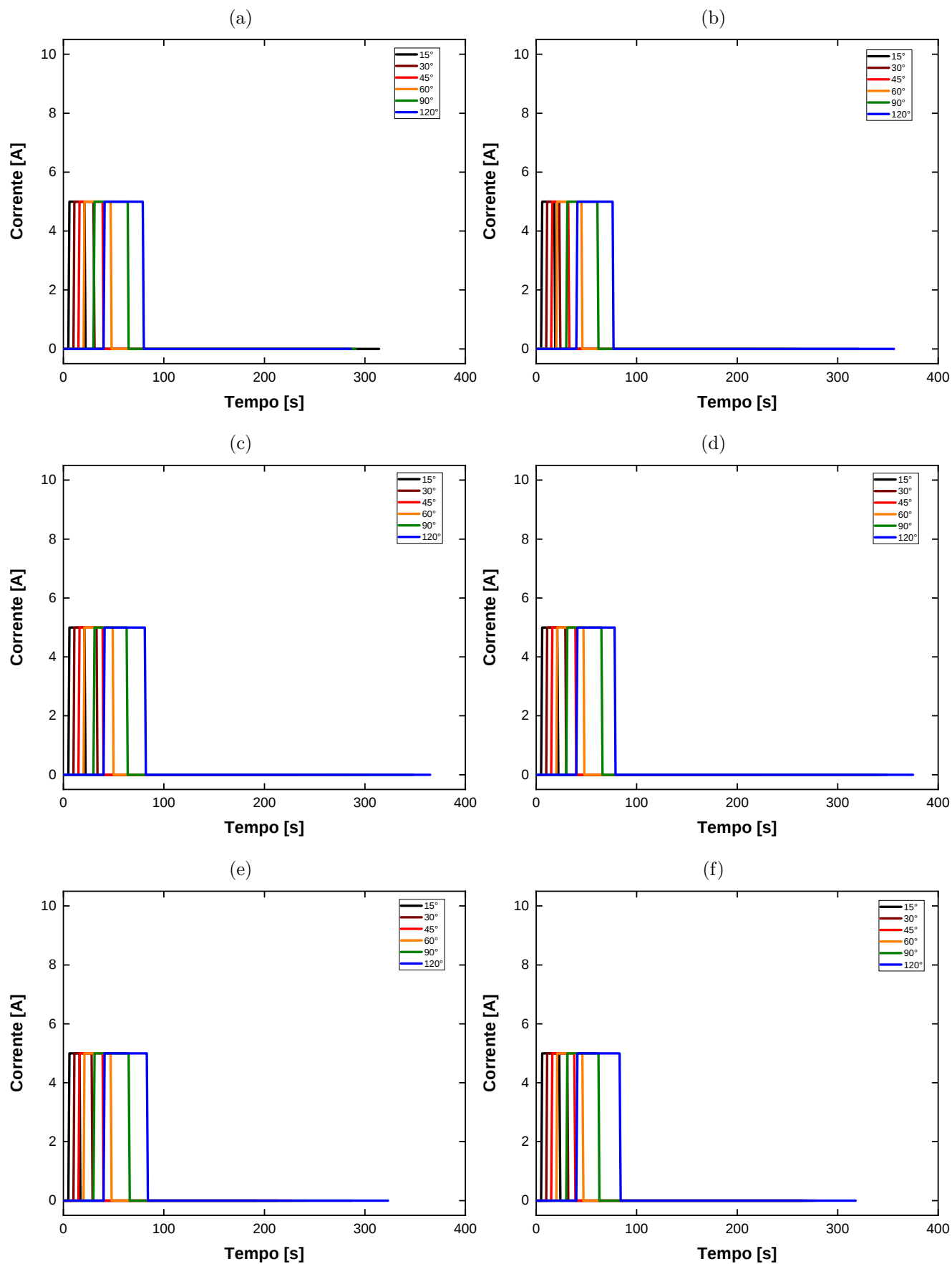
função da alteração de temperatura, de carga e de uma cooperação entre estas variáveis. Quando uma LMF é sujeita a um ciclo térmico associado com a aplicação de uma carga externa há locomoção das temperaturas de transformação para direita, isto é, há um aumento nessas temperaturas. É importante notar que, neste caso, o grau de esforço para conformar as molas M8 em torno da barra roscada tendem a ser maior que a outra categoria. Menciona-se ainda que, indubitavelmente, esta afirmação é corroborada pelo fato de molas M10 apresentarem níveis mais elevados e maior variação de resistência que os espécimes pertencentes a categoria M8.

Percebe-se, então, no que diz respeito aos diâmetros de fio, que o andamento das curvas de RET põe em evidência a dissociação deste fator com o comportamento das temperaturas críticas de transformação do material. Em outras palavras, isso significa que as alterações nas temperaturas de transformação martensítica direta e reversa ocorrem de forma aleatória, impossibilitando estabelecer uma correlação direta com esta variável. Por fim, outro ponto a ser destacado é que as temperaturas de transformação de fase logradas por essa técnica apresentam valores similares aos levantados por DSC.

4.2.2 Ensaios Termomecânicos de geração de carga em molas de LMF NiTi

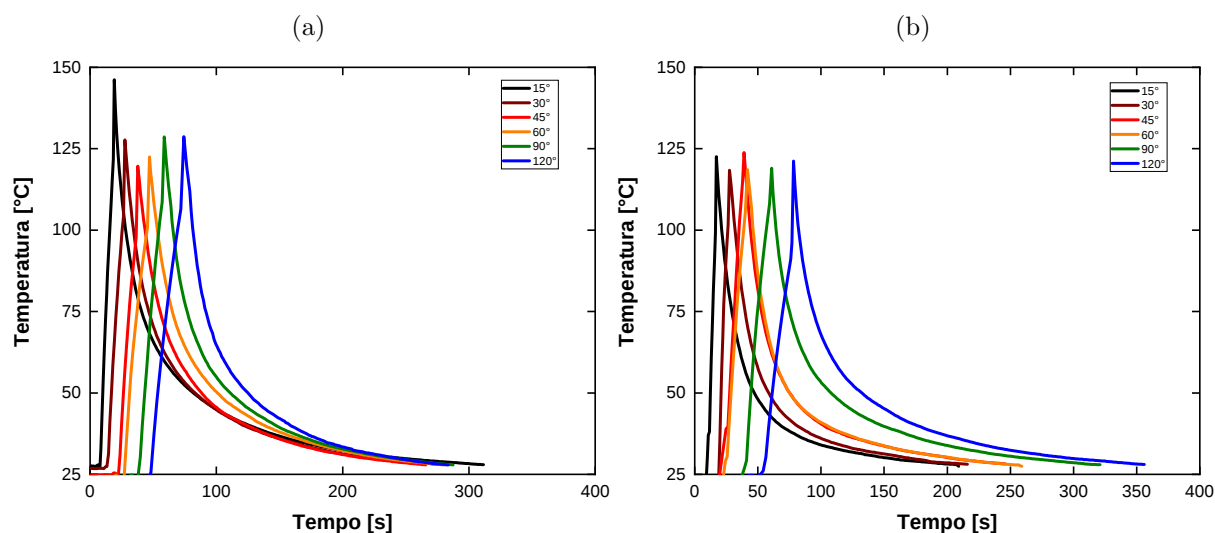
Neste procedimento termomecânico, utilizado em muitos estudos relacionados ao desenvolvimento de atuadores, as molas de torção de LMF NiTi foram examinadas pela aplicação da plataforma física desenvolvida. Para o caso específico da pesquisa, cada mola foi sujeita a níveis específicos de deslocamento angular e em seguida, mantendo essas deformações constantes, foi realizado o aquecimento do atuador, a fim de verificar a força máxima gerada em cada deflexão. Ao remover o aquecimento, a mola retorna a temperatura ambiente diminuindo a força e voltando ao estado original. Com esta premissa, foi prescrita uma entrada de corrente em degrau para cada mola de torção de LMF NiTi com amplitude máxima de 5 A, conforme ilustrado nas Figuras 88a, 88b, 88c, 88d, 88e e 88f.

Figura 88 – Sinais de corrente elétrica fornecidos às molas de torção de LMF NiTi: (a) 0,9(M8), (b) 0,9(M10), (c) 1,2(M8), (d) 1,2(M10), (e) 1,5(M8) e 1,5(M10)



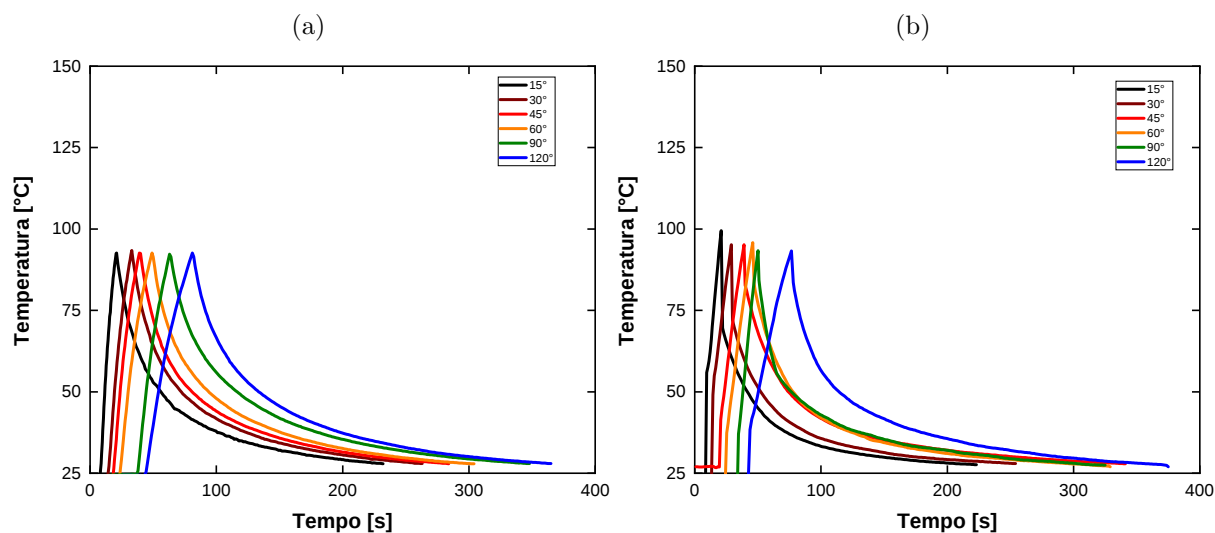
Em seguida, as Figuras 89a, 89b, 90a, 90b, 91a e 91b mostram as temperaturas alcançadas com a ativação das molas de LMF em resposta ao pulso de corrente adotado.

Figura 89 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 0,9 mm: (a) M(8) e (b) M(10)



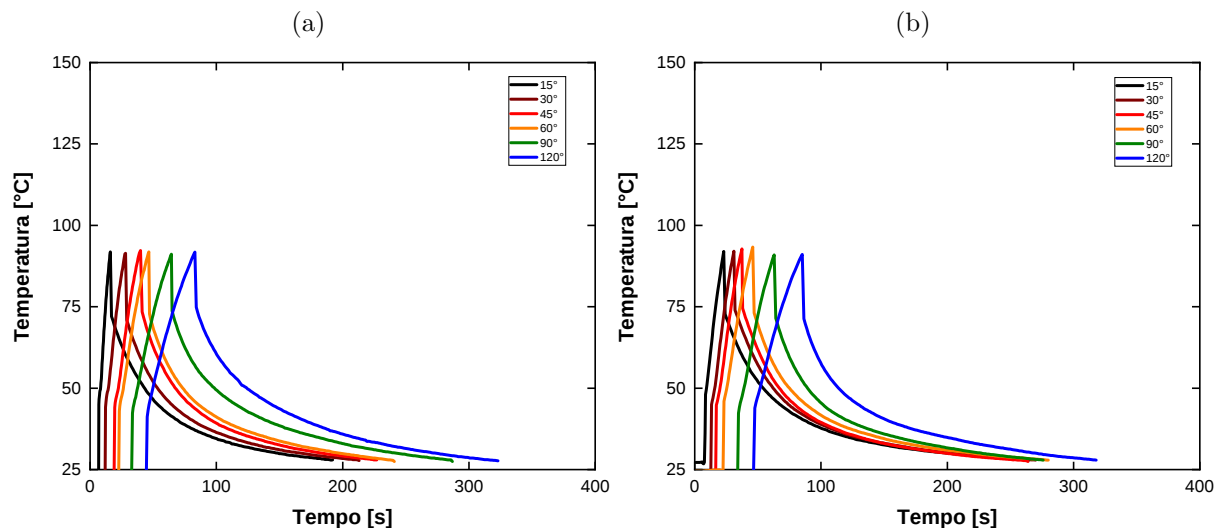
Fonte –Autoria Própria (2022)

Figura 90 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 1,2 mm: (a) M(8) e (b) M(10)



Fonte –Autoria Própria (2022)

Figura 91 – Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos para molas de 1,5 mm: (a) M(8) e (b) M(10)



Fonte –Autoria Própria (2022)

Ao analisar os diagramas de resposta térmica, verificou-se que não foi realizado um projeto adequado de sistema de controle em malha fechada que garantisse as condições físicas necessárias para manter a temperatura da mola em um nível especificado. É essencial, portanto, realizar o mapeamento desse parâmetro para assegurar a mudança de fase sem prejudicar as propriedades funcionais do atuador devido aos níveis de energia térmica aplicados.

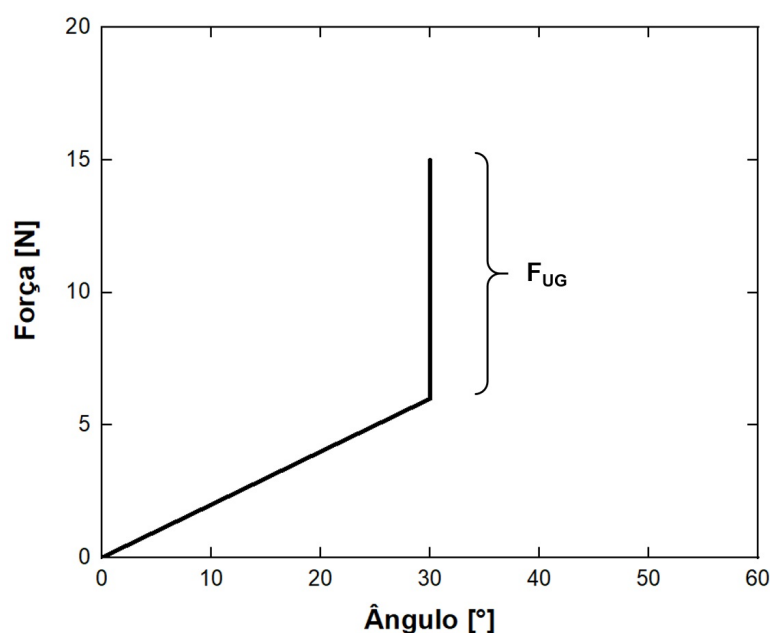
No exame dos registros térmicos experimentais, de modo geral, pode-se notar um aquecimento expressivo, quase imediato, quando a mola entra em contato com a corrente elétrica (Efeito Joule). A rápida elevação da velocidade de aquecimento, particularmente nas molas com dimensão de 0,9 mm pode ser explicada devido a reduzida área da seção transversal do fio, que significou o aumento da condução térmica, ou seja, estes sistemas foram suscetíveis ao estabelecimento de temperaturas mais elevadas em relação aos exemplares de 1,2 mm e 1,5 mm. Todavia, para o caso do resfriamento acontece transferência de calor por convecção natural, consequentemente, isto favorece a diminuição da magnitude das taxas de resfriamento quando comparado aos valores presenciados por toda a extensão do aquecimento. É razoável afirmar que estes resultados são coerentes e condizem com a literatura.

Como já evidenciado nos gráficos dos perfis de temperatura, verifica-se que todas as curvas descrevem razoavelmente bem uma função exponencial. Dunstan (1986) demonstrou

experimentalmente que os perfis de temperatura dos elementos feitos com LMF sugere fortemente que a forma da curva não está associada com o comportamento memória de forma, todavia é determinado pelas características de transferência de calor do sistema.

Para avaliar numericamente os resultados suscitados nos ensaios de geração de força, foi preciso especificar o principal parâmetro característico do teste, força útil gerada (F_{UG}), conforme ilustrado de forma simplificada na Figura 92.

Figura 92 – Curva característica tradicionalmente captada em um ensaio de geração de força



Fonte – Autoria Própria (2022)

A F_{UG} representa quanto de carga seguirá promovendo esforço a partir da ativação do EMFS. A variação deste parâmetros reproduzem diferenças nos arranjos dos gráficos obtidos, como exemplos as Figuras 93a, 93b, 93c, 94a, 94b e 94c explicitam os sinais característicos das curvas de geração de força para as molas de torção de LMF NiTi.

Figura 93 – Comportamento da força gerada por molas de torção de LMF NiTi do tipo M8 em função do ângulo: (a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm

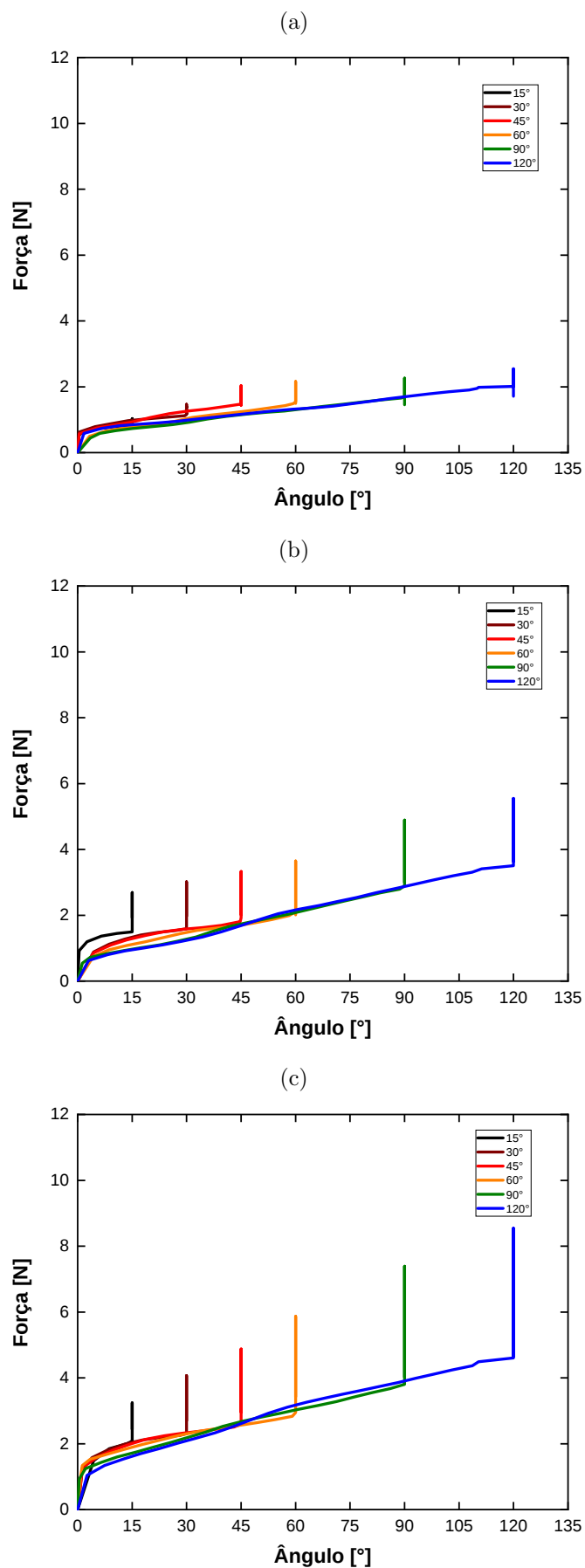
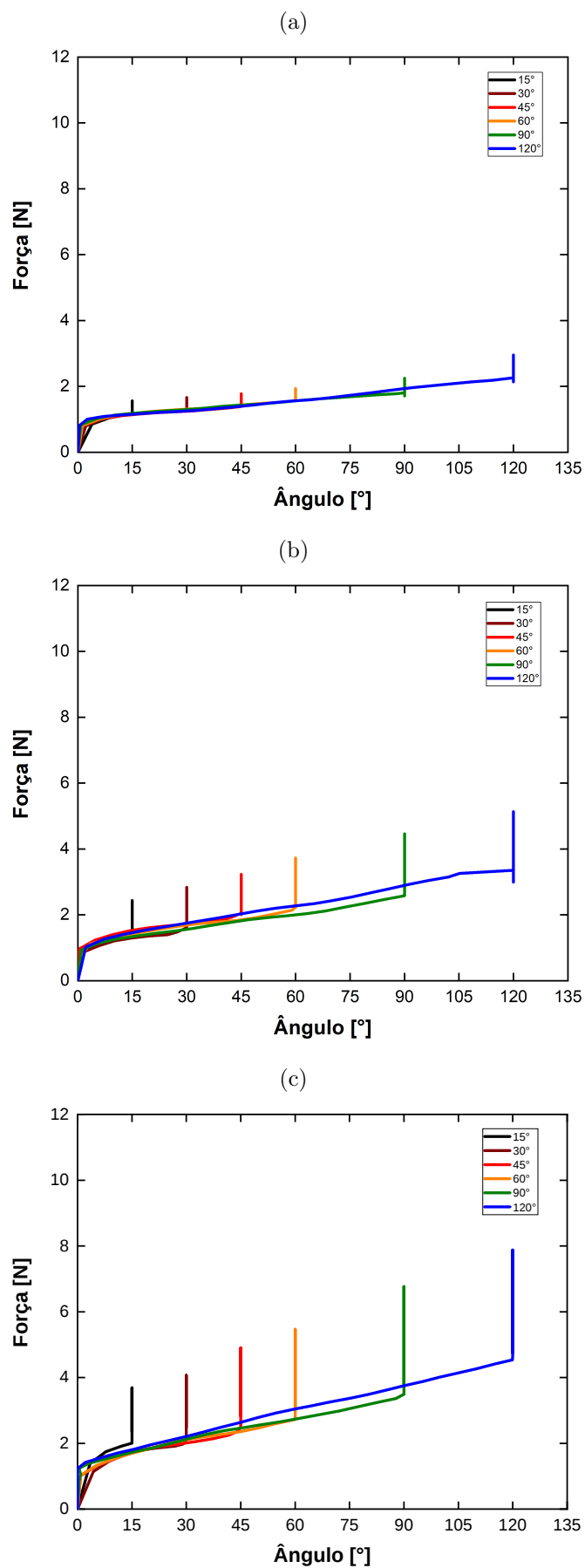


Figura 94 – Comportamento da força gerada por molas de torção de LMF NiTi do tipo M10 em função do ângulo: (a) 0,9 mm, (b) 1,2 mm e (c) 1,5 mm



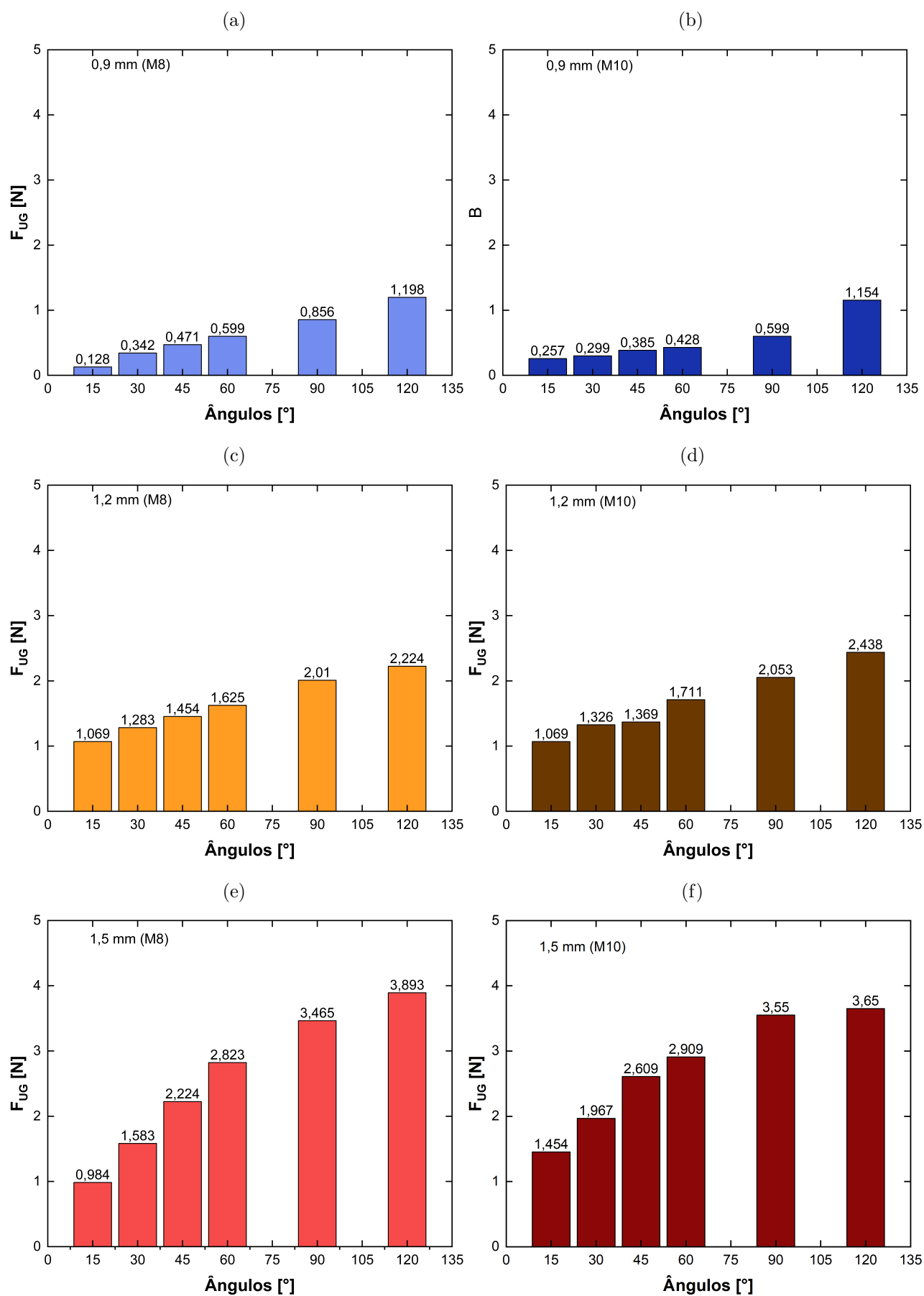
Uma primeira observação que pode ser feita é que a medida em que se eleva o deslocamento angular, conforme já esperado, maiores níveis de intensidade de força são encontrados. Como a indução de maiores índices de força é intimamente controlada por diversas variáveis geométricas, dentre elas o diâmetro do fio (d), afora diâmetro de espira (D) esse fato torna-se uma importante evidência da coerência no estudo empreendido, posto que diferentes graus de forças são coletados.

As molas de torção de LMF NiTi submetidas ao carregamento de torção experimentaram uma diminuição do raio das espiras por efeito da conformação da mola em torno do seu eixo imaginário, isto ocasiona máxima tensão de flexão na parte interna do fio. Por tais motivos, ocorrem as mudanças mencionadas, fortalecendo a hipótese de que houve, provavelmente, transformação de fase introduzida nessa região, ou seja, formação de martensita induzida por tensão. Este fato é evidenciado quantitativamente pelo aumento dos valores de F_{UG} , na maior parte dos casos, com o aumento do grau de deflexão em relação a condição inicial ($^{\circ} 0$). Neste sentido, a fim de tornar mais perceptível este parâmetro, nas Figuras 95a, 95b, 95c, 95d, 95e, 95f mostram em detalhes os valores F_{UG} para cada ângulo correspondente, sendo as molas divididas como antecipado em M8 e M10.

Ainda com relação as Figuras 95a, 95b, 95c, 95d, 95e e 95f citadas, é possível verificar que as molas membros da categoria M10, em linhas gerais, manifestam, mesmo que discretamente, maiores intensidades de força útil gerada em detrimento as participantes do grupo M8. Adicionalmente é interessante notar que a curva que representa o comportamento de geração de força da mola 1,5 mm (M8) exprimiua amplitudes de força maiores em torno de ângulos superiores a 90° , acompanhado de uma inclinação excessiva, embora essa variação não tenha ocorrido de forma linear. Sugere-se que esse fato seja resultado do efeito das molas de torção terem as espiras constantemente em contato, associando esta característica à conservação de volume que, por natureza, também se constata nestas molas, em contrapartida, é esperado que a rotação relativa das suas extremidades dê origem a um aumento considerável do atrito entre as espiras, especialmente para deslocamentos mais acentuados (MOTT; VAVREK; WANG, 2017; NORTON, 2013; WU; HSU, 1999).

Marginalmente ainda há outros fatores externos que influenciam no comportamento de geração de força observado, como cada um dos processos de memorização da forma e, analogamente, a própria quantidade de defeitos nas estruturas cristalina de cada fio.

Figura 95 – Força útil gerada para molas de torção de LMF NiTi



Fonte – Autoria Própria (2022)

A discussão apresentada permite inferir que, o diâmetro do fio de NiTi deve ser, ao que tudo indica, o maior possível para maximizar a força de recuperação. Não obstante, esse valor é delimitado pelo fato de que fios com diâmetros elevados são trabalhosos de conformar sobre o cilindro (barra roscada) e demandam mais potência elétrica para viabilizar o aquecimento. Por outro lado, diâmetros muito baixos disponibilizam forças baixas na proporção que conferem facilidade operativa.

Para complementar a discussão, embora as cargas e deformações envolvidas sejam diferentes levando a tempos de execução de movimentos distintos, isto pode ser contornado em futuros estudos, dado a necessidade de reprodução do comportamento mecânico via análise computacional, o que promoveria a especificação dos parâmetros necessários que se desejaria que o atuador dispusesse em uma determinada aplicação, de maneira precisa e em um curto espaço de tempo.

4.3 Testes de Acionamento do Leme

Uma vez construído o protótipo, o trabalho consistiu em exemplificar através de uma prova de conceito a capacidade de molas de torção de LMF, especificamente de 1,5 mm (M8), promoverem o funcionamento de um leme aeronáutico em uma tarefa prática real. Nesta etapa o protótipo experimentou acionamento com uma corrente de 5 A em cada umas das molas, verificando-se os deslocamentos angulares alcançados. Desta maneira, esta seção tem por objetivo apresentar os principais resultados experimentais. Por esse motivo, a estratégia assumida foi ordenar os resultados segundo quatro grupos, a saber:

- a) **Resposta unidirecional:** Nesta etapa foi observada a ação de molas individuais sobre o leme aeronáutico quando submetido a uma entrada degrau. Os ensaios foram realizados ao longo de duas direções longitudinais, ora trajetória de atuação referência-direita (mola direita), ora trajetória de atuação referência-esquerda (mola esquerda);
- b) **Resposta bidirecional:** O segundo teste compreendeu deslocar o leme de sua posição de referência até o seu limite lateral sob intervenção de uma mola de torção de LMF, em seguida, a mola oposta de LMF é responsável pela restituição a posição inicial, após acionamento. Este procedimento, também, foi repetido para o sentido contrário;

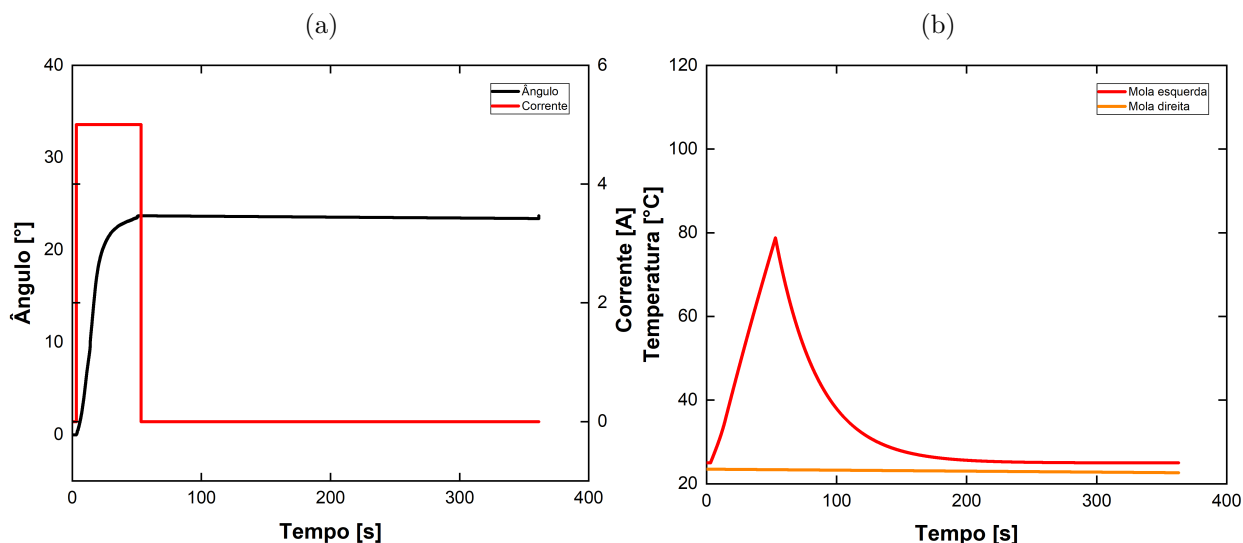
- c) **Resposta unidirecional com resfriamento forçado:** Nesta análise, o objetivo foi investigar efeito do suprimento de ar com fluxo contínuo por intermédio de um pequeno ventilador, utilizado para refrigerar as duas molas de torção de LMF. Especificamente para este caso, considerou-se um sistema auxiliar com intenção de melhorar o desempenho dinâmico do sistema, levando em conta a mesma movimentação executada no item a;
- d) **Resposta bidirecional com resfriamento forçado:** Depois da montagem de todos os elementos que compõem o sistema de resfriamento com ar forçado, passou-se a desenvolver experimentos com o intuito de analisar a resposta transiente empregando a mesma lógica experimental praticada no item b;

Resposta unidirecional

No primeiro grupo de testes foram examinados os deslocamentos longitudinais resultantes da ativação individual de cada mola, sem aplicação de qualquer sistema de controle (malha aberta). Assim, primeiramente, as Figuras 96a e 96b abaixo ilustram os resultados de resposta do leme representando a condição com deslocamento horizontal para esquerda. Um detalhe importante é que foram realizados um total de 2 ensaios na bancada de testes e para minimizar os erros encontrados durante a aquisição dos sinais, escolheu-se como resposta a média dos 2 sinais adquiridos, sendo esta prática seguida para os demais testes de acionamento.

Conforme observado, assim que a corrente foi ativada, o leme moveu-se para a trajetória desejada. A superfície móvel atingiu sua posição final após aproximadamente 52 segundos de um total de 360 segundos de experimento, conferindo um valor de curvatura de aproximadamente $23,71^\circ$, não rotacionado para uma outra posição de equilíbrio. Uma constatação bastante clara é que o leme não retornou ao ângulo inicial de 0° , isto é atribuído, propositalmente, ao mecanismo desenvolvido, posto que o mesmo exerce uma força capaz de impedir a extremidade da mola regresse ao seu estágio inicial.

Figura 96 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A

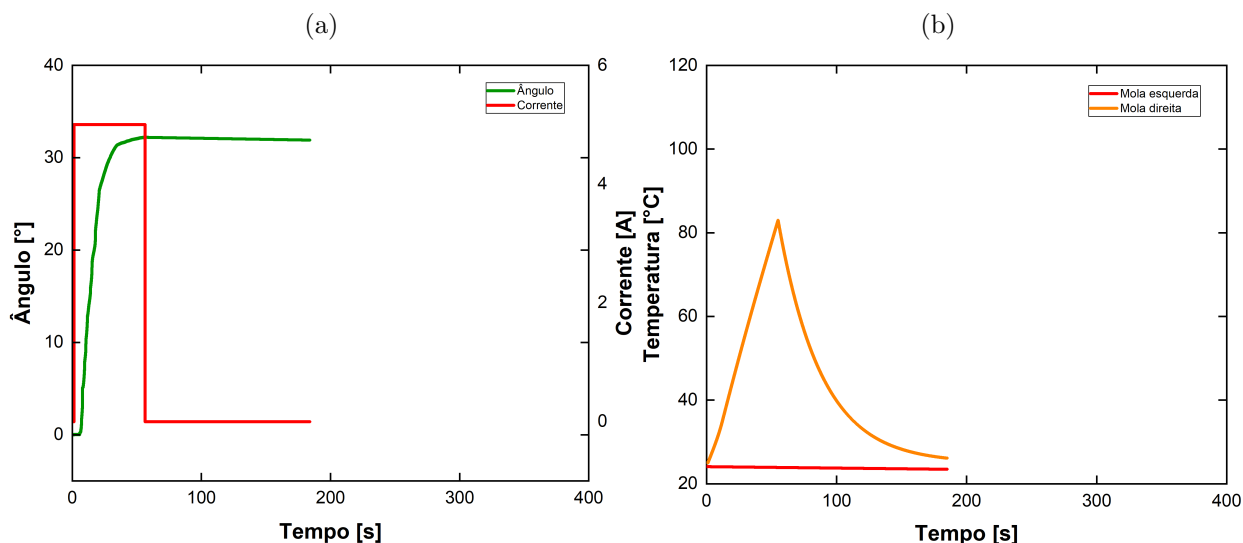


Fonte –Autoria Própria (2022)

Além dessas características e seguindo premissa experimentais relacionadas a perda de propriedades funcionais, não seria possível verificar se o protótipo atingiria posições mais extremas, a fim de evitar problemas de natureza estrutural oriundos da flexibilização do ABS ao atingir a temperatura de transição vítrea, suscitado por um aquecimento em demasia da mola. No geral, foram apontadas variações significativas de temperatura, decorrentes do deslocamento do leme em direção à esquerda, pois de antemão, sabia-se que um elemento seria ativado termicamente enquanto o outro permaneceria em repouso.

Esta análise seguiu a condição do teste anterior, porém, o sentido de movimento foi o oposto. Os gráficos de acionamento, exibidos nas Figuras 97a e 97b, refletem os resultados de resposta do leme quando considerado o cenário de deslocamento horizontal em direção à direita.

Figura 97 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A



Fonte –Autoria Própria (2022)

Em princípio, se esperava do sistema um desempenho muito similar a configuração tratada previamente, já que foram incorporados os mesmos procedimentos experimentais somado ao próprio posicionamento espacial para a mola de LMF, localizada a direita. Contudo ao analisar a Figura 97a, percebe-se a facilidade do sistema para alcançar a trajetória desejada, além disso, sucedeu-se um discreto aumento da curvatura para um valor próximo a $32,25^\circ$, enquadrado dentro de um intervalo de 50 segundos. Cabe dizer, da mesma forma, que foi contemplado para a movimentação a esquerda, não há movimento para outra posição de equilíbrio ao atingir o ângulo final demarcado.

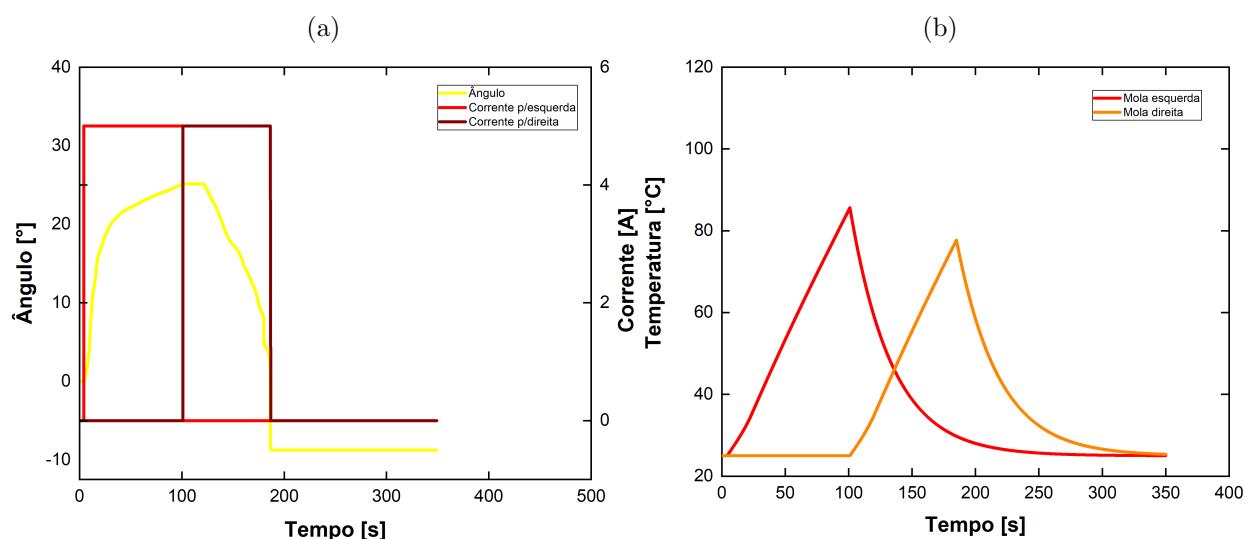
Resposta bidirecional

Esta subseção é dedicada aos resultados do sistema quando dois atuadores em configuração antagônica são utilizados. Um atuador é responsável pelo processo de deslocamento da estrutura (ora esquerda ora direita) enquanto o outro é incumbido pelo processo de retorno a posição de 0° , pois esta foi assumida como configuração de referência.

Neste caso em particular, ajustou-se a trajetória desejada no sistema, primeiramente, em direção à esquerda. Assim, o ângulo máximo rotacionado, em malha aberta, pelo leme foi da ordem de $25,16^\circ$, este valor corresponde a um intervalo de tempo de aproximadamente 100 segundos. Em seguida, ao ocorrer a troca de acionamento, alterada manualmente pelo

próprio usuário, a corrente é invertida de imediato para mola de torção oposta (direita), resultando em movimento posterior do sistema. Como consequência, foi possível perceber que as taxas de deslocamento foram distintas, uma vez que a mola ultrapassa a posição de referência em aproximadamente 85 segundos, isto é, houve diminuição no tempo necessário para descrever a mesma trajetória. É importante salientar que mesmo após a interrupção da corrente elétrica em valores próximos a referência, o leme discretamente atinge um deslocamento angular de cerca de $8,5^\circ$, já que não há qualquer limite que impeça essa ação. A Figura 98a apresenta o retrato dessa ação, ilustrando a aplicação do estímulo elétrico necessário frente à mudança de trajetória, conforme já mencionado na seção anterior.

Figura 98 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento esquerda-direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A



Fonte –Autoria Própria (2022)

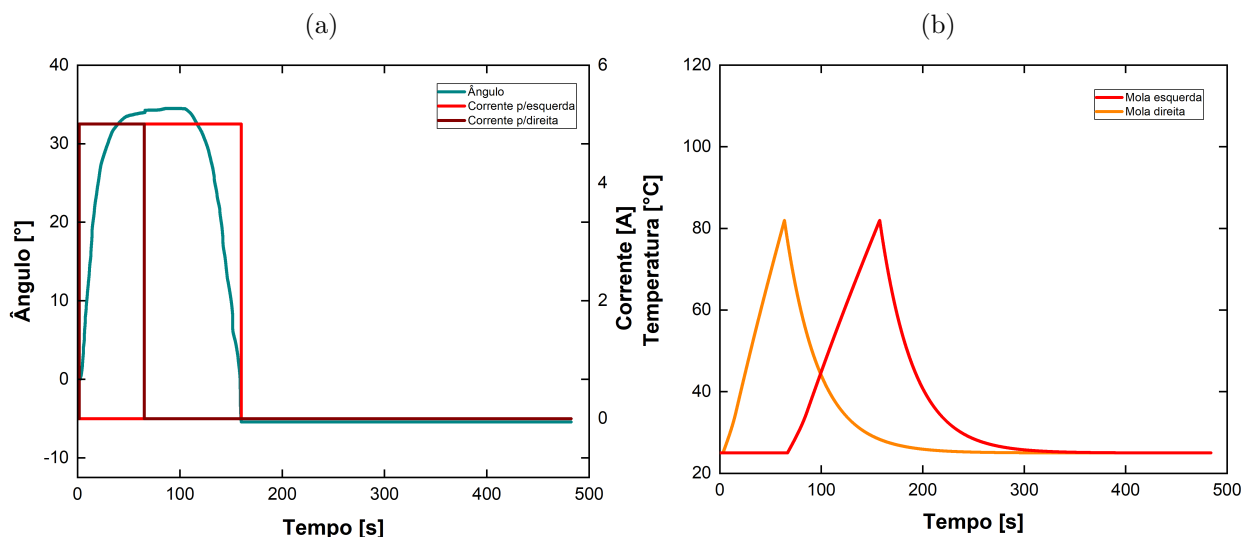
O comportamento deste gráfico relata a mudança de trajetória - esquerda e direita, no qual as discrepâncias introduzidas pela inércia térmica (relacionada ao acúmulo e posterior liberação de calor) sobre as molas de torção de LMF NiTi, interfere de maneira decisiva evidenciando uma certa defasagem no desempenho térmico de cada elemento ativo. Isso significa, portanto, que a força restauradora ocasionada pela mola da direita só passa a ser efetiva para movimentação do sistema na proporção que o aumento de sua rigidez superar a rigidez da mola esquerda, em resfriamento. Por hora cabe ainda dizer que, o mecanismo apresenta uma maior estabilidade posicional do lado direito, indicando

a existência de maiores restrições ao movimento nesta região, o que pode ser atribuído a uma maior rigidez devido a um ajuste assimétrico das molas de compensação estática.

A Figura 98b condensa, no sentido de facilitar a visualização, a evolução dos comportamentos térmicos de ambos atuadores ao longo de todo ensaio. É notório que as características das curvas de resposta vão ao encontro das constatações experimentais, apresentando no primeiro intervalo do ensaio uma maior corrente elétrica consumida nos momentos de troca de posição do atuador, e para tal, o sistema forneceu um fluxo maior de energia.

O experimento seguiu os procedimentos mencionados anteriormente. Na primeira etapa do ensaio, o sistema levou cerca de 65 segundos para transladar até a trajetória almejada, cerca de $34,5^\circ$. Na segunda fase do ensaio, ao inverter a trajetória, a ação executada conduziu o leme para a trajetória pretendida em aproximadamente 95 segundos. Após esse período, observou-se que, em pequena medida, o leme sofreu um pequeno deslocamento equivalente a $5,4^\circ$, que já era esperado devido a razões semelhantes às da situação anterior.

Figura 99 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento direita-esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A



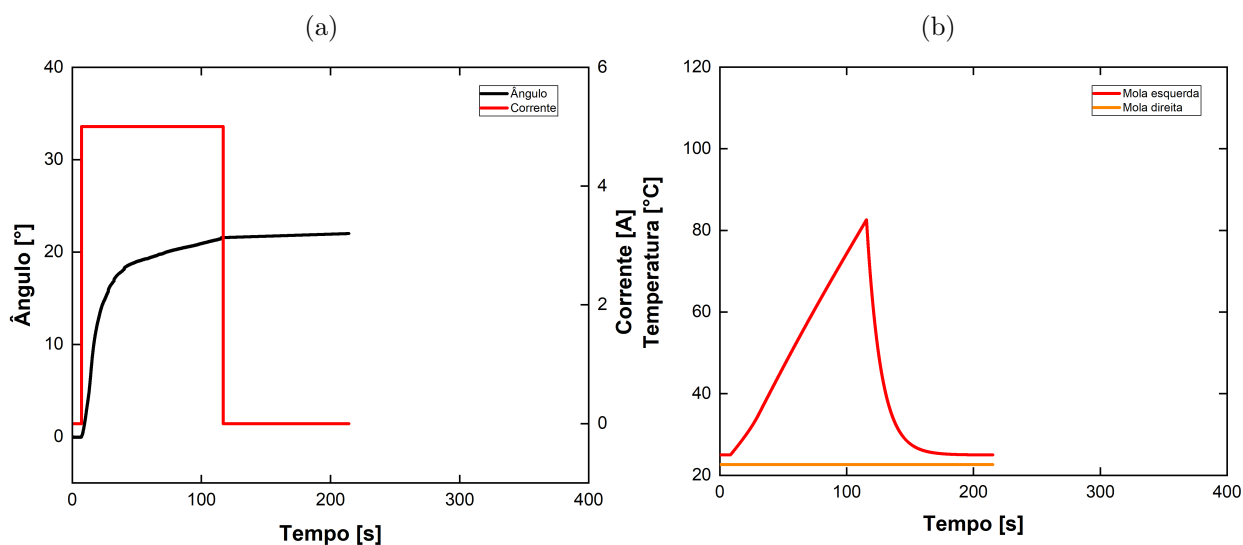
Fonte –Autoria Própria (2022)

Resposta unidirecional com resfriamento forçado

Esta seção engloba os resultados do sistema que emprega a abordagem de resfriamento forçado com deslocamento unilateral, em que apenas um atuador é responsável

pelo movimento da estrutura. Diferentemente dos casos reportados previamente, será acrescido um pequeno ventilador a estrutura descrita na seção 3.5, a fim de verificar a taxa de aquecimento e resfriamento do atuador, ou seja, a velocidade em que ocorrem as transformações de fase. Cabe dizer que os sistemas em apreço (aquecimento e resfriamento) não são dotados de qualquer lógica de controle e que esta ação foi incorporada com o objetivo de facilitar além de acelerar o desenvolvimento do trabalho. Estudos futuros pressupõe uma investigação do melhor controlador a ser implementado nesta circunstância. A Figura 100a exibe a resposta do sistema após o acionamento com deslocamento previsto para esquerda, enquanto a Figura 100b apresenta a evolução temporal da temperatura para cada atuador. Os valores citados a partir deste ponto são adquiridos pelos mesmos princípios assumidos para as situações sem resfriamento forçado.

Figura 100 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado



Fonte –Autoria Própria (2022)

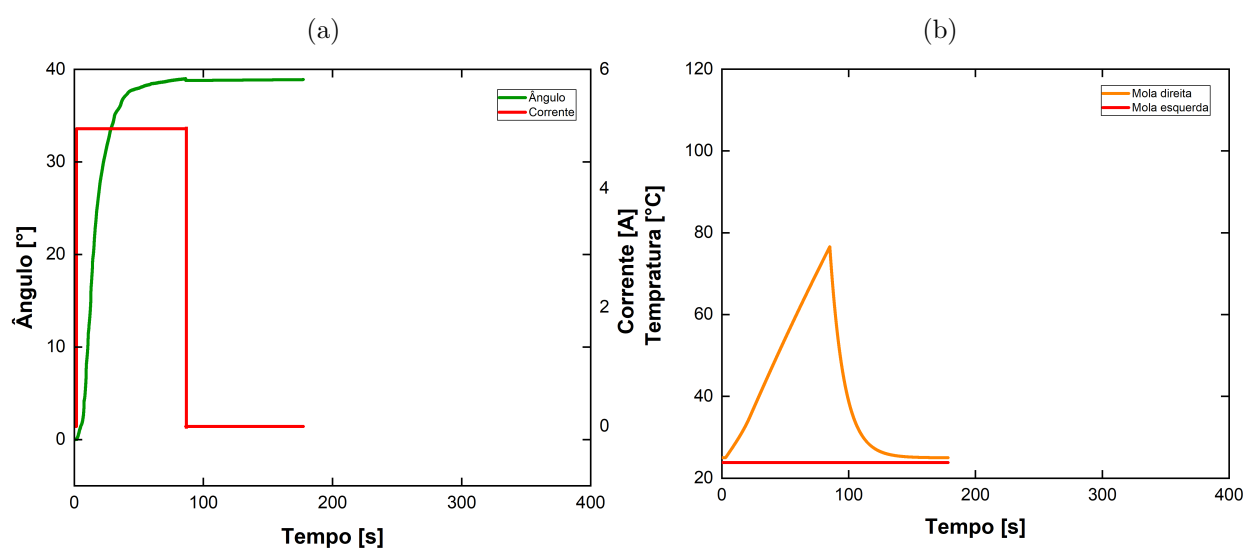
Neste caso, percebe-se uma situação semelhante àquela já exposta anteriormente para o aquecimento. Quando a fonte de alimentação é ativada, enviando um estímulo elétrico para a mola, isso se reflete diretamente no deslocamento do leme da posição de referência até a extrema esquerda mensurado em $21,89^\circ$, registrado em aproximadamente 116 segundos. Ao comparar com o aquecimento efetuado, analogamente, para o sistema sem resfriamento, percebe-se que, de maneira geral, o comportamento é similar, o que confirma a expectativa de uma faixa sem alterações significativas, conforme apresentado

na Figura 100b. Em relação às condições deste experimento a presença de resfriamento no ciclo (esquerda) explicitou o seguinte desfecho: um tempo de estabilização acima de 100 segundos. Além dessas constatações, é notável o aumento de desempenho do atuador em comparação aos tempos dos ciclos.

O uso de um dispositivo mecânico, como um ventilador, para aumentar a velocidade do ar, intensifica a turbulência o que leva a um aumento do coeficiente de convecção térmica. Isso sugere que uma maior velocidade do fluido durante a fase de aquecimento pode acelerar a transferência de energia e, portanto, aumentar o tempo de resposta do atuador nessa fase, marcadamente alterado por um tempo mais longo de passagem de corrente elétrica. No entanto, é importante mencionar que a geometria e as características operacionais do dispositivo podem ter um impacto significativo nesse parâmetro. Apesar de possíveis variações, é justo afirmar que essa técnica pode elevar a velocidade de resfriamento, mas com um custo de maior consumo de energia. Durante a fase de aquecimento, será necessário fornecer uma quantidade significativa de energia para compensar a perda excessiva e desordenada de calor que ocorreu.

Nas Figuras 101a e 101b, pode-se observar que um ensaio semelhante foi conduzido, porém com o deslocamento ocorrendo para a direita. Todas as outras variáveis foram mantidas idênticas ao experimento anterior, possibilitando a comparação do desempenho do atuador com os resultados apresentados na seção anterior.

Figura 101 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento à direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado



Fonte –Autoria Própria (2022)

De imediato, é possível identificar que o gráfico delineado na Figura 101a apresenta uma curva de trajetória com formato semelhante, com base na resposta eletromecânica reproduzida pelo atuador responsável pelo deslocamento para a esquerda. Por outro lado, constata-se que o ângulo de aproximadamente $38,79^\circ$ é atingido em um tempo de 88 segundos quando o posicionamento da superfície móvel é efetuado na direção oposta (referência/direita). Isso pode denotar que o sistema tem maior facilidade de movimento em um sentido (direita) e em contrapartida maior dificuldade em outro (esquerda), a explicação para tal resultado é a mesma discutida na seção anterior e se refere ao próprio mecanismo idealizado. Os perfis de temperatura das molas ao longo do experimento aparecem na Figura 101b.

Ao analisar o gráfico apresentado na Figura 101a, é importante destacar o tempo de estabilização de 91 segundos, ou seja, o intervalo entre a interrupção da corrente aplicada e a temperatura ambiente. Nessa situação, observa-se um ganho de desempenho mais significativo em comparação a outros intervalos de tempo, como por exemplo os 97 segundos observados no deslocamento à esquerda. Esse resultado pode ser explicado pela diferença na condutividade elétrica dos exemplares, uma vez que no processo de fabricação não foi possível controlar parâmetros metalúrgicos e pode ter influenciado mecanicamente como contribuído para que um exemplar possa ser mais favorecido que outro. É importante ressaltar que uma análise mais detalhada em um período mais longo seria necessária para confirmar essas evidências.

Resposta bidirecional com resfriamento forçado

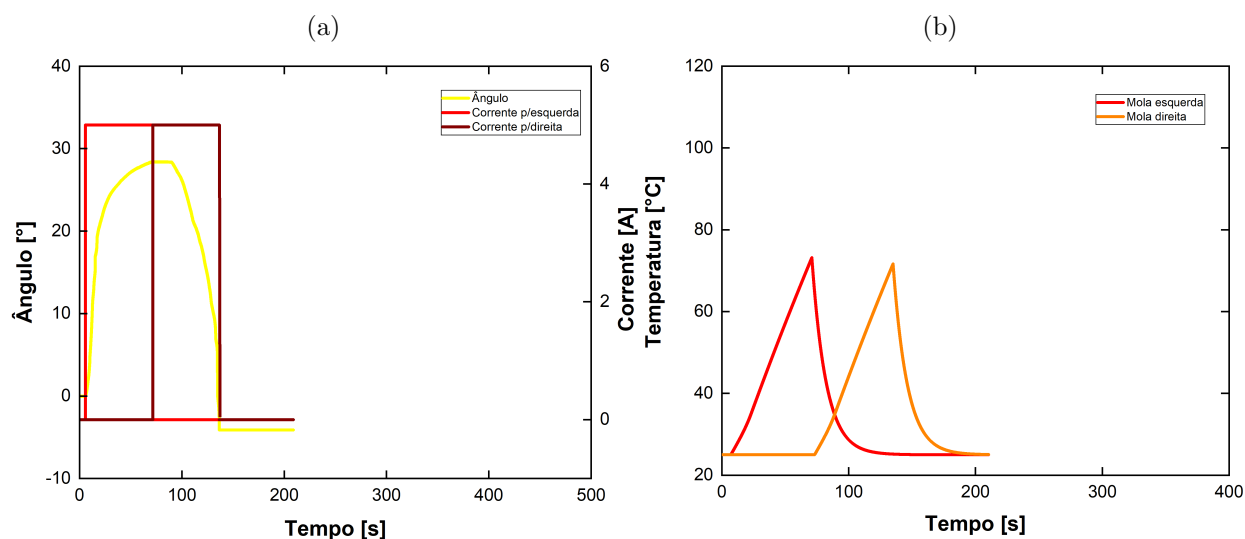
Por fim, esta seção é dedicada à apresentação das respostas para um sistema de resfriamento forçado implicando o cenário de movimento bidirecional. Inicialmente, os resultados são ilustrados nas Figuras 102a e 102b, em seguida, nas Figuras 103a e 103b.

A seção atual tem como objetivo apresentar os resultados do experimento que envolveu um sistema de resfriamento forçado e movimento bidirecional. Utilizando as mesmas configurações de deslocamento dos testes anteriores, os dados obtidos foram plotados graficamente e estão apresentados nas Figuras 102a e 102b, que mostram as curvas de resposta do leme em relação aos movimentos alternados para a esquerda e para a direita ao longo do tempo. Observa-se que, inicialmente, as trajetórias, principalmente os valores máximos, não apresentaram alterações significativas em função da adição do

resfriamento em comparação com o sistema sem resfriamento. É importante ressaltar que o mecanismo sofreu um desgaste acentuado em regiões específicas de seu corpo, o que pode ter afetado seu desempenho e aumentado a faixa angular. Durante o ensaio, foram obtidos valores máximos de deslocamento de $28,33^\circ$ para a esquerda e $4,20^\circ$ para a direita, fortalecendo a constatação revelada anteriormente.

Aos 70 segundos, ocorreu o ajuste de posição do atuador para a extrema esquerda e, logo em seguida, ao inverter o sentido da corrente, o sistema respondeu deslocando-se até manter a posição ajustada à direita, em cerca de 66 segundos. No entanto, como observado no ensaio anterior, torna-se ainda mais evidente a diferença na taxa média de deslocamento para cada direção. No caso do deslocamento esquerda-direita, o tempo de transição de uma posição para outra foi de aproximadamente 20 segundos. Portanto, esses resultados reforçam que o deslocamento está diretamente relacionado à intensidade do fluxo, afetando a rigidez (módulo elástico) e a mobilidade do sistema.

Figura 102 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento esquerda-direita e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado

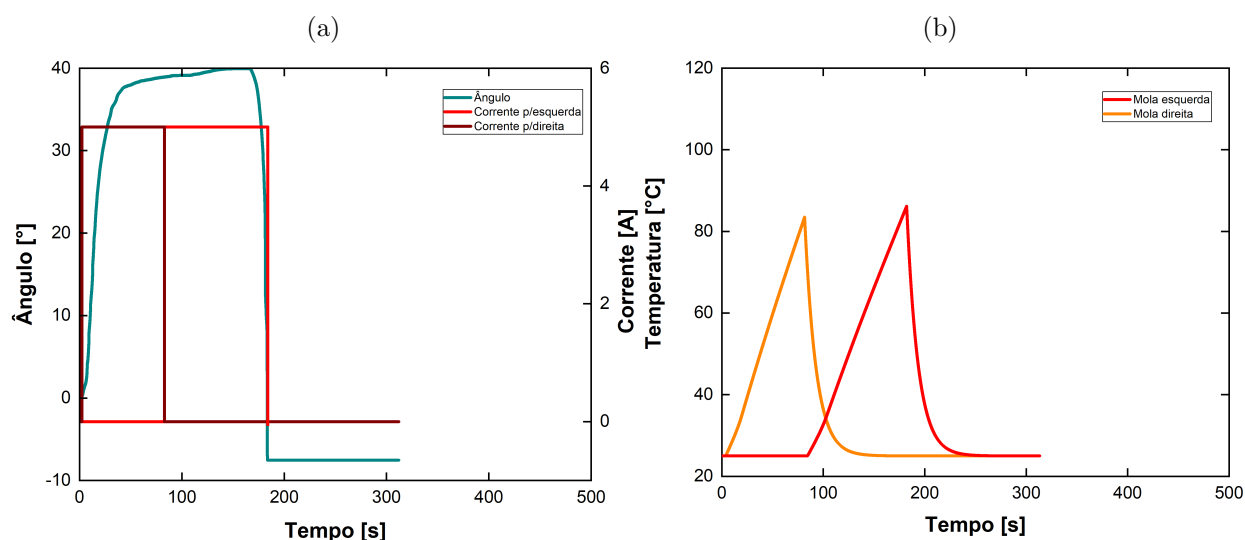


Fonte –Autoria Própria (2022)

Os parâmetros e seus respectivos valores utilizados neste experimento foram idênticos aos utilizados em testes anteriores. As Figuras 103a e 103b apresentam os mesmos resultados já mostrados nas Figuras 102a e 102b, respectivamente, mas são expostos de maneira a evidenciar e facilitar a comparação do efeito do deslocamento no sentido oposto. No primeiro intervalo do ensaio, a resposta do leme à mudança de trajetória (direita e esquerda)

requer um tempo de aproximadamente 84 segundos para atingir a posição, 39° . No segundo intervalo do ensaio (ênfase na Figura 103a), as constatações são as mesmas e o leme retornou a posição de referência em 100 segundos. Ao observar com atenção, após esse período pode-se notar que o sistema desloca-se mais 7° para a direita, isso prova claramente que o mecanismo sofreu acomodações devido ao constante uso.

Figura 103 – (a) Resposta temporal para o ângulo do leme construído para o deslocamento direita-esquerda e (b) Comportamento de temperatura de cada mola ativada por um pulso de corrente de 5 A, sob resfriamento forçado



Fonte –Autoria Própria (2022)

Como se tentou evidenciar, a análise de informações do protótipo depende totalmente de dados sobre o processo, por conseguinte a qualidade da análise é influenciada diretamente pela incerteza associada às medidas disponibilizadas pelos instrumentos. O desempenho do sistema em questão foi avaliado relacionando a performance de variáveis como baixo peso, consumo de energia, elevada capacidade de carga e de modo mais rigoroso trajetória e tempo de resposta, uma vez que estes parâmetros possuem uma forte influência no espectro de atuação do sistema. A unidade de atuação desenvolvida com molas de torção de LMF NiTi e acoplada ao leme aeronáutico apresenta características que se encontram dentro dos valores aceitáveis para esse tipo de aplicação. O protótipo é capaz de descrever trajetórias angulares no espectro de movimento de um leme (0 - 40°), conforme o projeto de aviões similares (GRITTI, 2004). Embora fosse desejável que todos os parâmetros estivessem próximos a diversas especificações, é compreensível que a maior diferença de desempenho,

principalmente em termos de tempo de resposta, possa ser solucionada com ajustes de projeto e consideração de novos parâmetros elétricos e mecânicos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Apresenta-se neste capítulo as principais conclusões arregimentadas e as perspectivas futuras do estudo realizado. As considerações serão agrupadas de acordo com as etapas exibidas em cada capítulo. Os desdobramentos do trabalho desenvolvido abarcam a continuidade e ao aprimoramento do uso de molas de torção de LMF NiTi e suas possíveis aplicações.

5.1 Conclusões

A presente pesquisa desenvolveu uma investigação sobre a fabricação, caracterização e teste de atuadores torcionais (mola helicoidal de torção) de LMF NiTi aplicado em um dispositivo do tipo leme aeronáutico. A partir das análises e dos resultados discutidos no decurso desta Tese, é possível estabelecer a priori as seguintes conclusões:

- A caracterização térmica via DSC ($-75\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$), dos fios adquiridos comercialmente evidenciaram que o fio de 0,9 mm exibiu na temperatura ambiente a fase austenítica como fase principal e temperatura A_f compatível com o comportamento superelástico, enquanto que os fios de 1,2 e 1,5 mm situaram-se em uma região de transição entre as transformações de fase austenítica e martensítica, indicando termoativação. Acrescido a isso, também, havia transformações de fase envolvendo a fase R na faixa de temperatura testada, em função dos baixos valores de entalpia de transformação e histerese de térmica;
- Os termogramas DSC dos fios após o procedimento termomecânico térmico (*shape-setting*) demonstraram que o processo de fabricação utilizado têm papel importante na produção de alterações nas temperaturas de transformação de fase devido à presença de carregamentos termomecânicos, resultando em aumento relevante das temperaturas críticas;
- Os ensaios monotônicos de tração revelaram que as três configurações de fios apresentaram comportamento tensão-deformação similares. Adicionalmente, o nível de tensão necessário para induzir a transformação da austenita para a martensita foi equivalente a cerca de 500 a 600 MPa, correspondendo a deformações da ordem de 6

a 8% aproximadamente. Em termos de funcionalidade, o fio de 0,9 mm manifestou tensão de patamar superelástico superior em relação aos demais;

- Os ensaios a temperaturas isotérmicas, expresso pelas curvas de tensão-deformação, comprovou a propriedade de SE e demonstrou que fios precursores de LMF NiTi de 0,9, 1,2, 1,5 mm encontravam-se preferencialmente no estado austenítico na temperatura acima de 40 °C. Além disso, no estado superelástico, os fios manifestaram a capacidade de elevar sua rigidez em função da temperatura, que pode ser denotado através de um aumento das tensões críticas para formação de martensita (incremento da fração volumétrica da austenita). Os fios de LMF NiTi apresentaram comportamento termomecânico equivalente, no que se refere a valores de deformação predominantemente próximos;
- As temperaturas de transformação de fase, verificadas por meio do RET, medidas ao longo da mola de torção de LMF NiTi não apresentaram diferenças substanciais, em confronto com os resultados arregimentados via DSC. Ademais, com os testes efetuados foi constatado que as molas se encontram em estado transitório, ou seja, uma mistura das fases martensítica e austenítica. Por conseguinte, as molas podem ser consideradas como termoativadas para a aplicação de interesse;
- Quanto à caracterização térmica via RET, observou-se que a intensificação da conformação mecânica seguida de tratamento térmico impactaram as temperaturas críticas de transformação, visto que houve tendência de elevação desta variável, ao passo que ocorreu o aumento no diâmetro de espira (mola), consequentemente os espécimes M10 dispuseram de valores mais elevados e maior variação de resistência que os exemplares M8;
- O levantamento de dados experimentais revela que as temperaturas de acionamento das molas assumem valores assintóticos para a mesma variação de corrente, simultaneamente, exibem boa concordância qualitativa com o formato das curvas descritas na literatura para esta situação. Além do que, confirmam que as taxas de elevação de temperatura foram significativamente mais elevadas à medida que o diâmetro de fio diminuiu. A condição de diâmetro de espira mostra ser um fator estatisticamente aleatório, cuja alterações nas temperaturas apresentaram um comportamento diferenciado, impossibilitando estabelecer uma correlação direta com este parâmetro;
- Os dados das curvas de geração de carga em função do ângulo, de um modo geral, indicaram que intensidade de força foi maior para as molas de configuração M8,

refletindo o equacionamento proposto para determinação da deflexão (angular) de molas de torção de fio redondo. Com relação à performance, a principal conclusão é que as molas da categoria M10 produziram níveis superiores F_{UG} para o intervalo de ângulos examinados, em confronto, logicamente, aos elementos correspondentes da categoria M8;

- A unidade de acionamento projetada e construída usando duas molas de torção de LMF NiTi, permitiu que uma configuração de referência se movesse ora para a direita ora para a esquerda. Os resultados experimentais mostraram ângulos da ordem 30° a esquerda e em contraposição 40° a esquerda, similares ao espectro de deslocamento de um leme real. Da observação dos resultados experimentais foi possível inferir que as molas de LMF independentemente de terem as mesmas características geométricas e localização espacial comportam-se mecanicamente de modo distinto, indicando a necessidade de investigação adicional, do ponto de vista estrutural. Complementarmente, foram identificadas deficiências no sistema devido à reduzida faixa dinâmica de operação causada pelo tempo excessivo para resfriar as molas. Em compensação, foi possível alcançar diferentes configurações com essa abordagem, dependendo de como o aquecimento é combinado entre os atuadores;
- Resultados dos ensaios de acionamento do sistema serviram de subsídio para modificar a metodologia existente, adicionando um mecanismo de resfriamento forçado por meio de fluxo de ar constante. Observou-se que o dispositivo de resfriamento melhorou o desempenho dos atuadores, aumentando sua faixa de operação em frequência, embora não de forma significativa. Outro ponto fundamental é que não houve alteração nas trajetórias finais alcançadas pelos atuadores, em comparação com o sistema projetado sem resfriamento forçado, que apresenta desempenho inferior, principalmente nessa faixa de operação.

Os resultados aqui logrados revelam, ainda que a proposta identificada pelo uso de atuadores baseado em molas de torção de LMF NiTi para movimentação de um leme não constitua uma solução tecnológica imediata, tanto a viabilidade técnica da solução registrada, como o grande potencial do emprego deste tipo de material com vistas à atuação em superfícies aeronáuticas, reforça a potencialidade do método que, dentro de certas restrições, proveu adequadamente o deslocamento almejado para o sistema. Em suma, é justo afirmar que este cenário se inverterá e dispositivos cada vez mais otimizados

despontem, na condição de redução de folgas mecânicas devido a problemas de fabricação e/ou montagem, além de novas formas destes atuadores e de seu controle, ou mesmo de novos mecanismos concebidos, sobretudo no intuito de produzir resultados mais próximos da realidade.

5.2 *Sugestões para trabalhos futuros*

Baseando-se nos elementos concentrados na revisão bibliográfica e nas contribuições alcançadas, é possível recomendar futuros estudos que possam ser apreciados/vislumbrados por pesquisadores na área de concentração deste trabalho. Assim sendo, têm-se como proposições:

- Determinar a influência de parâmetros como tempo, temperatura, diâmetro de fio e espira na fabricação por *shape-setting* para obtenção de molas de torção de LMF NiTi em regime de superelasticidade, na temperatura ambiente, por meio de análise fatorial (DOE);
- Caracterizar experimentalmente a influência do deslocamento angular sob a modificação da resistência elétrica em molas de torção de LMF;
- Efetuar múltiplos ensaios cíclicos de forma a obter a influência de parâmetros como a taxa de deformação e temperatura no formato obtido do diagrama tensão-deformação;
- Projetar, fabricar e testar molas de torção de LMF com seção transversal retangular;
- Elaborar uma formulação para mola de torção de LMF que prevê as não linearidades constitutivas e geométrica;
- Promover uma investigação numérica baseada no Método de Elementos Finitos (MEF) para estudar o comportamento de uma mola de torção de LMF NiTi, além de explorar o desempenho alcançado sob influência da alteração nos parâmetros da mola;
- Criar uma metodologia de análise dinâmica do mecanismo proposto incluindo a modelagem por elementos finitos, visando ainda possibilitar análises de mecanismos de geometrias mais complexas;
- Desenvolver um sistema de controle capaz de realizar o posicionamento acurado e rápido do atuador. Concomitantemente, propor aplicar o mesmo tipo de controlador

para realizar o controle de torque do atuador, de forma a comprovar a eficácia do mesmo em aplicações que exijam esforço controlado;

- Simular numericamente através de CFD o leme para avaliar quantitativamente a influência de diferentes deslocamentos angulares sobre parâmetros aerodinâmicos;
- Realizar ensaio em túnel de vento, para a verificação de parâmetros experimentais relacionados a dinâmica dos fluidos, somado a avaliação do desempenho do leme inteligente em face a necessidade de vencer as forças aerodinâmicas, durante a atuação.

REFERÊNCIAS¹

- ABBASCHIAN, R.; REED-HILL, R. E. *Physical Metallurgy Principles-SI Version*. [S.l.]: Cengage Learning, 2009. Citado na página 40.
- ANDRIANESIS, K.; TZES, A. Development and control of a multifunctional prosthetic hand with shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, Springer, v. 78, n. 2, p. 257–289, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.
- ANTONUCCI, V. et al. Electrical resistivity study and characterization during niti phase transformations. *thermochimica acta*, Elsevier, v. 462, n. 1-2, p. 64–69, 2007. Citado na página 121.
- ASL, F. J.; KADKHODAEI, M.; KARIMZADEH, F. The effects of shape-setting on transformation temperatures of pseudoelastic shape memory alloy springs. *Journal of Science: Advanced Materials and Devices*, Elsevier, v. 4, n. 4, p. 568–576, 2019. Citado na página 113.
- AURICCHIO, F. A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model. *International Journal of plasticity*, Elsevier, v. 17, n. 7, p. 971–990, 2001. Citado na página 167.
- AURICCHIO, F. et al. Sma numerical modeling versus experimental results: parameter identification and model prediction capabilities. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Springer, v. 18, n. 5, p. 649–654, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 167, 168 e 169.
- AURICCHIO, F.; PETRINI, L. A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformations: solution algorithm and boundary value problems. *International journal for numerical methods in engineering*, Wiley Online Library, v. 61, n. 6, p. 807–836, 2004. Citado na página 167.
- AZIZ, S.; SPINKS, G. M. Torsional artificial muscles. *Materials Horizons*, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 3, p. 667–693, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 35.
- BARBARINO, S. et al. A review on shape memory alloys with applications to morphing aircraft. *Smart materials and structures*, IOP Publishing, v. 23, n. 6, p. 063001, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 56.
- BASHEER, A. A. Advances in the smart materials applications in the aerospace industries. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Emerald Publishing Limited, v. 92, n. 7, p. 1027–1035, 2020. Citado na página 34.
- BENAFAN, O.; GAYDOSH, D. High temperature shape memory alloy ni50. 3ti29. 7hf20 torque tube actuators. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 26, n. 9, p. 095002, 2017. Citado na página 76.
- BENAFAN, O. et al. Recent advancements in rotary shape memory alloy actuators for aeronautics. *Shape Memory and Superelasticity*, Springer, v. 5, n. 4, p. 415–428, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 77.

¹ De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6023.

BHANDARI, B.; LEE, G.-Y.; AHN, S.-H. A review on ipmc material as actuators and sensors: fabrications, characteristics and applications. *International journal of precision engineering and manufacturing*, Springer, v. 13, n. 1, p. 141–163, 2012. Citado na página 50.

BRAVO, M. C. C. *Desenvolvimento de um atuador torcional usando liga NiTi com efeito de memória de forma*. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 62 e 63.

BROWN, A. *Mechanical springs*. [S.l.]: Design Council, the British Standards Institution, and the Council of . . . , 1981. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 90.

CARPENTER, B.; LYONS, J. Lightweight flexible solar array experiment. *NASA/GSFC EO-1 Technology Validation Report*, v. 8, 2001. Citado na página 59.

CASATI, R.; VEDANI, M.; TUISSI, A. Thermal cycling of stress-induced martensite for high-performance shape memory effect. *Scripta Materialia*, Elsevier, v. 80, p. 13–16, 2014. Citado na página 33.

CHOUDHARY, N.; KAUR, D. Shape memory alloy thin films and heterostructures for mems applications: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 242, p. 162–181, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 49.

COLLINS, J. A.; BUSBY, H. R.; STAAB, G. H. *Mechanical design of machine elements and machines: a failure prevention perspective*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009. Citado na página 160.

COSTANZA, G.; TATA, M. E. Shape memory alloys for aerospace, recent developments, and new applications: A short review. *Materials*, MDPI, v. 13, n. 8, p. 1856, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 56.

CRAWLEY, E. F. Intelligent structures for aerospace—a technology overview and assessment. *AIAA journal*, v. 32, n. 8, p. 1689–1699, 1994. Citado na página 39.

CZECHOWICZ, A.; LANGBEIN, S. *Shape memory alloy valves: Basics, potentials, design*. [S.l.]: Springer, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 43, 45 e 112.

DAVIDSON, F. M.; LIANG, C.; LOBITZ, D. W. Investigation of torsional shape memory alloy actuators. In: SPIE. *Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems*. [S.l.], 1996. v. 2717, p. 672–682. Citado na página 75.

DILIBAL, S.; TABANLI, R. M.; DIKICIOGLU, A. Development of shape memory actuated ito robot hand and its mine clearance compatibility. *Journal of Materials Processing Technology*, Elsevier, v. 155, p. 1390–1394, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 59 e 60.

DUERIG, T. W.; MELTON, K.; STÖCKEL, D. *Engineering aspects of shape memory alloys*. [S.l.]: Butterworth-heinemann, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 40.

EGGELER, G. et al. Structural and functional fatigue of niti shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 378, n. 1-2, p. 24–33, 2004. Citado na página 31.

ELAHINIA, M. H. *Shape memory alloy actuators: design, fabrication, and experimental evaluation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 31, 40 e 42.

ELAHINIA, M. H.; ASHRAFIUON, H. Nonlinear control of a shape memory alloy actuated manipulator. *J. Vib. Acoust.*, v. 124, n. 4, p. 566–575, 2002. Citado na página 31.

EMILIAVACA, A. et al. Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 28, n. 1, p. 015010, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 33, 48 e 57.

FERRO, L. E. D. C. Desenvolvimento de um quirodáctilo de membro superior ativado por liga com memória de forma. 2018. Citado 3 vezes nas páginas 33, 73 e 74.

FOLLADOR, M. et al. A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 21, n. 11, p. 115029, 2012. Citado 3 vezes nas páginas 52, 91 e 92.

FUMAGALLI, L.; BUTERA, F.; CODA, A. Smartflex® niti wires for shape memory actuators. *Journal of materials engineering and performance*, Springer, v. 18, n. 5, p. 691–695, 2009. Citado na página 31.

FURST, S. J.; BUNGET, G.; SEELECKE, S. Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 22, n. 1, p. 014011, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 60 e 61.

GANDHI, M. V.; THOMPSON, B. *Smart materials and structures*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1992. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

GANGIL, N.; SIDDIQUEE, A. N.; MAHESHWARI, S. Towards applications, processing and advancements in shape memory alloy and its composites. *Journal of Manufacturing Processes*, Elsevier, v. 59, p. 205–222, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 55.

GANTZ, F. et al. Aerospace, energy recovery, and medical applications: Shape memory alloy case studies for casmart 3rd student design challenge. *Shape Memory and Superelasticity*, Springer, p. 1–18, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 71 e 72.

GAO, F.; DENG, H.; ZHANG, Y. Hybrid actuator combining shape memory alloy with dc motor for prosthetic fingers. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 223, p. 40–48, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

GIONES, F.; BREM, A. From toys to tools: The co-evolution of technological and entrepreneurial developments in the drone industry. *Business Horizons*, Elsevier, v. 60, n. 6, p. 875–884, 2017. Citado na página 34.

GLÜCKSBERG, A.; SOUL, H.; YAWNY, A. Releasing systems for aerospace industry based upon shape memory alloys: characterization of materials for actuators. *Matéria (Rio de Janeiro)*, SciELO Brasil, v. 23, 2018. Citado na página 33.

GONZÁLEZ, M. P. V.; GARCÍA-MARTÍNEZ, M.; MURO, A. P. Study of a torsion spring fracture. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 98, p. 150–155, 2019. Citado na página 32.

GRITTI, M. Especificação da arquitetura e análise de desempenho de um sistema de leme. 2004. Citado 2 vezes nas páginas 143 e 170.

GUO, Z. et al. Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 225, p. 71–80, 2015. Citado na página 71.

HAGA, Y. et al. Medical and welfare applications of shape memory alloy microcoil actuators. *Smart materials and structures*, IOP Publishing, v. 14, n. 5, p. S266, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.

HARTL, D. J.; LAGOUDAS, D. C. Characterization and 3-d modeling of ni60ti sma for actuation of a variable geometry jet engine chevron. In: SPIE. *Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems 2007*. [S.l.], 2007. v. 6529, p. 1212–1223. Citado 3 vezes nas páginas 30, 56 e 58.

HASAN, M. M.; BAXEVANIS, T. Structural fatigue and fracture of shape memory alloy actuators: Current status and perspectives. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 33, n. 12, p. 1475–1486, 2022. Citado na página 31.

HEIDARI, B. et al. Fabrication and modeling of shape memory alloy springs. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 25, n. 12, p. 125003, 2016. Citado 3 vezes nas páginas 91, 92 e 113.

HMEDE, R.; CHAPELLE, F.; LAPUSTA, Y. Review of neural network modeling of shape memory alloys. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 15, p. 5610, 2022. Citado na página 31.

HU, K.; RABENOROSOA, K.; OUISSE, M. A review of sma-based actuators for bidirectional rotational motion: application to origami robots. *Frontiers in Robotics and AI*, Frontiers Media SA, v. 8, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 62.

HUANG, W. Shape memory alloys and their application to actuators for deployable structures. 1998. Citado 3 vezes nas páginas 31, 51 e 52.

HUANG, W. On the selection of shape memory alloys for actuators. *Materials & design*, Elsevier, v. 23, n. 1, p. 11–19, 2002. Citado na página 31.

HUMBEECK, J. V. Non-medical applications of shape memory alloys. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 273, p. 134–148, 1999. Citado na página 31.

HUMBEECK, J. V. Shape memory alloys: a material and a technology. *Advanced engineering materials*, Wiley Online Library, v. 3, n. 11, p. 837–850, 2001. Citado na página 49.

ICARDI, U.; FERRERO, L. Preliminary study of an adaptive wing with shape memory alloy torsion actuators. *Materials & Design*, Elsevier, v. 30, n. 10, p. 4200–4210, 2009. Citado na página 76.

JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A. Designing shape memory alloy linear actuators: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 13, p. 1699–1718, 2017. Citado na página 31.

JANI, J. M. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design (1980-2015)*, Elsevier, v. 56, p. 1078–1113, 2014. Citado 6 vezes nas páginas 31, 36, 39, 49, 50 e 59.

JARDINE, A. P.; BARTLEY-CHO, J. D.; FLANAGAN, J. S. Improved design and performance of the sma torque tube for the darpa smart wing program. In: SPIE. *Smart Structures and Materials 1999: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. [S.l.], 1999. v. 3674, p. 260–269. Citado na página 76.

JARDINE, A. P. et al. Shape memory alloy tini actuators for twist control of smart wing designs. In: SPIE. *Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems*. [S.l.], 1996. v. 2717, p. 160–165. Citado na página 75.

KEEFE, A. C.; CARMAN, G. P. Thermo-mechanical characterization of shape memory alloy torque tube actuators. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 9, n. 5, p. 665, 2000. Citado na página 76.

KHALIL-ALLAFI, J. et al. On the influence of heterogeneous precipitation on martensitic transformations in a ni-rich niti shape memory alloy. *Materials Science and Engineering: A*, Elsevier, v. 378, n. 1-2, p. 148–151, 2004. Citado na página 113.

KIM, C. et al. Shape memory alloy actuator-embedded smart clothes for ankle assistance. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 29, n. 5, p. 055003, 2020. Citado na página 30.

KIM, Y. et al. Bidirectional rotating actuators using shape memory alloy wires. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 295, p. 512–522, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 67 e 68.

KIM, Y. S.; SONG, Y. J.; JEON, E. S. Numerical and experimental analysis of torsion springs using nurbs curves. *Applied Sciences*, MDPI, v. 10, n. 7, p. 2629, 2020. Citado na página 32.

KOH, J.-s.; KIM, S.-r.; CHO, K.-j. Self-folding origami using torsion shape memory alloy wire actuators. In: AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*. [S.l.], 2014. v. 46377, p. V05BT08A043. Citado 2 vezes nas páginas 77 e 78.

KOHL, M. *Shape memory microactuators*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2004. Citado na página 30.

LAGOUDAS, D. C. *Shape memory alloys: modeling and engineering applications*. [S.l.]: Springer, 2008. Citado 4 vezes nas páginas 30, 40, 42 e 113.

LECCE, L. et al. *Shape memory alloy engineering: for aerospace, structural and biomedical applications*. [S.l.]: Elsevier, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 44.

LEO, D. J. *Engineering analysis of smart material systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

LIANG, C. et al. Applications of torsional shape memory alloy actuators for active rotor blade control: opportunities and limitations. In: SPIE. *Smart Structures and Materials 1996: Smart Structures and Integrated Systems*. [S.l.], 1996. v. 2717, p. 91–100. Citado na página 75.

LILLO, L. D. *A matrix converter drive system for an aircraft rudder electro-mechanical actuator*. Tese (Doutorado) — University of Nottingham, 2006. Citado na página 171.

LOBITZ, D. W. et al. Shape control of solar collectors using torsional shape memory alloy actuators. In: SPIE. *Smart Structures and Materials 1996: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. [S.l.], 1996. v. 2721, p. 394–403. Citado na página 75.

LOEWY, R. G. Recent developments in smart structures with aeronautical applications. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 6, n. 5, p. R11, 1997. Citado na página 30.

MACHADO, L.; SAVI, M. Medical applications of shape memory alloys. *Brazilian journal of medical and biological research*, SciELO Brasil, v. 36, p. 683–691, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 55.

MATSUMOTO, H. Electrical resistivity of niti with high transformation temperature. *Journal of alloys and compounds*, Elsevier, v. 370, n. 1-2, p. 244–248, 2004. Citado na página 121.

MAVROIDIS, C. Development of advanced actuators using shape memory alloys and electrorheological fluids. *Journal of Research in Nondestructive Evaluation*, Taylor & Francis, v. 14, n. 1, p. 1–32, 2002. Citado na página 31.

MCWILLIAMS, A. Smart materials and their applications: technologies and global markets. *BCC Research Advanced Materials Report*, Business Communications Co. Norwalk, CT, v. 161, 2011. Citado na página 33.

MEHTA, K.; GUPTA, K. *Fabrication and processing of shape memory alloys*. [S.l.]: Springer, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 49.

MIRVAKILI, S. M.; HUNTER, I. W. A torsional artificial muscle from twisted nitinol microwire. In: SPIE. *Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2017*. [S.l.], 2017. v. 10163, p. 122–128. Citado na página 66.

MIZIOKA, L. S. *Modelagem e análise de desempenho do servo atuador do sistema do leme de uma aeronave sob variação de temperatura*. Tese (Doutorado) — Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2009. Citado na página 170.

MOTT, R. L.; VAVREK, E. M.; WANG, J. *Machine Elements in Mechanical Design: Machi Eleme Mecha Desig PDF_2d*. [S.l.]: Pearson Education, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 90, 131 e 161.

NATIONAL. *Datasheet cDAQ 9174*. 2022. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/cdaq-9174-specs/page/specs.html>. Acesso em: 01/11/2022. Citado na página 100.

NATIONAL. *Datasheet NI 9201*. 2022. <https://www.ni.com/pt-br/support/model.ni-9201.html>. Acesso em: 01/11/2022. Citado na página 100.

NATIONAL. *Datasheet NI 9213*. 2022. <https://www.ni.com/pt-br/support/model.ni-9213.html>. Acesso em: 01/11/2022. Citado na página 100.

NATIONAL. *Datasheet NI 9263*. 2022. <https://www.ni.com/docs/en-US/bundle/ni-9213-specs/page/overview.html>. Acesso em: 01/11/2022. Citado na página 100.

NESPOLI, A. et al. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 158, n. 1, p. 149–160, 2010. Citado na página 31.

NORTON, R. L. *Projeto de máquinas*. [S.l.]: bookman editora, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 32, 90 e 131.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. *Shape memory materials*. [S.l.]: Cambridge university press, 1999. Citado 6 vezes nas páginas 30, 40, 43, 116, 119 e 120.

PAIK, J. K.; HAWKES, E.; WOOD, R. J. A novel low-profile shape memory alloy torsional actuator. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 19, n. 12, p. 125014, 2010. Citado 2 vezes nas páginas 78 e 79.

PAIK, J. K.; WOOD, R. J. A bidirectional shape memory alloy folding actuator. *Smart materials and structures*, IOP Publishing, v. 21, n. 6, p. 065013, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 79 e 80.

PETRINI, L.; MIGLIAVACCA, F. Biomedical applications of shape memory alloys. *Journal of Metallurgy*, Hindawi, v. 2011, 2011. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 55.

PRAHLAD, H.; CHOPRA, I. Modeling and experimental characterization of sma torsional actuators. *Journal of intelligent material systems and structures*, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 18, n. 1, p. 29–38, 2007. Citado na página 75.

RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. *Design of shape memory alloy (SMA) actuators*. [S.l.]: Springer, 2015. v. 3. Citado 3 vezes nas páginas 31, 46 e 91.

REYNAERTS, D.; BRUSSEL, H. V. Design aspects of shape memory actuators. *Mechatronics*, Elsevier, v. 8, n. 6, p. 635–656, 1998. Citado na página 31.

REYNAERTS, D.; PEIRS, J.; BRUSSEL, H. V. An implantable drug-delivery system based on shape memory alloy micro-actuation. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 61, n. 1-3, p. 455–462, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 53 e 54.

RISCADO, M. S. Projeto estrutural e definição de processos de fabricação de um leme aeronáutico em material compósito. 2004. Citado 3 vezes nas páginas 170, 171 e 173.

RODRIGUE, H. et al. Effect of twist morphing wing segment on aerodynamic performance of uav. *Journal of Mechanical Science and Technology*, Springer, v. 30, n. 1, p. 229–236, 2016. Citado na página 59.

RODRIGUE, H. et al. An overview of shape memory alloy-coupled actuators and robots. *Soft robotics*, Mary Ann Liebert, Inc. 140 Huguenot Street, 3rd Floor New Rochelle, NY 10801 USA, v. 4, n. 1, p. 3–15, 2017. Citado na página 30.

ROGERS, C. A. Intelligent materials. *Scientific American*, JSTOR, v. 273, n. 3, p. 154–161, 1995. Citado na página 39.

ROSKAM, J. *Airplane Design: Part IV: Layout of Landing Gear and Systems*. [S.l.]: DAR Corporation, 2004. Citado na página 171.

RUTH, D. J. S. et al. Control aspects of shape memory alloys in robotics applications: A review over the last decade. *Sensors*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 22, n. 13, p. 4860, 2022. Citado na página 30.

SALERNO, M. et al. Anchoring frame for intra-abdominal surgery. *The International Journal of Robotics Research*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 32, n. 3, p. 360–370, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 32, 69 e 70.

SANSONE, M. et al. Understanding shape memory alloy torsional actuators: From the conceptual to the preliminary design. In: MDPI. *Actuators*. [S.l.], 2022. v. 11, n. 3, p. 81. Citado na página 32.

SANTOS, A. R. Concepção e avaliação experimental de aerofólios com variação de arqueamento utilizando molas torcionais com efeito memória de forma. 2019. Citado na página 74.

SHAW, J. A. et al. Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: part 1—differential scanning calorimetry and basic phenomena. Blackwell Publishing Inc, 2008. Citado na página 87.

SHENG, J.; DESAI, J. P. Design, modeling and characterization of a novel meso-scale sma-actuated torsion actuator. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 24, n. 10, p. 105005, 2015. Citado 5 vezes nas páginas 32, 70, 71, 91 e 92.

SHIM, J.-E. et al. A smart soft actuator using a single shape memory alloy for twisting actuation. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 24, n. 12, p. 125033, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 64 e 65.

SHIN, B. H. et al. A modular torsional actuator using shape memory alloy wires. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 27, n. 12, p. 1658–1665, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 65 e 66.

SHREEKRISHNA, S.; NACHIMUTHU, R.; NAIR, V. S. A review on shape memory alloys and their prominence in automotive technology. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, p. 1045389X221111547, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 34.

SILVA, R. S. *Análise da morfagem de winglets utilizando ligas com memória de forma*. Tese (Doutorado) — Tese de Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018. Citado 5 vezes nas páginas 32, 56, 57, 72 e 73.

SOBCZYK, M. et al. Smart materials in architecture for actuator and sensor applications: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 33, n. 3, p. 379–399, 2022. Citado na página 29.

SOBRINHO, J. M. et al. Experimental and numerical analyses of a rotary motor using shape memory alloy mini springs. *Sensors and Actuators A: Physical*, Elsevier, v. 302, p. 111823, 2020. Citado na página 33.

SOHN, J. W. et al. Application of shape memory alloy actuators to vibration and motion control of structural systems: A review. *Applied Sciences*, MDPI, v. 13, n. 2, p. 995, 2023. Citado na página 30.

SONG, G. Design and control of a nitinol wire actuated rotary servo. *Smart materials and Structures*, IOP Publishing, v. 16, n. 5, p. 1796, 2007. Citado 3 vezes nas páginas 61, 62 e 63.

SOUZA, A. C.; MAMIYA, E. N.; ZOUAIN, N. Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, Elsevier, v. 17, n. 5, p. 789–806, 1998. Citado 4 vezes nas páginas 164, 165, 166 e 167.

SREEKUMAR, M. et al. Critical review of current trends in shape memory alloy actuators for intelligent robots. *Industrial Robot: An International Journal*, Emerald Group Publishing Limited, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 59.

SRIVASTAVA, R. et al. Shape memory alloy-based wearables: a review, and conceptual frameworks on hci and hri in industry 4.0. *Sensors*, MDPI, v. 22, n. 18, p. 6802, 2022. Citado na página 30.

STOECKEL, D. Fabrication and properties of nickel–titanium shape memory alloy wires. In: *58 th Annual Convention of the Wire Association International*. [S.l.: s.n.], 1988. p. 69–75. Citado na página 49.

STOECKEL, D. Shape memory actuators for automotive applications. *Materials & Design*, Elsevier, v. 11, n. 6, p. 302–307, 1990. Citado na página 30.

STROUD, H.; HARTL, D. Shape memory alloy torsional actuators: a review of applications, experimental investigations, modeling, and design. *Smart Materials and Structures*, IOP Publishing, v. 29, n. 11, p. 113001, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 77.

SUN, J. et al. Morphing aircraft based on smart materials and structures: A state-of-the-art review. *Journal of Intelligent material systems and structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 27, n. 17, p. 2289–2312, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

TEH, Y. H. et al. *Fast, accurate force and position control of shape memory alloy actuators*. [S.l.]: Citeseer, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 42.

TOBUSHI, H. et al. Torsional deformation characteristics of tini sma tape and application to rotary actuator. *Journal of Alloys and Compounds*, Elsevier, v. 577, p. S745–S748, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 68 e 69.

TRIFKOVIC, D. et al. Failure analysis of the combat jet aircraft rudder shaft. *Engineering failure analysis*, Elsevier, v. 18, n. 8, p. 1998–2007, 2011. Citado na página 172.

WADOOD, A. Brief overview on nitinol as biomaterial. *Advances in Materials Science and Engineering*, Hindawi, v. 2016, 2016. Citado na página 49.

WOLFE, T.; FAULKNER, M.; WOLFAARDT, J. Development of a shape memory alloy actuator for a robotic eye prosthesis. *Smart materials and structures*, IOP Publishing, v. 14, n. 4, p. 759, 2005. Citado 2 vezes nas páginas 54 e 55.

WU, M.; HSU, W. Investigation of torsion springs by considering the friction and the end effect. 1999. Citado na página 131.

YAN, X.; HUANG, D.; ZHANG, X. Note: A novel curvature-driven shape memory alloy torsional actuator. *Review of Scientific Instruments*, American Institute of Physics, v. 85, n. 12, p. 126109, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 64.

YOSHIDA, E. et al. Miniaturized self-reconfigurable system using shape memory alloy. In: IEEE. *Proceedings 1999 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Human and Environment Friendly Robots with High Intelligence and Emotional Quotients (Cat. No. 99CH36289)*. [S.l.], 1999. v. 3, p. 1579–1585. Citado 3 vezes nas páginas 32, 68 e 69.

YUAN, H. et al. A review of rotary actuators based on shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 28, n. 14, p. 1863–1885, 2017. Citado na página 32.

ZAINAL, M. A.; SAHLAN, S.; ALI, M. S. M. Micromachined shape-memory-alloy microactuators and their application in biomedical devices. *Micromachines*, MDPI, v. 6, n. 7, p. 879–901, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 55.

ZAREIE, S. et al. Recent advances in the applications of shape memory alloys in civil infrastructures: A review. In: ELSEVIER. *Structures*. [S.l.], 2020. v. 27, p. 1535–1550. Citado na página 30.

ZHAKYPOV, Z.; HUANG, J.-L.; PAIK, J. A novel torsional shape memory alloy actuator: Modeling, characterization, and control. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, IEEE, v. 23, n. 3, p. 65–74, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 80 e 81.

ZHANG, P. et al. Fatigue failure analysis and finite element assessment of the twins torsion spring. *Engineering Failure Analysis*, Elsevier, v. 122, p. 105187, 2021. Citado na página 32.

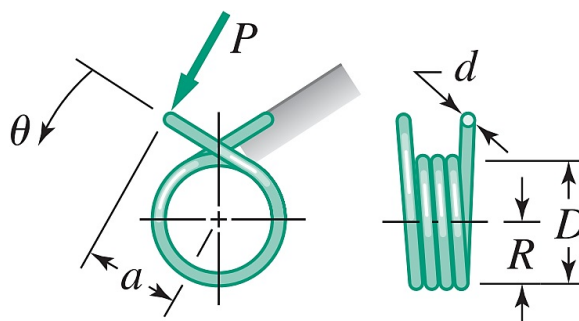
ANEXO A – Molas de torção de espiras helicoidais

Para o dimensionamento de molas de torção é necessário para o projetista entender e utilizar apropriadamente a teoria físico-mecânica a fim de que possa especificar ou projetar a peça corretamente. Entender as variáveis, que norteiam o projeto deste elemento (molas de torção) será discutido a seguir, em maiores detalhes.

Introdução

As molas são componentes mecânicos projetados para exercer forças (tração ou compressão), ou torque, além de absorverem energia, que em geral é armazenada e posteriormente liberada. Quando uma mola de espiras helicoidais é sujeita à torção de extremidade, neste caso é conhecida como mola de torção. A Figura 104 mostra de forma esquemática a geometria básica deste tipo de mola.

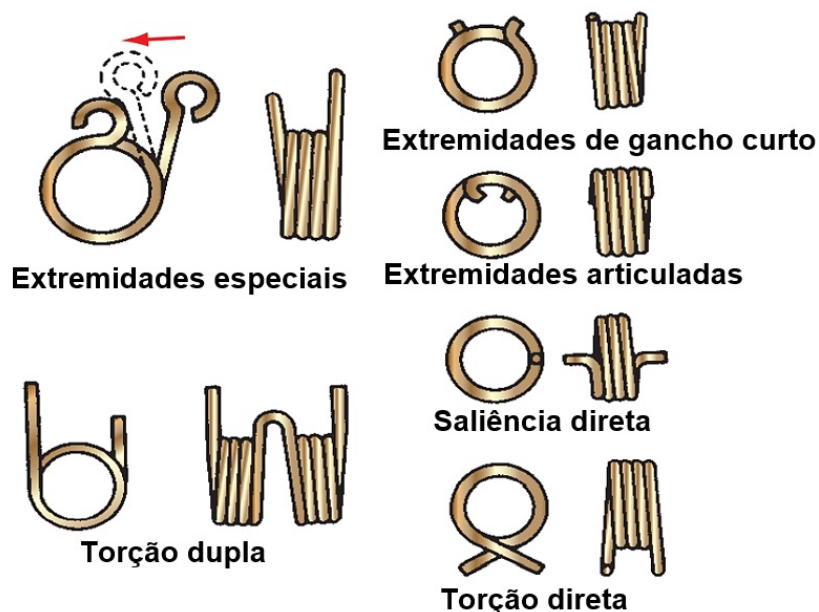
Figura 104 – Representação de uma mola helicoidal torcional genérica e seus principais parâmetros



Fonte – Collins, Busby e Staab (2009)

As espiras localizadas nas extremidades são prolongadas tangencialmente de modo a proporcionar braços sobre os quais o momento pode ser aplicado. Existem espiras de extremidade com diversas formas geométricas destinadas a cada finalidade, conforme é apresentado na Figura 105. Geralmente, as espiras são enroladas próximas umas às outras, como observado em uma mola de extensão, no entanto com tração inicial desprezível. As espiras também podem ser enroladas com um passo que separe somente as espiras de corpo, e isso impedirá a fricção entre elas. Apesar dessa possibilidade, a maior parte das molas de torção é de espiras próximas.

Figura 105 – Representação exemplificando a variedade de configuração de molas torcionais



Fonte – Adaptado de Mott, Vavrek e Wang (2017)

O momento aplicado às espiras coloca cada seção do fio em regime de flexão como no caso de uma viga curva. O carregamento aplicado deve sempre ser efetuado de forma a fechar as espiras em vez de abri-las, uma vez que uma sobrecarga que cause escoamento produz tensões residuais que são favoráveis aos futuros carregamentos no mesmo sentido e desfavoráveis aos futuros carregamentos no sentido oposto.

Molas de torção são em geral utilizadas com uma haste ou eixo para absorver as forças reativas quando as extremidades não puderem ser embutidas. Convém ressaltar que, deve ser tomado cuidado de tal maneira que a barra não deve ser maior em diâmetro, que cerca de 90% do menor diâmetro interno das espiras quando enroladas sob carga, a fim de evitar vinculações de espiras.

O modo em flexão na espira poderia requerer fios de seção transversal quadrada ou retangular devido a eficiência maior eficiência em termos de rigidez por unidade de volume, porém os fios seção transversal circular são utilizados com maior frequência, pois geralmente dispõem de maior variedade de tamanhos e materiais, além de serem mais econômicos.

As molas de torção são familiares em uma ampla variedade de aplicações, desde prendedores de roupas, cortinas de janelas, portas de armários, além de armadilhas para animais, todos associadas a utilidades domésticas. Outros proveitos abrangem mecanismos

de precisão (acionamento de relógios e brinquedos), interruptores e temporizadores, suspensão de tanques militares, contrapeso em elementos de máquinas montados em placa articulada e uma diversidade de outros componentes de máquinas.

Número de espiras em molas de torção

O número de espiras ativas, N_a , é composto de uma combinação do número de voltas ao corpo, N_b , mais alguma contribuição das extremidades à medida que são submetidas à flexão. Para extremidades retas, a contribuição pode ser expressa como um número equivalente de espiras N_e :

$$N_e = \frac{L_1 + L_2}{3\pi D} \quad (2)$$

onde L_1 e L_2 são os comprimentos dos prolongamentos respectivos às tangentes de extremidade das espiras. O número de espiras ativas é então:

$$N_a = N_b + N_e \quad (3)$$

Deflexão de molas de torção

A deflexão ou deslocamento angular de vigas submetidas a uma flexão pura é frequentemente expresso em radianos, entretanto é usualmente convertido em revoluções (voltas). A equação abaixo descreve esta relação

$$\theta = \frac{ML_w}{EI} \quad (4)$$

onde M é o momento aplicado, L_w é o comprimento do fio, E o módulo de elasticidade para o material utilizado na mola e I o segundo momento de área para a seção transversal com relação ao eixo neutro.

Para molas de torção com fio de seção transversal circular, pode-se substituir a geometria adequada e ser calculado de acordo com a equação.

$$\theta = \frac{1}{2\pi} \frac{M (\pi D N_a)}{E (\pi D^4 / 64)} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{10,2MDN_a}{d^4E} \quad (6)$$

Dados de ensaios experimentais revelam que o efeito do atrito entre as espiras e o eixo é preconizado de tal modo que a constante 10,2 é normalmente aumentada para 10,8 e pode ser equacionado conforme

$$\theta = \frac{10,8MDN_a}{d^4E} \quad (7)$$

A constante de mola, k , pode ser expressa como torque por volta a partir da fórmula de deflexão e é igual a

$$k = \frac{M}{\theta} = \frac{d^4E}{10,8DN_a} \quad (8)$$

A tensão de flexão é esforço preponderante presente nos fios em uma mola torcional, com um momento fletor M sendo aplicado para o deslocamento angular das suas extremidades. A análise de tensões atuantes em vigas curvas, é aplicável a este tipo de mola. Desta maneira, Wahl, em sua principal publicação, derivou o fator de concentração de tensão para a parte interna de um fio de espira circular em flexão, obtendo

$$K_i = \frac{4C^2 - C - 1}{4C(C - 1)} \quad (9)$$

Compete lembrar, que outro fator para o dimensionamento das molas é o índice de curvatura, C , este fator é razão entre o diâmetro de espira, D , e o diâmetro do fio d . E está envolvido com a estabilidade da mesma, sendo uma medida da curvatura da espira. A equação apresenta a fórmula matemática para o cálculo deste índice.

$$C = \frac{D}{d} \quad (10)$$

Por fim, a tensão de flexão máxima ocorre na superfície interna do arame (de forma a fechar suas espiras) e é igual

$$Arame/circular : \frac{I}{C} = \frac{\pi d^3}{32}, \sigma = \frac{32MK_{i,circ}}{\pi d^3} \quad (11)$$

$$Arame/retangular : \frac{I}{C} = \frac{bh^2}{6}, \sigma = \frac{6MK_{i,ret}}{bh^2} \quad (12)$$

ANEXO B – Modelo constitutivo para a modelagem de LMF

De modo a compreender o material em estudo neste trabalho, bem como suas capacidades e limitações, esta seção tem por objetivo uma breve conceituação sobre a modelagem constitutiva de LMF. Atenção especial é dada a formulação do modelo de Souza–Auricchio e que pode posteriormente ser empregada em uma simulação numérica no *software* de elementos finitos *Ansys*.

Modelo constitutivo

As LMF são conhecidas, dentre os materiais inteligentes, por suas aplicações fundamentadas em propriedades termomecânicas, onde o seu comportamento envolvendo o acoplamento entre fenômenos térmicos, de transformação de fase e mecânicos. Levando em consideração o alto grau de complexidade para a simulação do comportamento das LMF devido os fatores mencionados, a adoção de um modelo constitutivo apropriado irá influenciar claramente na confiabilidade da simulação.

Nas últimas décadas, vários grupos de pesquisa desenvolveram modelos matemáticos com o intuito de prever o comportamento observado em LMF adequadamente. O comportamento termomecânico das LMF pode ser modelado, comumente, de vários pontos de vista, a saber: microscópico, mesoscópico e macroscópico. A abordagem microscópica é voltada para a descrição do comportamento das LMF levando em conta somente aspectos microestruturais da liga, como nucleação de fase, movimento de interfaces e o crescimento da martensita geminada. A abordagem mesoscópica utiliza a micromecânica para descrever o comportamento nas escalas micro ou meso. No caso da abordagem macroscópica, esta é baseada nas características fenomenológicas, que incluem a termodinâmica do contínuo com as variáveis de estado internas, considerando as modificações microestruturais devido às transformações de fase.

O modelo macro fenomenológico 3D termomecânico para transformações de fase induzidas por tensão proposto por Souza, Mamiya e Zouain (1998) é elaborado a partir da teoria da termodinâmica de meios contínuos com variáveis internas, segundo a qual o estado de um ponto material de um sólido é determinado pelos valores do tensor das deformações, da temperatura e de um conjunto de variáveis internas em um dado instante

de tempo. Dentro da estrutura da termodinâmica irreversível clássica, o modelo é capaz de exibir todas as características primárias no que se refere às LMF em um estado 3D de tensão. O potencial de energia livre de Helmholtz, ψ , proposto no trabalho de Souza, Mamiya e Zouain (1998) pode ser escrito na forma:

$$\psi(\theta, \epsilon, \epsilon^{tr}, T) = \frac{1k\theta^2}{2} + G \|\epsilon - \epsilon^{tr}\|^2 + \tau_M(T) \|\epsilon^{tr}\| + \frac{h}{2} \|\epsilon^{tr}\|^2 + j_{\epsilon L}(\epsilon^{tr}) \quad (13)$$

onde ϵ é a deformação e ϵ^{tr} é a deformação de transformação, K e G denotam os módulos de compressão e cisalhamento do material, $\|\cdot\|$ representa a norma de Frobenius de um tensor, $\tau_M(T)$ é uma função com valores positivos e que aumenta de forma monotônica com a temperatura, essa função é definida como $\tau_M(T) = \beta \langle T - M_f \rangle$ onde o símbolo $\langle \cdot \rangle$ representa os colchetes de Macaulay com a temperatura, β é um parâmetro do material que relaciona as tensões características de transformação de fase com a temperatura, T é a temperatura ambiente, M_f é a temperatura de referência para o estado livre de deformações na ausência de tensões aplicadas, h é um parâmetro de endurecimento do material durante a transformação de fase e $j_{\epsilon L}$ é uma restrição introduzida para satisfazer a norma da transformação de deformação, representada por:

$$j_{\epsilon L}(\epsilon^{tr}) = \begin{cases} 0, se \|\epsilon^{tr}\| \leq \epsilon_L \\ +\infty, se \|\epsilon^{tr}\| > \epsilon_L \end{cases} \quad (14)$$

Seguindo os argumentos clássicos, é possível calcular as quantidades termodinamicamente conjugadas aos componentes da deformação volumétrico e desviatório, ϵ e θ , e a deformação de transformação, ϵ^{tr} . De tal forma pode ser modelada com as equações:

$$p = \frac{\partial \psi}{\partial \theta} = K\theta \quad (15)$$

$$\mathbf{s} = \frac{\partial \psi}{\partial \epsilon} = 2G(\epsilon - \epsilon^{tr}) \quad (16)$$

$$\mathbf{X} = -\frac{\partial \psi}{\partial \epsilon^{tr}} = \mathbf{s} - \mathbf{a} \quad (17)$$

na qual $\mathbf{X}$ é a tensão termodinâmica associada à deformação de transformação ϵ^{tr} , pode-se definir :

$$\alpha = [\tau_M(T) + h \|\epsilon^{\text{tr}}\| + \gamma] \frac{\epsilon^{\text{tr}}}{\|\epsilon^{\text{tr}}\|} \quad (18)$$

a variável γ presente na expressão de $\mathbf{X}$ surge da diferenciação da função indicatriz $\partial J_{\epsilon_L}(\epsilon^{\text{tr}})$ em relação ϵ^{tr} e é dada por:

$$\begin{cases} \gamma = 0, 0 < \|\epsilon^{\text{tr}}\| < \epsilon_L \\ \gamma \geq 0, \|\epsilon^{\text{tr}}\| = \epsilon_L \end{cases} \quad (19)$$

Considerando a obtenção de uma lei de evolução para a deformação de transformação, ϵ^{tr} , Souza, Mamiya e Zouain (1998) introduziram pseudopotencial de dissipação, como mostra a Equação 8

$$\Phi(\epsilon^{\text{tr}}) = R \|\dot{\epsilon}^{\text{tr}}\| \quad (20)$$

onde R é o raio do domínio elástico e controla a largura do laço histerético, combinado com uma lei de evolução complementar escrito na forma:

$$X \in \partial \Phi \dot{\epsilon}^{\text{tr}} \quad (21)$$

Para controlar a evolução da variável interna ϵ^{tr} , ma função limite é introduzida:

$$F(X) = \|\mathbf{X}\| - \mathbf{R} \leq 0 \quad (22)$$

A evolução da variável interna ϵ^{tr} vale:

$$\dot{\epsilon}^{\text{tr}} = \dot{\xi} \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{X}} = \xi \frac{\mathbf{X}}{\|\mathbf{X}\|} \quad (23)$$

As condições de Kuhn-Trucker devem ser satisfeitas, tal que:

$$\begin{cases} \xi \geq 0 \\ F(\mathbf{x}) \leq 0 \\ \xi F(\mathbf{x}) = 0 \end{cases} \quad (24)$$

onde $\dot{\xi}$ é a fração volumétrica da fase martensítica durante a transformação de fase.

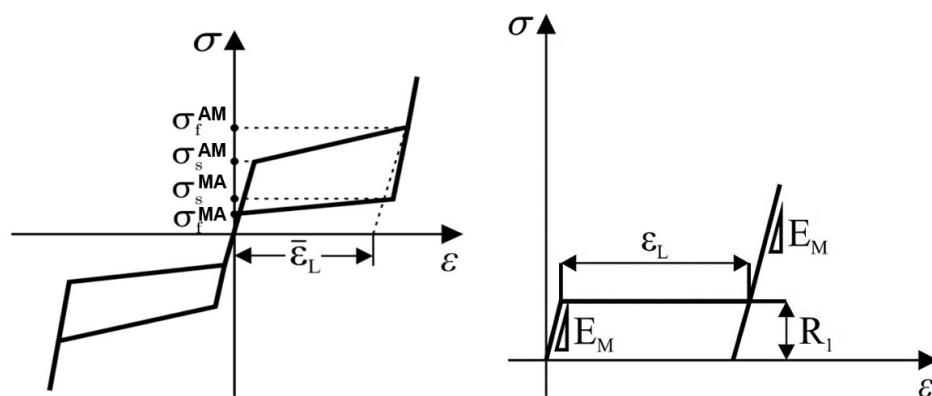
Parâmetros do modelo constitutivo

Os modelos constitutivos utilizados no *software Ansys* para caracterizar os principais efeitos termomecânico está baseado, em primeiro momento, no modelo proposto por

Auricchio (2001) para representar o regime SE, em um estado de tensão uniaxial. E para o estudo do EMF emprega-se o modelo macro fenomenológico 3D termomecânico para transformações de fase induzidas por tensão proposto Souza, Mamiya e Zouain (1998) e modificado por Auricchio e Petrini (2004).

A implementação do modelo constitutivo no *Ansys* está associada a definição de parâmetros (AURICCHIO et al., 2009) obtidos experimentalmente. A seguir, a Figura 106 apresenta as curvas tensão-deformação idealizadas para os comportamentos termomecânicos das LMF.

Figura 106 – Representação gráfica dos parâmetros do material exigidos pelo modelo constitutivo em uma curva tensão-deformação correspondente ao comportamento SE, à esquerda, e EMF, à direita



Fonte – Adaptado de Auricchio et al. (2009)

Os Quadros 2 e 3 apresentam as propriedades mecânicas obtidas de modo experimental, necessárias para se caracterizar o comportamento SE e EMF em uma LMF, conforme os modelos dispostos anteriormente.

Os módulos de elasticidade da austenita e martensita são determinados de forma experimental por meio do cálculo do coeficiente angular do diagrama tensão versus deformação, $E_A = E_M = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon}$. Em isothermas a $T \leq M_f$ e $T \geq A_f$, se adquire os módulos elásticos austenítico e martensítico, respectivamente. Outras técnicas de caracterização podem ser empregadas para a obtenção destes parâmetros, como a Análise Dinâmica Mecânica (DMA) e micro dureza. O coeficiente de Poisson do material, ν , é avaliado para as duas fases, martensita e austenita.

O coeficiente de influência de tensão β é mensurado experimentalmente através do cálculo do coeficiente angular da curva da tensão com respeito a temperatura, $\beta = \frac{\Delta\sigma}{\Delta T}$.

Quadro 2 – Descrição das propriedades mecânicas para o EMF de acordo com o modelo Souza– Auricchio

Parâmetros	Descrição
E_A (MPa)	Módulo de Young da austenita
E_M (MPa)	Módulo de Young da martensita
R (MPa)	Raio do domínio elástico
ν	Coefficiente de Poisson
ϵ_L	Máxima deformação de transformação
h (MPa)	Parâmetro de endurecimento
β (MPa/K)	Parâmetro de escala da temperatura
T_0 (K)	Temperatura de referência
m	Parâmetro de Lode

Fonte – Auricchio et al. (2009)

Quadro 3 – Descrição das propriedades mecânicas para o SE de acordo com o modelo Souza– Auricchio

Parâmetros	Descrição
E_A (MPa))	Módulo de Young da austenita
σ_s^{AM} (MPa)	Tensão de início da transformação direta
σ_f^{AM} (MPa)	Tensão final da transformação direta
σ_s^{MA} (MPa)	Tensão de início transformação reversa
σ_f^{MA} (MPa)	Tensão final da transformação reversa
ϵ_L	Máxima deformação de transformação
α	Parâmetro de diferenciação entre carregamento sob tração e compressão

Fonte – Auricchio et al. (2009)

Tal parâmetro correlaciona as tensões características de transformação de fase com a temperatura, segundo a Lei de Clausius-Clapeyron. O modelo considera $\beta = C_A = C_M$.

O parâmetro de endurecimento h é quantificado ao longo das transformações de fase direta ou reversa, por meio do cálculo do coeficiente angular da curva tensão versus deformação, especificamente nos patamares de tensão das transformações de fase, isto é, entre σ_s^{AM} e σ_f^{AM} , ou entre, σ_s^{MA} e σ_f^{MA} . Especificamente, o valor de $h = 0$ representa um patamar plano.

A máxima deformação de transformação ϵ_L pode ser obtida pela diferença entre os valores da deformação total no final (σ_f^{AM}) e no início da transformação martensítica (σ_s^{AM}).

O raio elástico R é calculado como metade da histerese mecânica a altas temperaturas ($T > T_0$), como detalhado por Auricchio et al. (2009), em outras palavras:

$$R = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\sigma_f^{AM} - \sigma_s^{MA}}{2}} \quad (25)$$

Uma forma alternativa para exprimir o valor do raio elástico é segundo a expressão:

$$R = \beta \left(\frac{A_f - M_s}{2} \right) \quad (26)$$

A determinação da temperatura de referência T_0 passa pelo diagrama tensão versus temperatura, como apresentado por Auricchio et al. (2009). Coletando os termos em T_0 , vem:

$$T_0 = A_f - \frac{R}{\beta} \quad (27)$$

Por último, o parâmetro de dependência de Lode controla a assimetria do comportamento mecânico da LMF entre tração/compressão por meio das tensões características de transformação de fase. Um valor de $m = 0$ corresponde a um comportamento simétrico, sob tração e compressão. O parâmetro de Lode m pode ser escrito na forma:

$$m = \sqrt{\frac{27}{2} \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sigma_c + \sigma_t}} \quad (28)$$

onde σ_t e σ_c são as tensões axiais críticas em tração e compressão, respectivamente.

ANEXO C – Sistemas de controle de voo

Esta seção dedica-se a apresentar uma breve discussão acerca de sistema de controle de uma aeronave, com destaque individual para a superfície aerodinâmica denominada de leme.

Considerações iniciais

O primeiro sistema de controle de voo empregado na história da aviação acredita-se que remonte ao século XVIII, quando um mecanismo para comando do movimento de guinada (*yaw*) e controle de arfagem (*pitch*) foi utilizado em um balão, a partir de um leme de navio. Foi o passo inicial para o surgimento do "leme horizontal" ou profundor, como é conhecido hoje, visando o controle de altitude. Os primeiros sistemas de controle eram totalmente mecânicos. A atuação e a transmissão da entrada do piloto/copiloto até a superfície de comandos eram realizadas por meio de cabos, polias, hastes de comandos e guinhóis (GRITTI, 2004).

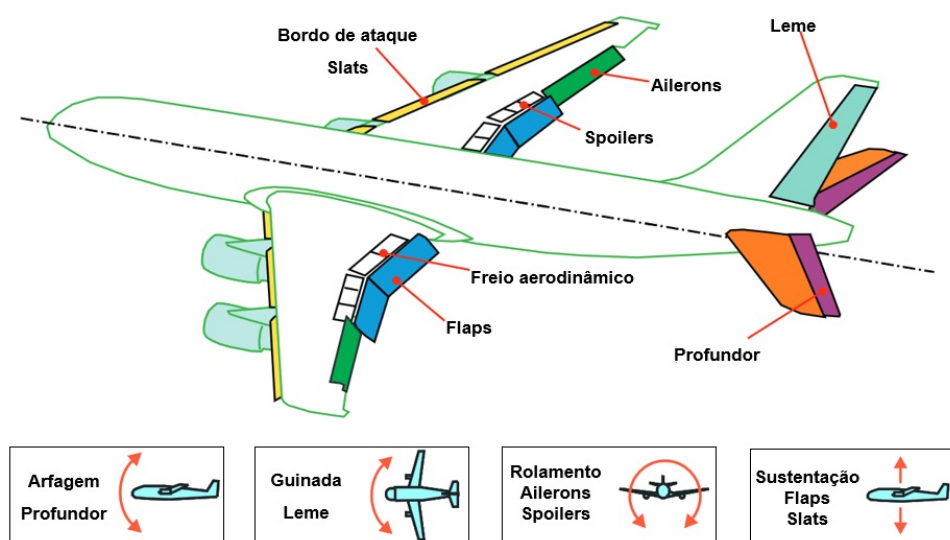
Um sistema de controle de voo de uma aeronave integra todos os elementos mecânicos, elétricos e hidráulicos que convertem as forças e movimentos de controle em deflexões de superfícies móveis ou em ações de outros dispositivos de controle que, por sua vez, modificam a orientação do veículo. O sistema de controle de voo, associado com o sistema de controle propulsivo, permite ao piloto o comando de voo da aeronave, isto é, conduzi-la em qualquer condição desejada dentro de sua capacidade operativa (MIZIOKA, 2009; RISCADO, 2004).

O sistema de controle de voo é feito através da alteração dos momentos em torno do centro de gravidade da aeronave devido à variação da curvatura ou do ângulo de ataque de superfícies sustentadoras ou estabilizantes, por sua vez o sistema de controle propulsivo opera como um dispositivo de regulação de empuxo. Através destes sistemas de controle o piloto é capaz de modificar a velocidade, aceleração normal, deslizamento lateral, taxa de rolamento e outros parâmetros dentro do envelope de voo da aeronave.

Em uma aeronave convencional, o sistema de controle de voo consiste em dois conjuntos de superfícies, as primárias e as secundárias. As três superfícies primárias de controle, a saber: os ailerons, responsáveis pelo controle de rolamento, o leme, instalado na empennagem vertical, incumbido do controle direcional (guinada) e os profundos,

instalados na empenagem horizontal, encarregados pelo controle do ângulo de ataque da aeronave (movimento de arfagem). As superfícies secundárias de controle são os *flaps*, *slats*, freios aerodinâmicos e *spoilers*. Na Figura 107 há um diagrama ilustrando as superfícies de controle e os movimentos de uma aeronave.

Figura 107 – Superfícies de controle e eixos de movimento em uma aeronave



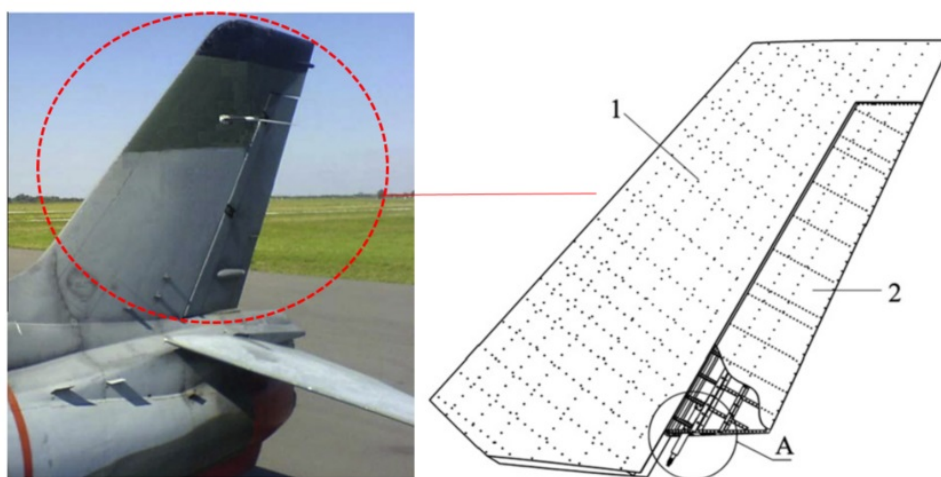
Fonte – Adaptado de Lillo (2006)

A fim que a força requerida para mover as superfícies não seja muito elevada, frequentemente torna-se necessário o emprego de compensadores aerodinâmicos (*tabs*) para balanceamento da superfície. Estes compensadores, também, são utilizados no ajuste fino de equilíbrio, de modo a conservar uma certa posição da superfície de comando sem a obrigatoriedade de atuação permanente do piloto (RISCADO, 2004). Eles são posicionados de forma que se movimentem na direção contrária e proporcional ao movimento da superfície de controle principal. O balanceamento de uma superfície de controle também pode ser executado dispondo-se sua linha de articulação em uma posição tal qual, quando a superfície é defletida, o ar que a atinge à frente da articulação gere uma distribuição de pressão que ajude a girá-la ainda mais, equilibrando-a. Em alguns casos é necessário o balanceamento de massa, que é utilizado à frente da linha de articulação da superfície de controle para prevenir *flutter* (instabilidade dinâmica, catastrófica) da superfície (ROSKAM, 2004).

Leme

Comumente fixado à empenagem vertical, o leme é encarregado pelo controle direcional (guinada) da aeronave, sendo conduzido pela ação dos pedais de controle. Na prática, o leme é utilizado em conjunto com os ailerons para os movimentos de rolamento e de guinada. Na Figura 108 é exemplificado a empenagem vertical de um jato de combate, com destaque para o conjunto estabilizador-leme, extraído de Trifkovic et al. (2011).

Figura 108 – Diagrama esquemático do conjunto empenagem vertical: 1 – estabilizador vertical; 2 – leme



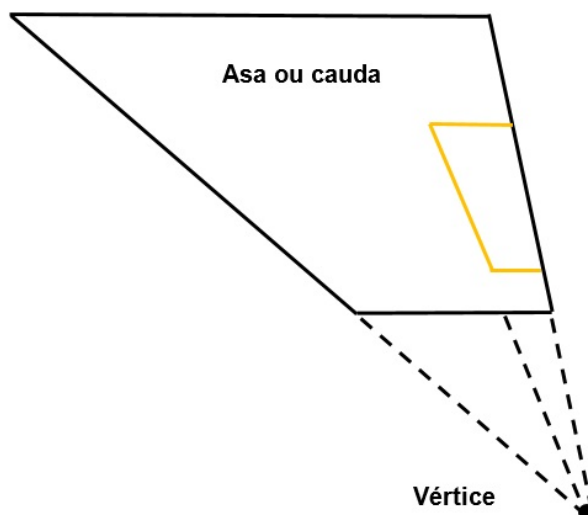
Fonte – Adaptado de Trifkovic et al. (2011)

Em aeronaves convencionais, o leme costumeiramente começa próximo à fuselagem (raiz) e prossegue até a extremidade superior da empenagem vertical ou até em torno de 90% da envergadura da mesma. Aeronaves de alto desempenho utilizam, eventualmente, lemes com corda grande e com envergadura que se prolonga ao redor de 50% da envergadura da empenagem vertical. Isto impede um problema de eficiência do leme semelhante à reversão do aileron – fenômeno no qual as forças aerodinâmicas sobre um aileron defletido são tão elevadas que a superfície se torce e, em certas velocidades de voo, o momento de rolamento provocado pela torção excede aquele produzido pela deflexão do aileron, fazendo com que a aeronave role na direção errada.

O leme frequentemente é afilado, apresentando a mesma razão que a superfície da empenagem vertical. Assim, o leme mantém uma variação constante na corda, conforme indicado na Figura 109. Isto permite que as longarinas tenham um afilamento constante

ao invés de serem curvadas. A corda do leme geralmente está na faixa de 25 a 50% da corda da empenagem vertical.

Figura 109 – Superfície de controle com variação linear da corda



Fonte – Adaptado de Riscado (2004)

- Voo sem um dos motores em velocidade baixa – Neste caso a pressão dinâmica é baixa e, por conseguinte, a força produzida pela superfície aerodinâmica contém valor reduzido. Como a empenagem vertical é projetada para voar com sustentação nula, toda a força necessária para compensar o momento suscitado pela falha do motor deve ser fornecida pela deflexão da superfície de controle (leme de direção);
- Recuperação de parafuso – Quando a aeronave entra em parafuso, o escoamento sobre as asas e sobre a empenagem horizontal está descolado e o avião cai girando em torno do eixo vertical. Para recuperar a condição de voo normal o piloto deve fazer a aeronave parar de girar. Neste caso, é fundamental que o controle da empenagem vertical esteja efetivo e que seja capaz de proporcionar um momento restaurador com valor suficiente para retirar o avião desta condição;
- Razão máxima de rolamento.

As forças geradas para o controle de uma aeronave dependem da forma e das dimensões das empenagens e das superfícies de controle. Por exemplo, alguns aviões de transporte possuem lemes de direção particionados em duas superfícies (que podem ser defletidas com ângulos diferentes) para produzir força suficiente para compensar o momento gerado no caso de falha de um dos motores. Com isto, impossibilita-se projetar uma empenagem vertical com área muito grande, a qual ocasionaria incremento do arrasto,

peso e problemas na estabilidade e qualidade de voo. Outra solução de projeto para elevar a efetividade do controle pode ser observada em alguns aviões de caça, nos quais toda a empenagem é móvel.