



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

**PROJETO, MODELAGEM E ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE UM MOTOR ROTATIVO
ACIONADO POR MOLAS DE LIGA COM
MEMÓRIA DE FORMA**

por

José Marques Basílio Sobrinho

JOÃO PESSOA - PARAÍBA

JANEIRO, 2020

JOSÉ MARQUES BASÍLIO SOBRINHO

**PROJETO, MODELAGEM E ANÁLISE
EXPERIMENTAL DE UM MOTOR ROTATIVO
ACIONADO POR MOLAS DE LIGA COM
MEMÓRIA DE FORMA**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
da Universidade Federal da Paraíba em
cumprimento às exigências para obtenção
do título de Mestre.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Cícero da Rocha Souto

JOÃO PESSOA – PARAÍBA

JANEIRO, 2020

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S677p Sobrinho, José Marques Basílio.

PROJETO, MODELAGEM E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MOTOR ROTATIVO ACIONADO POR MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA / José Marques Basílio Sobrinho. - João Pessoa, 2020.

80 f.

Orientação: Cícero da Rocha Souto.

Dissertação (Mestrado) - UFPB/PPGEM/CT.

1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA. 2. MOTOR ROTATIVO. 3. MODELAGEM ANALÍTICA. 4. MODELAGEM NUMÉRICA. 5. ANÁLISE EXPERIMENTAL. I. Souto, Cícero da Rocha. II. Título.

UFPB/BC

PROJETO, MODELAGEM E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MOTOR ROTATIVO ACIONADO POR MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

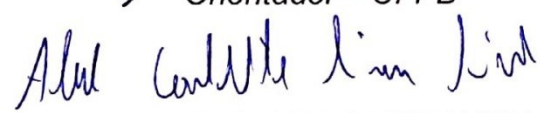
por

JOSÉ MARQUES BASILIO SOBRINHO

Dissertação aprovada em 31 de janeiro de 2020



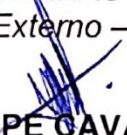
Prof. Dr. CICERO DA ROCHA SOUTO
Orientador – UFPB



Prof. Dr. ABEL CAVALCANTE LIMA FILHO
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. ANDREAS RIES
Examinador Externo – UFPB



Prof. Dr. ANDRÉ FELLIPE CAVALCANTE SILVA
Examinador Externo – IFPB

DEDICATÓRIA

A Deus, ao meu pai Manoel Basílio, à minha mãe Maria Recicleide, à minha irmã Lorena Késsia e à minha esposa Natália Érika pelo total apoio durante esta jornada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecer a Deus pela força e direcionamento durante esta tarefa.

Ao meus pais Manoel Basílio e Cleide, a minha irmã Lorena, pelo apoio diário, mesmo que distantes fisicamente, e pela compreensão as minhas ausências nos momentos familiares.

À minha esposa Natália Érika, pela imensa compreensão, companheirismo e força ao longo deste desafio.

Ao meu orientador professor Cícero da Rocha Souto, pelo apoio, força e oportunidades cedidas desde o primeiro dia no laboratório e também pelas muitas discussões pessoais.

Aos professores Simpício Arnaud da Silva e Alexsandro José Virgínio dos Santos pelas suas contribuições.

Aos meus amigos Alan Gonçalves, Allyson Teixeira, Alysson Silvestre, Angelo Emiliavaca, David Domingos, Maxsuel, Raoni, Renato e muitos outros, pois de forma direta ou indireta contribuíram nesta etapa da minha vida.

Ao Laboratório de Sistema e Estruturas Ativas – LaSEA e ao Laboratório de Instrumentação e Controle – LINC por todo o suporte para elaboração desta pesquisa.

À UFPB, ao CNPQ e à CAPES pelo financiamento dos projetos a qual participei, sendo esses essenciais para cumprimento da presente dissertação.

*“Nós somos aquilo que fazemos repetidamente.
Excelência, então, não é um modo de agir,
mas um hábito”*

Aristóteles

PROJETO, MODELAGEM E ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UM MOTOR ROTATIVO ACIONADO POR MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA

RESUMO

O sistema de rotação baseado no mecanismo de um excêntrico, combinado com grandes deformações proporcionadas por atuadores do tipo molas de liga com memória de forma (LMF), permitiu o projeto de um dispositivo compacto com rotação contínua desenvolvido neste trabalho. O motor rotativo proposto é acionado por molas de ligas com memória de forma (LMF) de NiTi. As molas são acionadas por correntes elétricas utilizando como princípio físico o efeito Joule. Neste caso, o motor pode funcionar em dois sentidos de rotação dependendo apenas da inversão na sequência de acionamento. As molas de LMF quando acionadas combinam o efeito superelástico (SE) e o efeito memória de forma (EMF), podendo sofrer deformações de até 600% do seu comprimento inicial. Para a definição dos parâmetros de projeto, foi realizada uma caracterização eletro-termomecânica das molas de LMF, além de ensaios antagônicos para a avaliação da geração de trabalho após aquecimento térmico. Um modelo analítico para a avaliação prévia das respostas do motor foi implementado em função das características termomecânicas das molas de LMF. Para as simulações numéricas, foram utilizados três modelos distintos com a finalidade de definir qual deles representaria melhor o comportamento de força e deflexão dos atuadores. O modelo mais adequado foi selecionado para as análises das respostas numéricas de todo o motor com as molas acopladas. Uma bancada experimental foi montada para a obtenção das respostas de temperatura, deslocamento angular, força e torque gerados pelo motor. O funcionamento do protótipo foi demonstrado para diferentes acionamentos de corrente elétrica com relação ao tempo de ativação. Como principal contribuição científica foi obtido um índice de densidade de energia de $0,001406851 \text{ Nmm/mm}^3$, que relaciona o máximo torque experimental gerado pelo volume do motor, superior ao de outros importantes motores de LMF na literatura.

DESIGN, MODELLING AND EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A ROTARY MOTOR ACTUATED BY SHAPE MEMORY ALLOY SPRINGS

ABSTRACT

The rotation mechanism based on an eccentric, combined with large deformations of SMA spring type actuators, allowed the design of a compact device with continuous rotation. The proposed rotary motor is driven by NiTi shape memory alloy (SMA) springs. The springs are driven by an electric current using the Joule effect as a physical principle. In this case, the motor can rotate in both directions, by only inverting the drive sequence. When driven, SMA springs combine the superelastic effect (SE) and the shape memory effect (SME), and can suffer deformations of up to 600% of their initial length. To define the design parameters, an electro-thermomechanical characterization of the SMA springs was performed, in addition to antagonistic tests to evaluate the generation of work after thermal heating. An analytical model for the prior evaluation of the motor responses was implemented in function of the thermomechanical characteristics of the SMA springs. For the numerical simulations, three different models were tested in order to define which of them best represents the behavior of force and deflection of the actuators. The most appropriate model was selected for the analyses of numerical responses of the entire motor with coupled springs. An experimental setup measured the temperature, angular displacement, force and torque responses generated by the motor. The functioning of the prototype was demonstrated for different electric current drives in relation to the activation time. As main scientific contribution was obtained an energy density index of $0.001406851 \text{ Nmm/mm}^3$, which relates the maximum experimental torque generated by the motor volume, higher than other important SMA motors in the literature.

PUBLICAÇÕES

Artigos completos publicados em periódicos

SOBRINHO, J. M. B.; FILHO, F. M. F.; EMILIAVACA, A.; CUNHA, M. F.; SOUTO, C.R.; SILVA, S. A.; RIES, A. Experimental and numerical analyses of a rotary motor using shape memory alloy mini springs. **Sensors and Actuators A: Physical**, v. 302, 111823, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.111823>

CUNHA, M. F.; **SOBRINHO, J. M. B.**; SOUTO, C. R.; DOS SANTOS, A. J.; DE CASTRO, A. C.; RIES, A.; SARMENTO, N. L. Transformation temperatures of shape memory alloy based on electromechanical impedance technique. **Measurement**, v. 145, p. 55-62, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.05.050>

GOMES, R.; FEITOSA, F. R.; SOUTO, C.; LIMA, B. A. J.; JUNIOR, J. A.; CUNHA, M.; **SOBRINHO, J. M. B.**; DUBOIS, J. M. Crack Detection in High-Velocity Oxygen-Fuel-Sprayed Al 59.2 Cu 25.5 Fe 12.3 B 3 Quasicrystalline Coatings Using Piezoelectric Active Sensors. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 28, n. 9, p. 5649-5660, 2019. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04298-3>

Artigos submetidos em periódicos

SOBRINHO, J. M. B.; CUNHA, M. F.; EMILIAVACA, A.; SOUTO, C. R.; RIES, A. Compact Rotary Motor Actuated by Shape Memory Alloy Mini Springs. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** (*Em revisão final*)

NICOLAU, L.; **SOBRINHO, J. M. B.**; SOUTO, C. R.; MEDEIROS LIMA, W.; RIES, A.; CUNHA, M. A. Neural Network Identification of Transformation-Induced Plasticity in Shape Memory Actuators. **J. Intell. Mater. Syst. Struct.** (*Em revisão final*)

SILVA, D. D. S.; **SOBRINHO, J. M. B.**; SOUTO, C. R.; GOMES, R. M. Application of Electromechanical Impedance Technique in the Monitoring of Sigma Phase Embrittlement in Duplex Stainless Steel. **Mat. Sci. and Eng.: A** (*Em revisão*)

RANGEL, R. F.; **SOBRINHO, J. M. B.**; SILVA, A. G. P.; SOUTO, C. R.; RIES, A. Double Beam Energy Harvester Based on PZT Piezoelectrics. **Measurement** (*Em revisão*)

Artigos completos publicados em anais de congresso

BASÍLIO SOBRINHO, J. M.; MARQUES FARIAS FILHO, F.; DA ROCHA SOUTO, C. Experimental and Numerical Analysis of the Behavior of Ni-Ti Helical Mini-Spring under Large Strain. **25th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**, Uberlândia-MG, 2019.
<http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-1857>

BASÍLIO SOBRINHO, J. M.; GONÇALVES, A.; RANGEL, R.; DA ROCHA SOUTO, C. A Simplified Measurement System for Vibration Analysis on Small Loudspeaker. **25th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**, Uberlândia-MG, 2019.
<http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0906>

GONÇALVES, A.; **BASÍLIO SOBRINHO, J. M.;** RANGEL, R.; DA ROCHA SOUTO, C. A Review of Power Harvesting from Wind Turbines using Piezoelectric Transducers (2005 - 2019). **25th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**, Uberlândia-MG, 2019.
<http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0947>

GONÇALVES, A.; **BASÍLIO SOBRINHO, J. M.;** RANGEL, R.; DA ROCHA SOUTO, C. Vibration Control in a Cantilever Beam using Negative Capacitance Shunt Circuit with Resistor in Series Coupled to Piezoelectric Transducers. **25th International Congress of Mechanical Engineering – COBEM**, Uberlândia-MG, 2019.
<http://dx.doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-0946>

BEZERRA, J. I. S.; SOUTO, C. R.; SILVA, S. A.; **SOBRINHO, J. M. B.;** CUNHA, M. F.; ARAÚJO, B. A. Efeito da Refrigeração Forçada em Motores Termoelétricos Rotativos Acionados por Molas de Liga Com Memória de Forma. **XXII Congresso Brasileiro de Automática**, 2018, João Pessoa, 2018.
<http://dx.doi.org/10.20906/CPS/CBA2018-1119>

CUNHA, M. F.; SOUTO, C. R.; SILVA, A. G. P.; DOS SANTOS, A. J. V.; **SOBRINHO, J. M. B.;** RIES, A. RF Circuit Powered by a Piezoelectric Generator. **XXII Congresso Brasileiro de Automática**, 2018, João Pessoa, 2018.
<http://dx.doi.org/10.20906/CPS/CBA2018-1383>

Depósitos de Patentes

EMILIAVACA, A.; SILVA, L. R. A.; ARAUJO, C. J.; HOLANDA, A. C. C.; SOUTO, C. R.; **BASILIO SOBRINHO, J. M.**; EMILIAVACA, A. F.; BATISTA, A. V. A. Número do registro: BR1020190126450, título: "MICROBOMBA PERISTÁLTICA LINEAR ACIONADA POR ATUADORES DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 18/06/2019

EMILIAVACA, A.; SOUTO, C. R.; ARAUJO, C. J.; **BASILIO SOBRINHO, J. M.**; EMILIAVACA, A. F.; CUNHA, M. F.; GONCALVES, C. A. N. A. Número do registro: **BR1020190089202**, título: "ASA ADAPTATIVA ACIONADA POR MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 02/05/2019

BASILIO SOBRINHO J. M.; CUNHA, M. F. ; EMILIAVACA, A. ; LACERDA, J. V.; SOUTO, C. R. ; SILVA, S. A. ; TORQUATO FILHO, E. A. Número do registro: **BR1020180768042**, título: "ANEL SUPERELÁSTICO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 20/12/2018

BASILIO SOBRINHO, J. M.; CUNHA, M. F.; SOUTO, C. R.; SILVA, A. G. P.; RIES, A. Número do registro: **BR1020180743589**, título: "INTERRUPTOR PIEZOELÉTRICO SEM FIO E SEM BATERIA PARA ACIONAMENTO DE EQUIPAMENTOS", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 26/11/2018

CUNHA, P. M.; SILVA, D. D. S.; **BASILIO SOBRINHO, J. M.**; RODRIGUES, M. C.; SOUTO, C. R. Número do registro: **BR1020180736892**, título: "PEDAL DE CLIP PARA CICLISMO COM MOLAS DE COMPORTAMENTO PSEUDOELÁSTICO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 16/11/2018

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	OBJETIVOS.....	21
1.1.1	Objetivo Geral.....	21
1.1.2	Objetivos Específicos.....	21
1.2	JUSTIFICATIVA.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF)	24
2.2	ATUADORES ROTATIVOS EMPREGANDO LMF	26
3	MATERIAIS E MÉTODOS	35
3.1	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO	35
3.2	MODELAGEM ANALÍTICA	37
3.3	MODELAGEM NUMÉRICA.....	39
3.3.1	Modelo SUPE	40
3.3.2	Modelo SME.....	41
3.3.3	Simulação empregando o SUPE e o SME	43
3.3.3.1	Elemento finito empregado	43
3.3.3.2	Malha.....	44
3.3.4	Elemento COMBIN39.....	45
3.4	CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO	46
3.4.1	Mini-molas de LMF	46
3.4.2	Projeto da estrutura	48
3.5	INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA.....	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	52
4.1	CARACTERIZAÇÃO ELETRO-TERMOMECÂNICA DAS MOLAS	52
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS NUMÉRICOS.....	60
4.3	ANÁLISE DO MOTOR SEM ACIONAMENTO.....	62

4.3.1	Resultados analíticos.....	62
4.3.2	Resultados numéricos.....	65
4.3.3	Resultados experimentais	68
4.4	acionamentos do MOTOR	69
5	CONCLUSÕES.....	73
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	74
6	REFERÊNCIAS.....	75

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplos de aplicações das LMF.....	19
Figura 2 – Comportamentos das LMF: (a) Efeito memória de forma e (b) Superelasticidade.....	25
Figura 3 – Mecanismo do atuador de LMF.....	26
Figura 4 – Atuador composto por rotor com fio de LMF acoplado.....	27
Figura 5 – Topologias de servo motores empregando LMF.....	28
Figura 6 – Dispositivo rotativo empregando fio de LMF para acionar um dedo robótico.	29
Figura 7 – Motor trifásico acionado por fios de LMF.....	29
Figura 8 – Motores rotativos empregando mecanismos compliant acionados por fios de LMF.....	30
Figura 9 – Motor rotativo empregando mecanismo do tipo catraca acionado por fios de LMF.....	31
Figura 10 – Protótipo do motor de LMF.....	31
Figura 11 – Atuador rotativo helicoidal com fio de LMF inserido internamente.....	32
Figura 12 – Atuador rotativo com fio de LMF acionando estruturas flexíveis.....	32
Figura 13 – Projeto 3D em CAD do atuador rotativo empregando molas de LMF.....	33
Figura 15 – (a) Princípio de operação do motor rotativo e seus respectivos acionamentos: (b) simples e (c) combinado.....	36
Figura 16 – Modelo simplificado para análise dinâmica do motor.....	38
Figura 17 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação representando o fenômeno da superelasticidade.....	41
Figura 18 – Diagrama tensão <i>versus</i> deformação representando o fenômeno da pseudoplasticidade presente no efeito memória de forma descrito por Auricchio <i>et al.</i> (2009).....	42
Figura 19 – Geometria nodal do elemento SOLID186.....	43
Figura 20 – Geometria nodal do elemento BEAM188.....	43
Figura 21 – (a) Malha utilizada nas simulações empregando os modelos SUPE e SME. (b) Métrica para a avaliação da qualidade da respectiva malha.....	44
Figura 22 – (a) Geometria nodal e (b) comportamentos força-deflexão acerca do elemento COMBIN39.....	45

Figura 23 – Mola gerada automaticamente nas simulações empregando o elemento COMBIN39.	46
Figura 24 – Principais dimensões (em mm) da mola de LMF.	47
Figura 25 – Esquemático do motor rotativo contendo os principais parâmetros e dimensões geométricas.	49
Figura 26 – Motor fabricado e montado com atuadores do tipo molas helicoidais de NiTi: (a) vista superior e (b) vista isométrica.	49
Figura 27 – Aparato experimental empregado para a obtenção dos resultados de respostas experimentais do motor proposto.	51
Figura 28 – Ensaio de tração uniaxiais isotérmicos para a avaliação do comportamento mecânico da mola de LMF entre 200% e 500% de deformação.	52
Figura 29 – (a) Curvas de resistência elétrica <i>versus</i> temperatura. (b) Temperaturas de Austenita final obtidas a partir das respectivas curvas.	53
Figura 30 – (a) Sinais de corrente elétrica fornecidos à mola de LMF sob diferentes deformações. (b) Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos.	54
Figura 31 – Esquemático referente ao aparato experimental para análise das respostas antagônicas.	55
Figura 32 – Respostas de (a) temperatura, (b) força e (c) deformação recuperada para os ensaios das molas na configuração antagônica da Figura 31. Destaque para os comportamentos histeréticos entre (d) força e temperatura; e entre (e) força e deformação recuperada.	57
Figura 33 – Comportamento histerético da mola de LMF na região de trabalho adotada.	58
Figura 34 – Curvas de geração de força entre (a) força <i>versus</i> deformação e (b) força <i>versus</i> temperatura.	59
Figura 35 – Resultados experimentais utilizados como parâmetros para validação e análise das simulações realizadas.	60
Figura 36 – Deslocamentos aplicados nas simulações numéricas correspondendo as deformações de 300%, 350% e 400% do comprimento útil da mola.	61
Figura 37 – Resultados experimentais e numéricos empregando os três modelos avaliados para as deformações de (a) 300%, (b) 350% e (c) 400% da mola.	61
Figura 38 – Curvas de (a) forças e (b) torques para a mola M12 ativada e desativada no modelo de única fase (demais fases desconectadas mecanicamente).	62

Figura 39 – (a) Curvas de forças e (b) torques para as molas M12 desativadas no modelo trifásico.	63
Figura 40 – Relações entre max. torque/volume e max. torque/massa avaliadas para o sistema empregando as molas M9, M12 e M15.	64
Figura 41 – Curvas de torques úteis teóricos para o motor com (a) 3, (b) 4, (c) 5 e (d) 6 fases analisando diferentes tipos de acionamentos.	65
Figura 42 – (a) Ensaio de tração uniaxial isotérmico com um loop entre 300% e 400%. (b) Histerese de ΔF <i>versus</i> ΔL na região de trabalho desprezando a pré-carga em 300%.	66
Figura 43 – Mecanismo de rotação com as três molas acopladas modelados no ANSYS® para a avaliação da resposta numérica do motor.	66
Figura 44 – Resultados numéricos das (a) forças e (b) torques gerados pelo motor em cada fase sem acionamento. (a) Relações entre forças geradas a cada duas fases vizinhas. ...	67
Figura 45 – Resultados experimentais, analíticos e numéricos das respostas do motor sem acionamento. Deslocamento angular <i>versus</i> (a) forças e (b) torques de reação gerados pelas três fases. (c) Curvas de forças para duas fases vizinhas.	69
Figura 46 – Respostas de (b.1-3) temperaturas, (c.1-3) deslocamentos angulares, (d.1-3) forças, e (e.1-3) torques para os sinais de (a.1-3) corrente elétrica com amplitudes de 360 mA para tempos de ativação de 5,12; 6,15 e 7,69 s. (f.1-3) Curvas de torque <i>versus</i> deslocamento angular. (g.1-3) Curvas de torque entre duas fases vizinhas. (h.1-3) Imagens da câmera para as posições de 120, 240 e 360 graus do rotor a partir do acionamento da posição de origem ($\theta_r = 0$ graus).	71
Figura 47 – Relações de torque/volume do protótipo fabricado e dos principais motores rotativos presentes na literatura.	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos atuadores rotativos elaborada por Yuan <i>et al.</i> (2017).....	34
Tabela 2 – Parâmetros de entrada do modelo SUPE proposto por Auricchio <i>et al.</i> (2009) obtidos pelos ensaios em $T_{amb} \approx 27^{\circ}C$	41
Tabela 3 – Parâmetros de entrada modelo SME proposto por Auricchio <i>et al.</i> (2009)..	42
Tabela 4 – Principais parâmetros para o projeto e simulações dos motores.	59
Tabela 5 – Máximos valores de força, torque e desvios percentuais com relação aos dados experimentais.	68

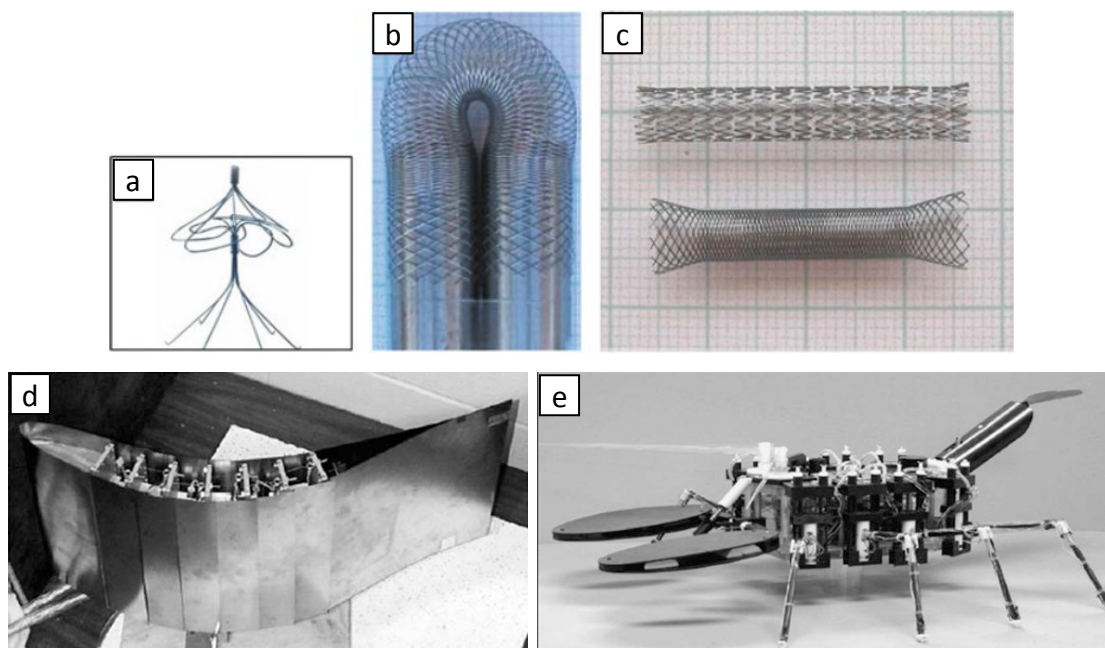
1 INTRODUÇÃO

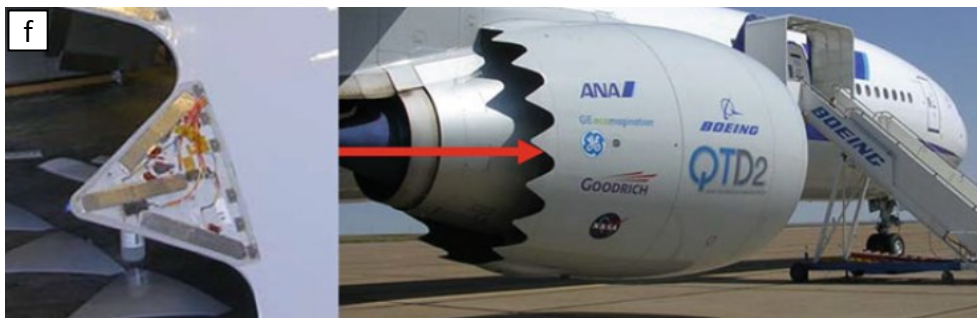
Tanto em setores industriais como em centros de pesquisas, há uma busca crescente por componentes e elementos capazes de reduzir peso, otimizar operações e conceder maior maleabilidade de tarefas e estruturas.

Devido a necessidade de sistemas cada vez menores (miniaturizados), com respostas mais rápidas e maior rendimento energético, foi que surgiu a necessidade da utilização de materiais inteligentes que possam ser confeccionados de forma compacta e leve. Dentre esses materiais se destacam as Ligas com Memória de Forma compostas principalmente de níquel e titânio, conhecida por Nitinol, as quais em geral possuem alta densidade de energia (força/volume).

Esses materiais em geral, quando utilizados como sensores, transformam estímulos mecânicos (deformação ou tensão mecânica) em uma resposta não-mecânica (térmica, elétrica, magnética, etc.), já quando utilizados como atuadores transformam um estímulo não-mecânico em uma resposta mecânica (LAGOUDAS, 2008; GAUDENZI, 2009; OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Figura 1 – Exemplos de aplicações das LMF.





Fonte: Adaptado de Lopes, Steffen e Savi (2016).

Desta forma, por atenderem esses requisitos e serem tratadas como materiais funcionais ou ativos, as Ligas com Memória de Forma (LMF) têm ganhado destaque, como mostrado por Lopes, Steffen e Savi (2016) em diversas aplicações nos setores da robótica, aeronáutica, odontologia, medicina, como observado na Figura 1. O principal motivo está no fato desses materiais apresentarem funcionalidade como elementos sensores e/ou atuadores. Os sistemas mecatrônicos que incorporam materiais funcionais como as LMF podem ser considerados estruturas inteligentes.

Neste contexto científico e tecnológico, o presente trabalho de dissertação tem por objetivo o desenvolvimento de um motor rotativo acionado por mini-molas de LMF de NiTi com o intuito de promover uma contribuição com um novo dispositivo nessa classe para a literatura.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Projetar um motor rotativo com rotação contínua e bidirecional acionado por mini-molas de NiTi com memória de forma. Além disso, implementar modelagens analíticas e numéricas, e análises experimentais do protótipo com os atuadores acoplados.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o comportamento de atuadores inteligentes baseados em materiais com memória de forma;
- Caracterizar as molas de LMF por meio de ensaios térmicos, mecânicos e elétricos, determinando assim o comportamento histerético entre carga e descarga mecânica, respostas antagônicas, temperaturas de transformação de fases sob carga, forças geradas antes e após aquecimento térmico, respostas térmicas, entre outros;
- Projetar uma estrutura CAD a partir dos parâmetros obtidos pelos ensaios realizados. Em seguida, simular o mecanismo de rotação empregando as molas;
- Modelar analiticamente e numericamente o atuador rotativo;
- Fabricar a estrutura do motor em polímero ABS via impressão 3D;
- Desenvolver uma instrumentação eletrônica para o acionamento e aquisição das respostas experimentais do motor;
- Comparar a relação de torque/volume com outros motores de destaque na literatura;

1.2 JUSTIFICATIVA

Diversos dispositivos eletromecânicos têm sofrido modificações com o avanço da tecnologia principalmente em relação ao sistema de atuação. Com isso, as ligas com memória de forma (LMF) são uma alternativa aos atuadores convencionais utilizados nesses dispositivos. Pesquisas relatam os vários setores em que as LMF têm substituído outros atuadores convencionais, destacando as aplicações industriais (SPAGGIARI; CASTAGNETTI; GOLINELLI, 2016; WU; SCHETKY, 2000), aeroespaciais (HARTL; LAGOUDAS, 2007), automotivas (JANI; LEARY; SUBIC, 2014), biomédicas (KADIR *et al.*, 2019; MACHADO; SAVI, 2003), robóticas (HWANG; LEE; KIM, 2017; MODABBERIFAR; SPENKO, 2018; ZHAKYPOV; PAIK, 2018), e outras (JANI *et al.*, 2014).

Quando utilizados para acionar dispositivos, os elementos de LMF são classificados como atuadores lineares ou rotativos (motores). Atuadores de LMF rotativos são apresentados na literatura como alternativa a servomotores, atendendo a um vasto nicho de aplicações (YUAN *et al.*, 2017). A incorporação desses atuadores nesses sistemas permite que o mesmo se torne mais compacto, leve e silencioso, com uma densidade de energia superior a atuadores elétricos convencionais devido ao peso ser significativamente menor (JANI *et al.*, 2014).

Nespoli *et al.* (2010b) destacam vários mini-atuadores que apresentam relações de densidade de energia superiores a sistemas convencionais, melhorando assim a eficiência do sistema na qual estão aplicados. Nos trabalhos de revisão de Jani, Leary e Subic (2017) e Yuan *et al.* (2017) foram mencionados diversos projetos de atuadores lineares e rotativos utilizando as LMF, respectivamente. Eles mostraram que elementos de LMF na forma de fios e molas podem ser empregados para o desenvolvimento de pequenas estruturas ativas. Esse fato é devido esses materiais serem capazes de converter estímulos termomecânicos apresentando larga densidade de energia, capacidade de sofrer e recuperar grandes deformações, realizar trabalho e gerar força quando submetidos a condições de tensão e temperatura adequadas. Essas características se devem a mudança de fase em estado sólido da fase martensita (*M*) para austenita (*A*) e vice-versa (LAGOUDAS, 2008; OTSUKA; WAYMAN, 1998).

De acordo com Mammano e Dragoni (2017), as aplicações para atuadores unidirecionais e rotativos de baixa velocidade incluem dispensadores de toalhas, bombas peristálticas, correias transportadoras, mesas de posicionamento rotativas, motores de

brinquedo, faróis rotativos, apontadores de lápis e acionadores de espetos. Nessas áreas, simplicidade mecânica, operação silenciosa e ausência de campos magnéticos são os principais méritos da tecnologia de LMF em relação aos populares motores eletromagnéticos.

Baseado nesses apontamentos, neste trabalho de pesquisa foram utilizadas molas de LMF superelásticas (efeito SE) de NiTi pré-deformadas submetidas a ciclos de aquecimento/resfriamento e deformação para produzir o movimento de rotação do motor quando aquecidas (efeito EMF). O mecanismo de rotação com um eixo excêntrico, em conjunto com as mini-molas de LMF, permitiu um projeto compacto da estrutura do motor capaz de rotacionar continuamente. Além disso, com a inversão da sequência de acionamento dos atuadores o motor pode girar nos sentidos horário e anti-horário caracterizando-o como motor bidirecional. Como contribuição científica podem ser destacados os seguintes pontos:

- Estrutura compacta e leve que permitiu a obtenção de altas relações de torque/volume e torque/massa quando comparados com outros motores da mesma classe;
- Mecanismo de rotação acionado por mini-molas de LMF superelásticas com rotação contínua e bidirecional;
- Modelagem analítica do comportamento dinâmico do protótipo com as molas acopladas;
- Modelagem numérica do dispositivo empregando um novo elemento finito (COMBIN39) para representar a superelasticidade das molas de LMF;
- Verificação experimental do comportamento do motor rotativo sem e com acionamento por corrente elétrica, obtendo respostas de temperatura, deslocamento angular, força e torque.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF)

Ligas com memória de forma (LMF) são materiais metálicos capazes de recuperar uma deformação, realizar trabalho ou gerar força quando submetidos a um campo de temperatura adequado. Um outro diferencial desses materiais é a possibilidade de utilização como atuadores e/ou sensores, integrando os chamados materiais e estruturas inteligentes (LAGOUDAS, 2008; GAUDENZI, 2009).

Existem diferentes tipos de LMF: CuZnAl, CuAlNi, CuAlBe, AuCd, sendo a composta por Níquel e Titânio (NiTi), conhecida por Nitinol, a mais utilizada atualmente. Essa liga foi estudada pelo metalúrgico William F. Buehler e sua equipe por volta dos anos 70, onde o seu efeito de memória de forma foi descoberto no Laboratório de Material Bélico Naval dos Estados Unidos (SHAW; KYRIAKIDES, 1995).

Segundo Otsuka e Ren (1999), esses materiais possuem duas importantes fases de transformação, onde cada uma delas se difere pela maneira como se comporta a estrutura cristalina do material em uso. A fase de temperatura baixa, conhecida como martensita (M), se apresenta na forma estrutural monoclinica, podendo conter até cerca de vinte e quatro variantes, já a fase de temperatura mais alta, a austenita (A), se apresenta na forma cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), possuindo apenas uma variante. Estas ligas ainda podem incluir outras transformações intermediárias ocasionadas na fase R, a qual possui estrutura do tipo romboédrica e é comumente identificada nas ligas de NiTi quando há uma maior concentração de níquel em suas composições.

O comportamento termomecânico apresentado durante as mudanças de fase são intrinsecamente não-lineares e histeréticos, além de dependentes da composição química e do histórico termomecânico da liga, sendo portanto necessário uma caracterização preliminar para determinar suas propriedades (CASATI *et al.*, 2014; OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Em geral existem dois efeitos associados a mudança de fase representados na Figura 2:

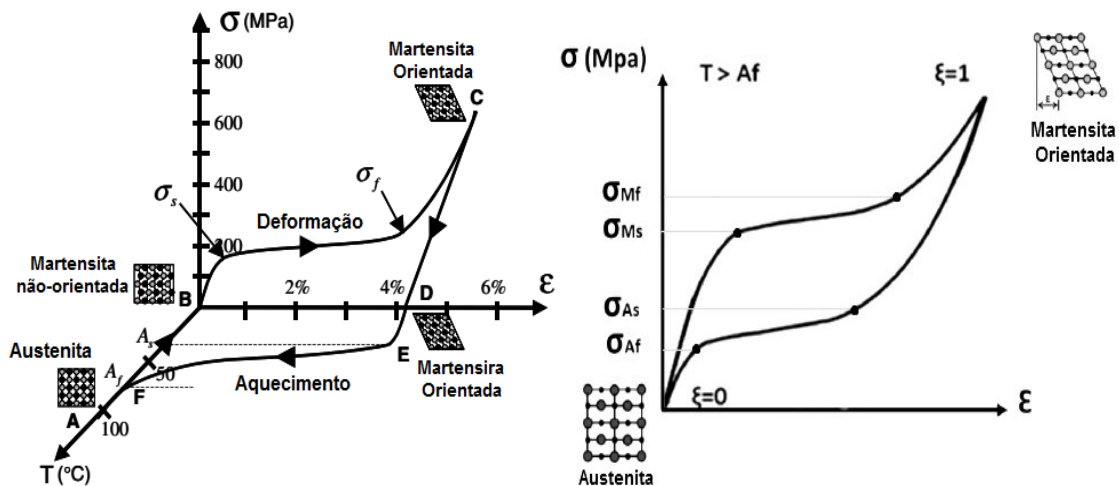
- O efeito memória de forma (EMF), no qual o material inicialmente martensítico é deformado e ao ser aquecido a uma temperatura superior a de transformação final da austenita (A_f) retorna a sua forma original apresentando deformações

praticamente nulas, mantendo sua forma após o resfriamento (CASATI *et al.*, 2014);

- O efeito superelástico (SE), em que o material inicialmente austenítico é deformado transformando-se de fase para martensita orientada por tensão sob temperatura constante, e ao ser retirada a carga, retorna a sua forma inicial dissipando energia durante a transformação de fase para a martensita (LAGOUDAS, 2008).

Essas ligas podem ser utilizadas empregando esses dois efeitos em conjunto dependendo da temperatura de trabalho do atuador, com isso pode ser observado o efeito memória de forma a partir da martensita induzida por tensão mecânica (EMILIAVACA *et al.*, 2018). Essa combinação de efeitos otimizam a atuação em sistemas de movimento repetitivos, pois, o SE contribui com a parte passiva e o EMF contribui com a parte ativa de recuperação do atuador.

Figura 2 – Comportamentos das LMF: (a) Efeito memória de forma e (b) Superelasticidade.



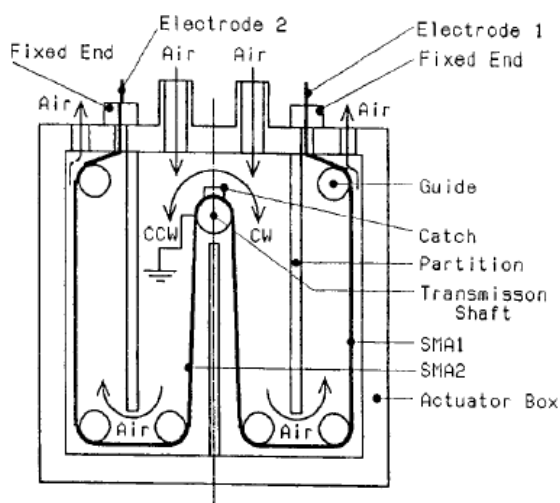
Fonte: Adaptado de Lagoudas (2008).

2.2 ATUADORES ROTATIVOS EMPREGANDO LMF

Um dos primeiros protótipos de motores rotativos acionado por LMF foi desenvolvido por Gabriel, Trimmer e Walker (1988). Os autores utilizaram a torção de um fio de LMF para acionar o eixo. Uma micro válvula de fluxo e uma micro pinça foram desenvolvidas para demonstrar o potencial de aplicação do atuador. Desde então, diversos outros motores foram desenvolvidos utilizando atuadores de LMF para acionar o mecanismo de seus dispositivos. (KITINANTHAPANYA, 2019; KURIBAYASHI, 1989; KURIBAYASHI, 1997; LAN; WANG; FAN, 2009; NESPOLI *et al.*, 2010a; REYNAERTS; BRUSSEL, 1998; SONG, 2007; TANAKA; YAMADA, 1991; YAMANO *et al.*, 2018; YUAN *et al.*, 2018; ZHANG; YAN, 2012)

Em Tanaka e Yamada (1991) foi desenvolvido um atuador servo rotativo usando fio de 0,3 mm de diâmetro, observado na Figura 3. Devido a sua geometria o movimento é limitado a uma rotação de aproximadamente 60 graus. A medição da rotação angular do atuador foi efetuada pela variação de resistência elétrica de um potenciômetro posicionado no eixo motor. Para a leitura da temperatura foi utilizado um termopar devidamente condicionado. Para o controle do movimento angular foi desenvolvido um controle proporcional-integral-derivativo (PID) usando a temperatura do fio como o parâmetro de realimentação do controlador. A corrente elétrica produzida por um sinal PWM é fornecida para aquecimento do fio por efeito Joule. Resultados experimentais mostram que o atuador de LMF produziu deslocamento angular de ± 15 graus, velocidade angular máxima de 15 graus/s e torque máximo de 2,1 kg.cm.

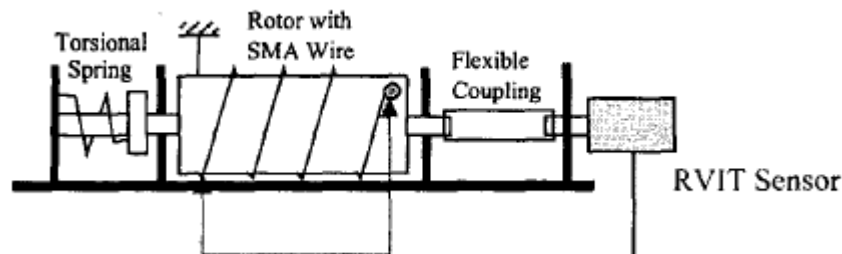
Figura 3 – Mecanismo do atuador de LMF.



Fonte: Tanaka e Yamada (1991).

Semelhantemente em Song (2001) é apresentado um motor linear, representado na Figura 4, utilizando fio de LMF de 0,381 mm sobre um cilindro de 29,21 mm. Uma extremidade do fio foi fixada ao cilindro e outra fixada à placa de base. Por aquecimento, o fio de LMF contrai e o eixo gira proporcionalmente a contração do fio. Com o resfriamento do fio de LMF o rotor volta para posição inicial pela ação de uma mola de compressão. Uma corrente elétrica amplificada é utilizada para energizar o fio e provocar o aquecimento. Um Transformador Rotativo de Indutância Variável (*Rotational Variable Inductive Transformer – RVIT*) foi usado para medição do deslocamento angular do cilindro. Foi utilizado um dSPACE para aquisição de dados e controle do sistema em tempo real com Matlab/Simulink a partir da implementação de algoritmos de controle. O motor servo rotativo obteve um deslocamento angular de 100 graus com um erro de estado estacionário de 0,2 graus.

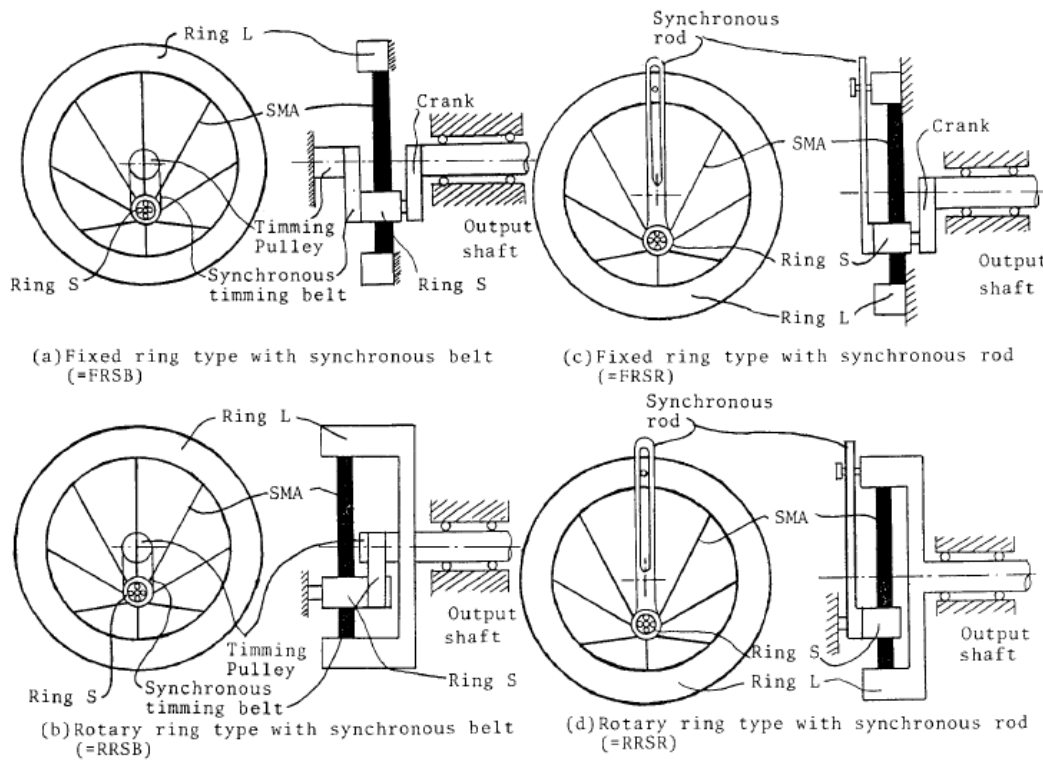
Figura 4 – Atuador composto por rotor com fio de LMF acoplado.



Fonte: Song (2001).

Outros servos motores são apresentados em Kuribayashi (1989) com a possibilidade de girar completamente mantendo o movimento contínuo. Nesse trabalho, o autor mostrou algumas configurações de motores utilizando fios e pequenas vigas de LMF compressivas como molas em modo de flexão. As configurações demonstradas podem ser visualizadas na Figura 5. As relações geométricas dos motores propostos neste trabalho foram definidas através das propriedades dinâmicas dos atuadores de LMF. O deslocamento angular medido é utilizado como parâmetro de controle de acionamento do motor. Assim, o atuador rotativo apresentou um torque por unidade de massa de 1,384 Ncm/g e uma velocidade máxima de rotação de 0,6 rad/s.

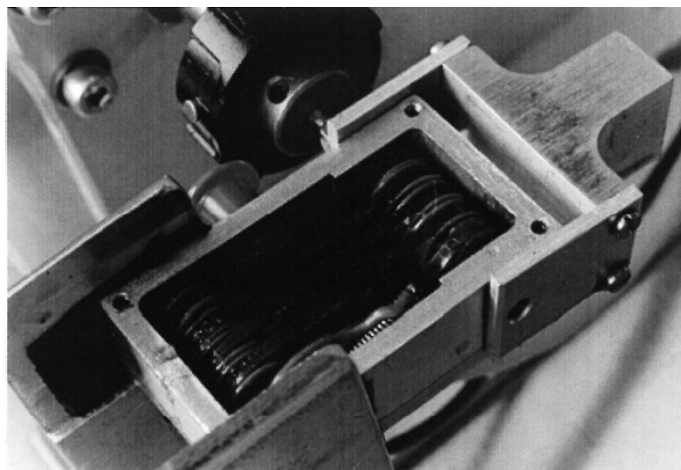
Figura 5 – Topologias de servo motores empregando LMF.



Fonte: Kuribayashi (1989).

Comparações de desempenho em termos de vantagens e limitações dos atuadores baseados em ligas com memória de forma, em comparação à motores convencionais, foram apresentadas em várias literaturas, destacando-se o trabalho elaborado por Reynaerts e Brussel (1998). Os autores desenvolveram um atuador para promover um máximo deslocamento angular de 90 graus, a ser utilizado em um dedo robótico. Os deslocamentos do atuador foram medidos com um Transformador Diferencial Variável Linear (*Linear Variable Differential Transformer – LVDT*). Para os cálculos de torque e temperatura foi utilizada a potência consumida pelos atuadores e, através de equações, foram empregadas as conversões adequadas. Foi implementado um controlador do tipo PID para acionamento do protótipo. Por fim, verificaram que a relação potência/peso e a relação potência/volume desse motor de LMF é de 1,1 W/g e 7,0 W/cm³ mostrando-se superiores as relações de um motor DC de 28 V que são de 0,13 W/g e 0,3 W/cm³, respectivamente. Na Figura 6 é apresentada a configuração proposta.

Figura 6 – Dispositivo rotativo empregando fio de LMF para acionar um dedo robótico.



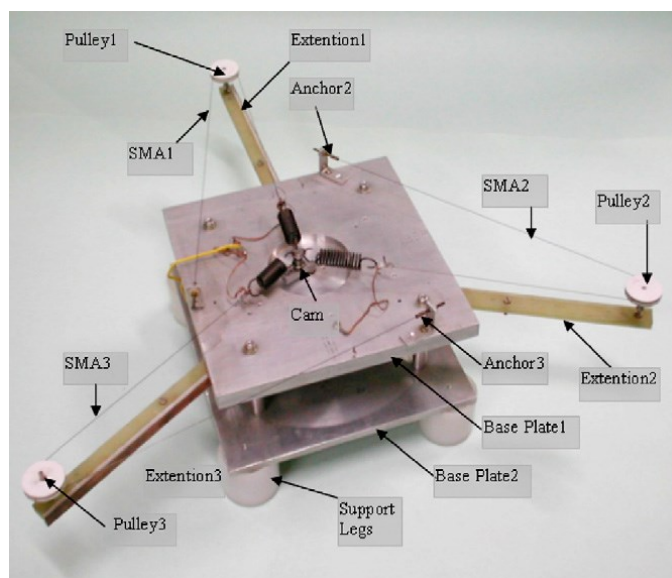
Fonte: Reynaerts e Van Brussel (1998).

Com o avanço dessa tecnologia proposta por esses autores, diversos novos atuadores rotativos foram desenvolvidos e muitos continuam em desenvolvimento no objetivo de obterem altos índices de densidade de energia e assim melhorar o desempenho dos sistemas aos quais estão inseridos.

Podem ser destacados como principais os seguintes motores rotativos.

Sharma, Nayak e Dinesh (2008) projetaram um motor empregando um sistema de rotação com um eixo excêntrico acionado por fios de LMF como observado na Figura 7. Esse dispositivo pode girar continuamente e nos dois sentidos de rotação.

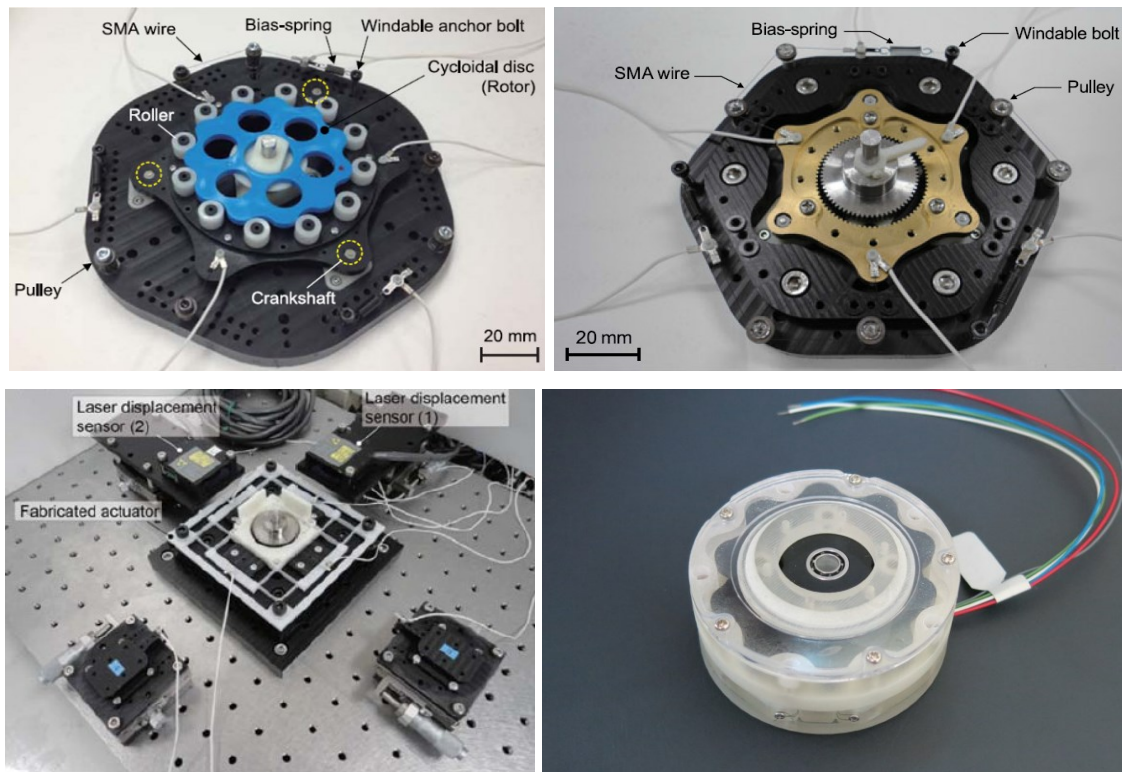
Figura 7 – Motor trifásico acionado por fios de LMF.



Fonte: Sharma, Nayak e Dinesh (2008).

Hwang e Higuchi (2014b, 2014a, 2016); Hwang, Ihn e Kim (2018) projetaram motores utilizando mecanismos compliant com uma engrenagem de perfil interno e uma engrenagem de perfil externo fixa ao eixo do motor. Os protótipos fabricados podem ser observados na Figura 8. Os fios de LMF quando acionados deslocam o centro do mecanismo compliant promovendo o giro da engrenagem de posição fixa. Os mecanismos desses motores permitem que eles girem continuamente e nos sentidos horário e anti-horário invertendo a sequência dos acionamentos.

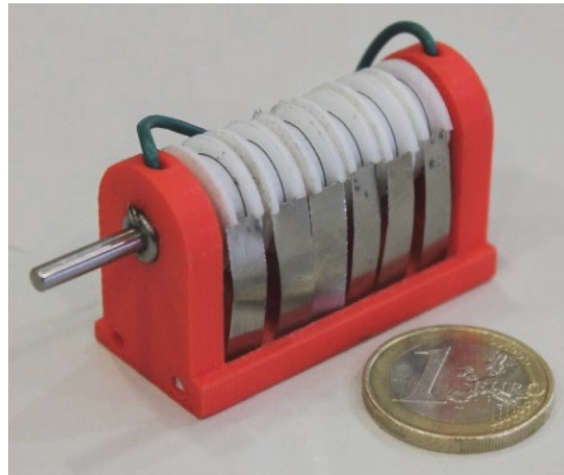
Figura 8 – Motores rotativos empregando mecanismos compliant acionados por fios de LMF.



Fonte: Hwang e Higuchi (2014b, 2014a, 2016); Hwang, Ihn e Kim (2018)

Mammano e Dragoni (2017) desenvolveram um mini-motor rotativo contínuo e unidirecional acionado por fios de LMF envolvidos em um eixo com catracas (Figura 9). Ao acionar os fios, um cilindro gira em conjunto com eixo central devido a trava da catraca mantendo assim sua posição. Para promover um movimento de rotação completo, esse dispositivo utiliza várias roldanas ligadas ao eixo e são necessários diversos acionamentos alternados dos fios de LMF.

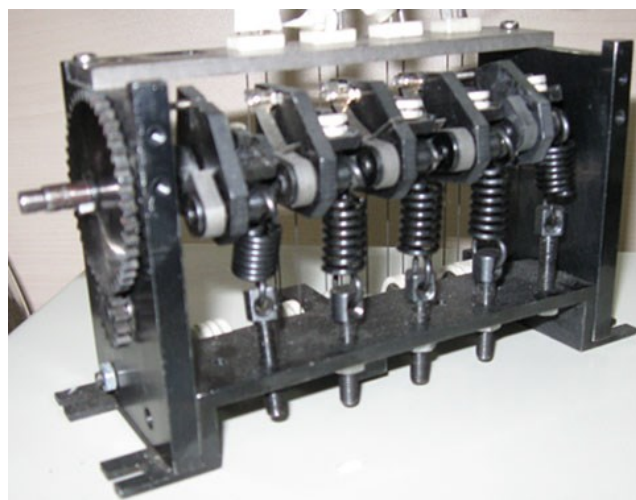
Figura 9 – Motor rotativo empregando mecanismo do tipo catraca acionado por fios de LMF.



Fonte: Mammano e Dragoni (2017).

Zhang e Yan (2012) projetaram um motor contínuo e unidirecional acionado por cinco segmentos compostos por fios de LMF em que cada um deles está ligado a uma mola passiva para retorno da posição inicial como mostrado na Figura 10. Além disso é empregado um sistema de redução para aumento no torque de saída com redução da velocidade.

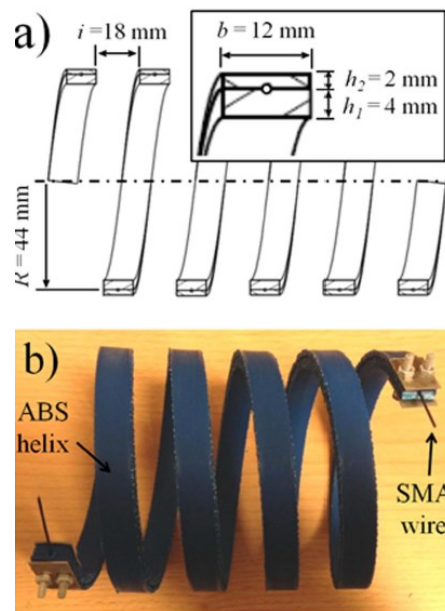
Figura 10 – Protótipo do motor de LMF.



Fonte: Zhang e Yan (2012).

Yuan *et al.* (2018) propuseram um conceito para um atuador rotativo não-contínuo e unidirecional acionado por um fio de LMF inserido dentro de uma estrutura helicoidal fabricada em ABS. As dimensões de projeto e o próprio atuador fabricado são apresentados na Figura 11.

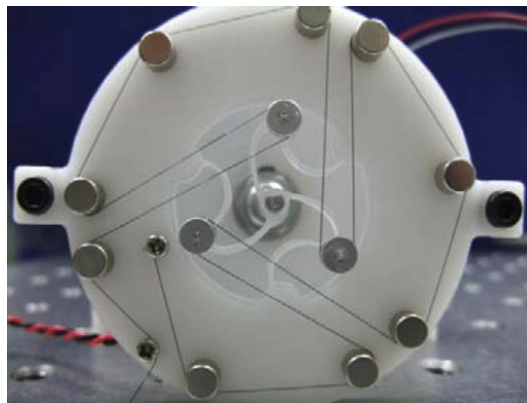
Figura 11 – Atuador rotativo helicoidal com fio de LMF inserido internamente.



Fonte: Yuan *et al.* (2018).

Lan, Wang e Fan (2009) elaboraram o projeto e implementação de um manipulador rotativo não-contínuo e bidirecional usando flexores acionados por um fio longo de LMF. O mecanismo permite que o mesmo fio quando acionado promova a geração de três forças defasadas promovendo a rotação do sistema.

Figura 12 – Atuador rotativo com fio de LMF acionando estruturas flexíveis.

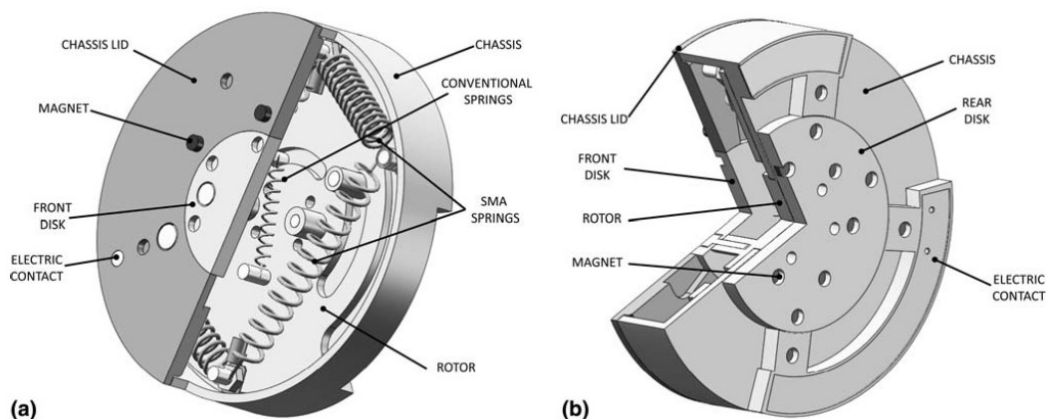


Fonte: Lan, Wang e Fan (2009).

Spinella, Mammano e Dragoni (2009) propuseram o projeto de um motor rotativo e bidirecional acionado por molas de LMF. O mecanismo adotado emprega molas passivas para controle da deformação das molas de LMF. Todas as molas de LMF estão dispostas no mesmo plano em uma configuração que permite uma estrutura

compacta do atuador. Foram realizadas simulações com o dispositivo, porém o protótipo não chegou a ser fabricado.

Figura 13 – Projeto 3D em CAD do atuador rotativo empregando molas de LMF.



Fonte: Spinella, Mammano e Dragoni (2009).

Nessas aplicações em motores rotativos se tem visto a utilização mais acentuada de LMF na forma de fios. Esses elementos possuem grande potencial na produção de força, porém necessitam de maiores comprimentos para produzir deslocamentos recuperáveis expressivos. Na possibilidade de melhorar esses deslocamentos gerados, podem ser utilizados elementos de LMF na forma de molas helicoidais. A própria geometria do atuador favorece o retorno a sua forma original quando cessada a carga, podendo suportar grandes deslocamentos sem apresentar plasticidade. Além disso, a seção ativa do elemento corresponde a seção transversal do fio da mola que irá ser solicitada em flexo-torção possibilitando a recuperação de até 500% de deformação.

Yuan *et al.* (2017) publicaram um artigo de revisão de atuadores rotativos acionados por ligas com memória de forma. Nesse trabalho são definidas classificações destes atuadores rotativos quanto a continuidade de rotação: contínua ou intermitente; quanto ao sentido de rotação: unidirecional ou bidirecional; e quanto ao tipo de atuador empregado: mola, fio, etc. Nesse caso, bidirecional trata-se do atuador que pode girar tanto no sentido horário quanto no anti-horário, dependendo apenas de como o sistema é acionado.

Na Tabela 1, presente em Yuan *et al.* (2017), são apresentados os artigos e as patentes até o momento dessa publicação sobre os atuadores rotativos. Estas informações são bastante úteis pois facilita assim verificar qual o nível de inovação proposto neste trabalho.

Tabela 1 – Classificação dos atuadores rotativos elaborada por Yuan *et al.* (2017).

References	Continuous	Non-continuous			
		Unidirectional	Bi-directional		
			One SMA	SMA & spring	At least two SMAs
Articles	Hwang and Higuchi (2014b); Kuribayashi (1989b); Meier and Oelschläger (2004); Sharma et al. (2008b); Zhang and Yan (2012)	Likhachev et al. (1994); Paik et al. (2010)	Gabriel et al. (1988); Park et al. (2001); Paik and Wood (2012); Yan et al. (2014)	Elahinia and Ashrafiuon (2002); Elahinia et al. (2004); Jenkins and Landis (1995); Lan et al. (2009); Liang and Rogers (1992); Lucy et al. (1996); Redmond et al. (2010); Song (2007); Tobushi et al. (2010, 2013); Viscuso and Pittaccio (2012)	Carpenter et al. (1995); Ikuta (1990); Kuribayashi (1989a); Nespoli et al. (2010a); Spinella et al. (2009); Tanaka and Yamada (1991); Wang et al. (2008); Williams and Elahinia (2008)
Patents	Alexander et al. (2014); Al-Jaroudi (1988); Banks (1987); Smith (1978); Goldstein (1990, 1991); Jamieson (1987); Johnson and Kirkpatrick (1981); Narasimhiah and Talkao (2004); Pelley (1983); Tanaka and Saito (1991); Yoshida (2002); Zanella et al. (2006)	Bushnell and Whitley (2007); Foote (1989)	Joon-Yoen (1988); Mabe (2005)	Bloch (1988); Brown (1989); Butera et al. (2003); Faurie (1987); Jacot et al. (2000); Kisters et al. (1998); Mabe et al. (2011); MacGregor et al. (2006); Makaran (1992); Mankame and Browne (2012); Moignier et al. (1999); Ohkata (1985); Pittaccio et al. (2011, 2013a); Shahinpoor (1998); Yaeger and Wilkins (1991); Zhou et al. (2002)	Brudnicki (1995); ?; Johnson (1990); MacGregor et al. (2006); Merne (2005); Nakanishi (1987); Stange (1977); Suzuki (1986, 1988); Swenson (1992); Weems (2000)
Number	18	4	6	28	20
Percentage	24%	5%	8%	37%	26%

SMA: shape memory alloy.

Fonte: Yuan *et al.* (2017).

Analisando esses dispositivos destacados por Yuan *et al.* (2017) e outros dispositivos mais recentes (após 2017), o motor proposto nesta presente dissertação pode ser classificado como contínuo e bidirecional. Percebe-se ainda que para este caso onde o mesmo pode rotacionar continuamente e em ambos os sentidos, seja o primeiro projeto utilizando atuadores do tipo molas helicoidais de LMF superelásticas.

O projeto conceitual que utiliza um eixo excêntrico empregado no protótipo do presente trabalho é semelhante ao desenvolvido por Sharma, Nayak e Dinesh (2008). No entanto, vários componentes, como polias, hastes de extensão e bases metálicas, foram eliminados. Além disso, os fios atuadores utilizados pelos autores mencionados foram substituídos por pequenas molas de LMF superelásticas capazes de recuperar grandes deformações, promovendo a eliminação das molas de retorno passivo. Toda a estrutura do mecanismo foi confeccionada em uma impressora 3D usando material polimérico, que possui uma densidade menor que o alumínio usado por Sharma. Todas essas e outras modificações foram cruciais, reduzindo assim as dimensões e a massa do protótipo, permitindo alcançar maiores razões de torque/volume e torque/massa.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido utilizando a infraestrutura de equipamentos e materiais do Laboratório de Sistemas e Estruturas Ativas – LaSEA, com o apoio do Laboratório de Instrumentação e Controle – LINC, pertencentes à UFPB. A metodologia aplicada ao trabalho foi baseada no estudo atualizado de trabalhos técnicos e científicos na linha de atuadores rotativos com memória de forma.

No geral, o protótipo consiste de um motor de pequeno porte, fabricado em polímero ABS em uma impressora 3D, o qual utiliza atuadores do tipo molas helicoidais de NiTi com memória de forma.

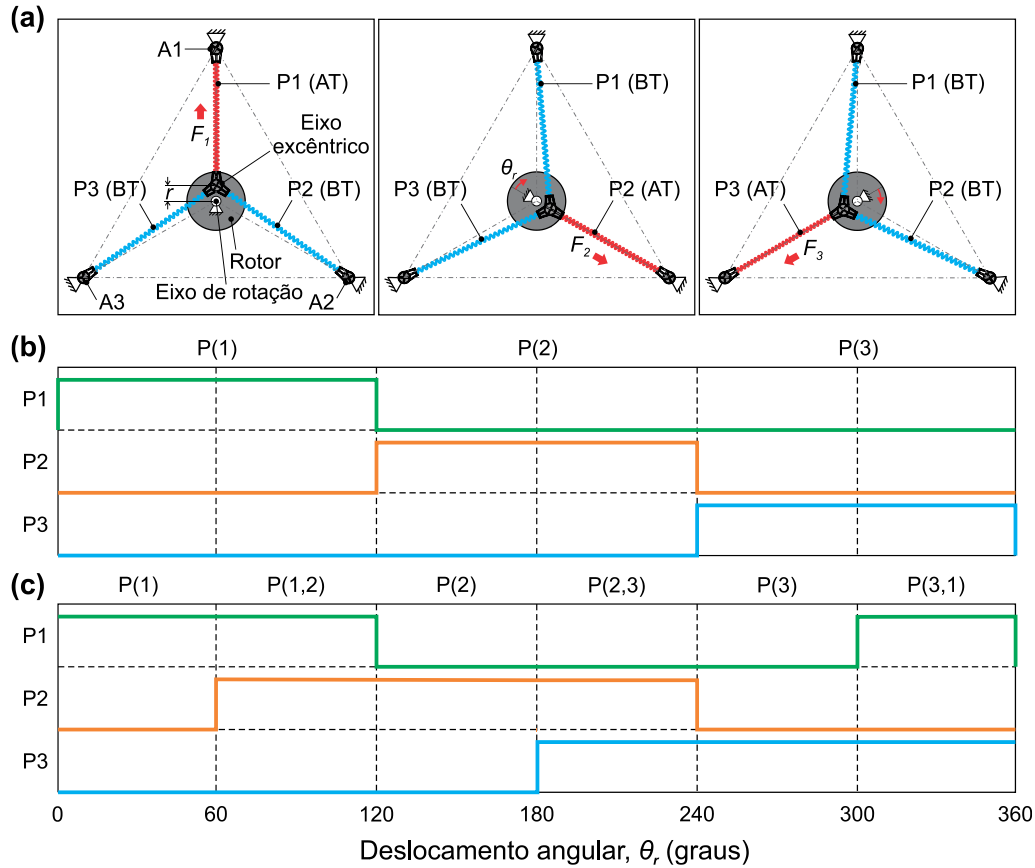
Nesta seção será apresentada a metodologia e os materiais empregados na elaboração desta dissertação. Inicialmente é apresentado o princípio de funcionamento do mecanismo baseado em um eixo excêntrico. Em seguida são descritos os ensaios realizados para a caracterização das molas de LMF. São apresentadas a metodologia utilizada nas modelagens analítica e numérica para a avaliação prévia do comportamento do atuador sem ativação elétrica. Posteriormente é mostrado projeto esquemático e o protótipo fabricado com todos os seus componentes. Finalmente é descrita a instrumentação eletrônica empregada para a obtenção dos resultados experimentais do motor rotativo.

3.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O mecanismo de rotação do motor consiste de um rotor com um eixo excêntrico para a geração de movimento baseado no mecanismo biela manivela. A força que move o eixo é resultado do acionamento das molas como está mostrado na Figura 15(a). O eixo excêntrico conecta uma das extremidades das três molas, enquanto que as outras extremidades estão conectadas a pinos externos (A1, A2 e A3) igualmente espaçados e separados por um arco de 120 graus. Um esquemático com a descrição da sequência de movimento é apresentado na Figura 15(a). A excentricidade (r) faz com que ao acionar as molas alternadamente o excêntrico descreva uma trajetória circular em relação ao eixo central de rotação. Nessa concepção do motor as peças que se movimentam são apenas os atuadores presos aos eixos e o eixo central acoplado a um rolamento. Dessa forma, a

montagem se torna mais simplificada tornando o motor mais compacto e menos ruidoso.

Figura 15 – (a) Princípio de operação do motor rotativo e seus respectivos acionamentos: (b) simples e (c) combinado.



Fonte: Autoria própria.

Os atuadores são molas helicoidais de LMF montadas sob tração e quando submetidos a um campo térmico adequado são capazes de se contrair e gerar força. Uma das vantagens da aplicação desses elementos de LMF é o acionamento silencioso através do aquecimento por efeito joule.

O acionamento das molas foi definido em função das fases P1, P2 e P3 demonstrado na Figura 15(a). A mola 1 (P1) ao ser submetida ao aquecimento, eleva sua baixa temperatura (BT) para alta temperatura (AT), e pelo efeito memória de forma (EMF) tende a se contrair gerando uma força F_1 . Essa força é transmitida ao pino excêntrico fazendo com que o rotor gire, idealmente, de 120 graus em relação a sua posição inicial. Ao ser desativada, a mola 1 retorna a sua fase inicial em baixa temperatura (BT) fazendo com que o sistema atinja uma nova posição de equilíbrio. A ativação individual posterior das molas 2 e 3, promove novamente rotações adicionais de 120 graus do rotor, o que ao final resulta em uma rotação completa de 360 graus do mecanismo.

A sequência de acionamento determina a forma do movimento (contínuo ou intermitente), sentido (horário ou anti-horário), velocidade e torque do motor. Os acionamentos podem ser realizados de forma simples (Figura.15(b)) no sentido horário (P1 – P2 – P3) e anti-horário (P1 – P3 – P2), de forma dupla (P1,2 – P2,3 – P3,1), ou combinando as duas formas (Figura 15(c)) com acionamentos de meio passo (P1 – P1,2 – P2 – P2,3 – P3 – P3,1). Embora na Figura 15 esteja apresentado um esquemático para um motor com três fases (topologia trifásica), é possível expandir esse mesmo princípio de operação para versões com n fases, onde esse número influenciará diretamente nos valores de toque e velocidade gerados pelo protótipo.

Com base nessa topologia apresentada (Figura 15(a)) é possível observar que as molas assumem duas posições limitantes correspondentes as deformações mínimas ($\varepsilon_{\min}$) e máxima ($\varepsilon_{\max}$) que definem a excentricidade r . A $\varepsilon_{\min}$ é obtida quando a mola atinge a máxima contração causada pelo aquecimento. Nessa posição a mola ativada entra em equilíbrio dinâmico com as molas desativadas e permanece nessa posição até que haja ativação de outra mola. Ao rotacionar o rotor em 180 graus em relação a sua posição inicial, a mola irá atingir a sua máxima deformação $\varepsilon_{\max}$. Assim, essa trajetória descrita pelo excêntrico é limitada pela variação dessa deformação sob carga (mola desativada) e pela recuperação da forma (mola ativada).

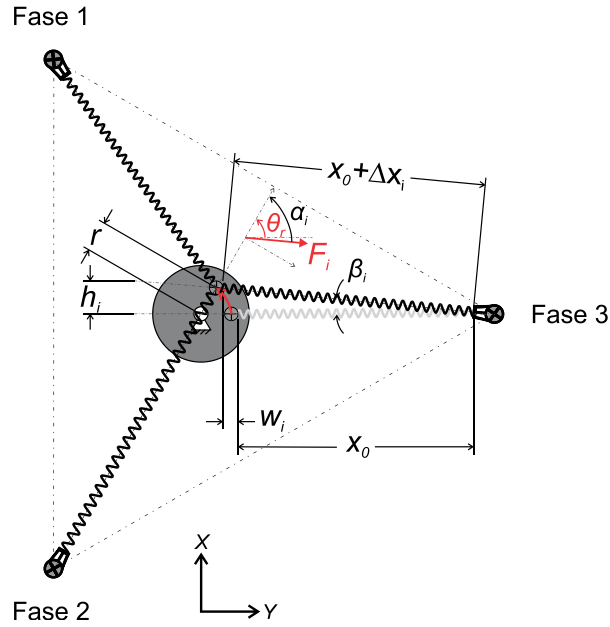
Os valores $\varepsilon_{\min}$ e $\varepsilon_{\max}$ dependem das características termomecânicas do elemento de LMF, sendo projetados para maximizar o potencial do EMF no atuador. Para definir esses limites foi necessária uma caracterização prévia do atuador através de ensaios termomecânicos que serão abordados mais adiante.

3.2 MODELAGEM ANALÍTICA

A partir da configuração geométrica do motor foi implementado um modelo dinâmico analítico simplificado para avaliar a performance do motor através de simulações. A não-linearidade do material e o comportamento histerético faz com que a utilização de modelos constitutivos aumente o custo computacional para a simulação do sistema. Ao definir a faixa de trabalho do atuador, é possível utilizar uma aproximação linear do comportamento histerético simplificando a modelagem do sistema.

Na Figura 16 é apresentado um esquemático contendo as variáveis que serão consideradas nas simulações.

Figura 16 – Modelo simplificado para análise dinâmica do motor.



Fonte: Autoria própria

Na posição inicial de cada fase, a mola encontra-se distendida de um comprimento x_0 . Ao acionar a mola o rotor é deslocado de um ângulo θ_r , fazendo com que a mola assuma um novo comprimento $x_0 + \Delta x_i$. A força de reação gerada pela mola, dado o posicionamento do rotor em posições angulares fixas, é responsável pela geração do torque de reação do sistema sem acionamento das molas por corrente elétrica. Essas forças F_i induzidas em cada mini-mola, em baixa (BT) ou em alta temperatura (AT), são dadas pelas seguintes equações:

$$F_i^{BT} = K_{LMF_BT} \times \Delta x_i \quad (1)$$

$$F_i^{AT} = F_i^{BT} + F_i^{\dot{U}TIL} \quad (2)$$

$$\Delta x_i = \sqrt{(x_0 + h_i)^2 + w_i^2} - x_0 \quad (3)$$

$$h_i = r \left\{ 1 - \cos \left[\theta_r + \frac{2\pi(n-i)}{n} \right] \right\} \quad (4)$$

$$w_i = r \sin \left[\theta_r + \frac{2\pi(n-i)}{n} \right] \quad (5)$$

onde K_{LMF_BT} representa a rigidez das molas em baixa temperatura e F_i^{UTIL} é a força útil gerada pelo aquecimento da mola. As distâncias w_i e h_i são as componentes horizontal e vertical da variação no comprimento (Δx_i) de cada fase, respectivamente.

Assim, os torques T produzidos pelas molas sobre o rotor são dados pelas equações:

$$T^{BT} = \sum_{i=1}^n r \times F_i^{BT} \times \sin \alpha_i \quad (6)$$

$$T^{AT} = \sum_{i=1}^n r \times F_i^{AT} \times \sin \alpha_i \quad (7)$$

$$\alpha_i = \theta_r + \beta_i - \frac{2\pi}{n}i \quad (8)$$

$$\beta_i = \tan^{-1} \left\{ \frac{r \sin \left[\theta_r + \frac{2\pi(n-i)}{n} \right]}{x_0 + r \cos \left[\theta_r + \frac{2\pi(n-i)}{n} \right]} \right\} \quad (9)$$

onde α_i é o ângulo formado entre as linhas de ação da força F_i e do raio r , β_i é o ângulo dado pela oscilação da mola em torno do seu eixo longitudinal, e $\frac{2\pi(n-i)}{n}$ representa a defasagem entre cada fase.

Nas simulações realizadas a partir dessas equações, as forças e os torques produzidos foram avaliados para as molas M9, M12 e M15 para os casos onde elas estão ativadas e desativadas. Além disso, é verificada a influência do número de fases no sistema. Os parâmetros empregados nas simulações do modelo dinâmico foram obtidos a partir da caracterização da mola que será apresentada.

3.3 MODELAGEM NUMÉRICA

O método dos elementos finitos (*Finite Element Method – FEM*) foi empregado nas análises numéricas do atuador utilizando o software comercial ANSYS®. As simulações foram implementadas de três formas distintas: na primeira e na segunda foram utilizados modelos constitutivos provenientes dos materiais com memória de forma; na

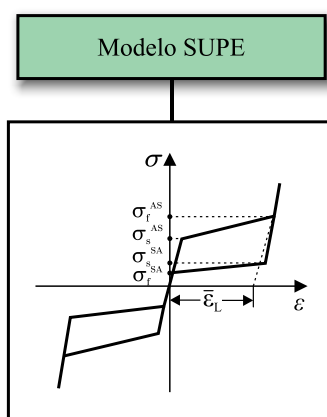
terceira foi empregado um modelo específico de um elemento não-linear. O objetivo dessas simulações foi verificar qual modelo que melhor representaria o comportamento das molas de LMF com menor tempo de solução. O modelo mais adequado foi adotado para simular o comportamento dinâmico do motor com as três molas acopladas.

Os modelos constitutivos das LMF disponíveis no software ANSYS® foram propostos por Ferdinando Auricchio, sendo eles: o modelo da superelasticidade – SUPE – e o modelo do efeito memória de forma – SME, discutidos a seguir. As siglas SUPE e SME foram mantidas da forma como estão presentes no software ANSYS®.

3.3.1 Modelo SUPE

O modelo SUPE, baseado nos trabalhos de Auricchio (2001); Auricchio *et al.* (2009); Auricchio e Taylor (1997), consiste em um robusto e eficiente algoritmo utilizado para representar o regime da superelasticidade das LMF para um estado de tensão uniaxial. As principais suposições desse modelo são: a transformação de fase ocorre somente devido a aplicação de tensão uniaxial; não considera o processo de reorientação da martensita não-maclada; considera o processo como isotrópico e não dependente da taxa de carregamento; e por fim considera constantes o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e os coeficientes de dilatação térmica durante todo o processo de transformação de fase. Na Figura 17 podem ser observados o diagrama tensão-deformação isotérmico idealizado para o comportamento superelástico. Na Tabela 2 estão presentes os seis parâmetros de entrada necessários para a simulação do fenômeno, obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados no presente trabalho.

Figura 17 – Diagrama tensão *versus* deformação representando o fenômeno da superelasticidade.



Fonte: Adaptado de Auricchio *et al.* (2009).

Tabela 2 – Parâmetros de entrada do modelo SUPE proposto por Auricchio *et al.* (2009) obtidos pelos ensaios em $T_{amb} \approx 27^{\circ}C$.

Parâmetros	Descrição	Valores
E_A (MPa)	Módulo de Young da Austenita	80000
ν	Coefficiente de Poisson	0,3
σ_s^{AM} (MPa)	Tensão de início da transformação direta	560
σ_f^{AM} (MPa)	Tensão final da transformação direta	1050
σ_s^{MA} (MPa)	Tensão de início da transformação inversa	430
σ_f^{MA} (MPa)	Tensão final da transformação inversa	320
ε_L	Máxima deformação de transformação	0,07
α	Parâmetro de diferenciação entre carregamento sob tração e compressão	0

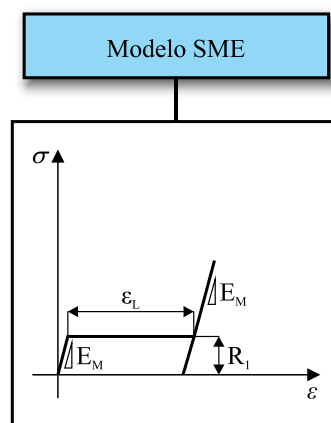
Fonte: Autoria própria

3.3.2 Modelo SME

O modelo SME, proposto em Auricchio *et al.* (2009); Auricchio e Petrini (2002), foi baseado no modelo termodinâmico 3D de Souza, Mamiya e Zouain (1998), desenvolvido a partir da teoria do potencial para a energia livre de Helmholtz. Dentro da estrutura clássica da termodinâmica o modelo pode reproduzir todas as principais funções da LMF em um estado 3D de deformação para as transformações de fase em estado sólido induzidas por deformação. A resposta para o carregamento e descarregamento mecânico para um estado de tensão uniaxial varia de acordo com a temperatura a qual o material é

submetido. Uma das vantagens é que o modelo SME pode representar o regime da superelasticidade desde que a temperatura de análise seja adequadamente selecionada. Na Figura 18 pode ser verificado o diagrama simplificado para a pseudoplasticidade que compõe o efeito memória de forma. Na Tabela 3 são apresentados os sete parâmetros de entrada utilizados na simulação do efeito. Assim como no modelo SUPE, os valores presentes na tabela para o modelo SME também foram obtidos a partir dos ensaios experimentais realizados no presente trabalho.

Figura 18 – Diagrama tensão *versus* deformação representando o fenômeno da pseudoplasticidade presente no efeito memória de forma descrito por Auricchio *et al.* (2009).



Fonte: Adaptado de Auricchio *et al.* (2009).

Tabela 3 – Parâmetros de entrada do modelo SME proposto por Auricchio *et al.* (2009)

Parâmetros	Descrição	Valores
E_A (MPa)	Módulo de Young da Austenita	80000
ν	Coefficiente de Poisson	0,3
h (MPa)	Parâmetro de endurecimento	4500
T_o (K)	Temperatura de referência	250
R (MPa)	Limite Elástico	100
β (Mpa/K)	Parâmetro de escalamento com a temperatura	6,8
E_M (MPa)	Módulo de Young da Martensita	65000
ϵ_L	Máxima deformação de transformação	0,07
m	Parâmetro de dependência de Lode	0

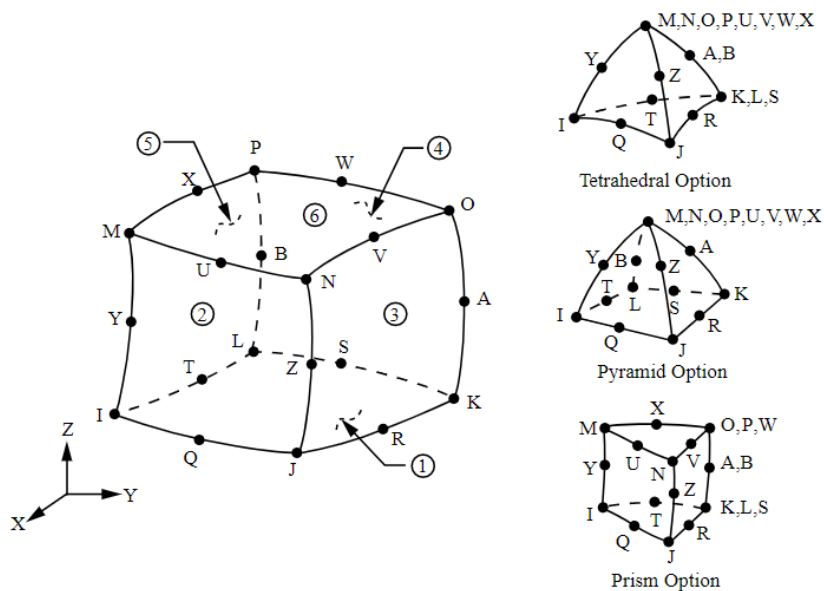
Fonte: Autoria própria

3.3.3 Simulação empregando o SUPE e o SME

3.3.3.1 Elemento finito empregado

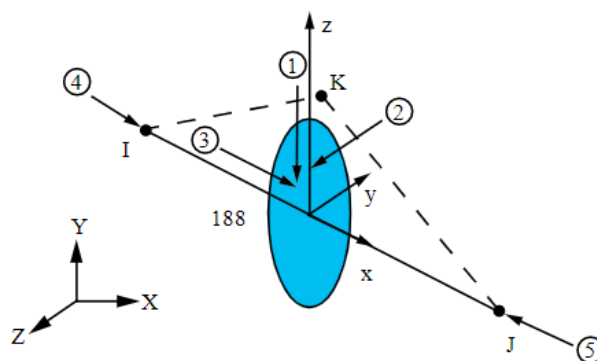
Inicialmente foram analisadas duas possibilidades para o elemento a ser empregado: o SOLID186 e o BEAM188. O SOLID186 é um elemento finito de alta ordem que exibe comportamento quadrático, possui 20 nós com 3 graus de liberdade translacionais por nó nos eixos X, Y e Z (ANSYS®, 2015). A geometria deste elemento está presente na Figura 19. Já o BEAM188 é um elemento tipo viga usado para modelar estruturas com espessura fina ou moderada, possui 2 nós com 6 graus de liberdade, 3 rotacionais e 3 translacionais nos eixos X, Y e Z (ANSYS®, 2015). Sua parametrização é exibida na Figura 20.

Figura 19 – Geometria nodal do elemento SOLID186.



Fonte: ANSYS® (2015).

Figura 20 – Geometria nodal do elemento BEAM188.



Fonte: ANSYS® (2015).

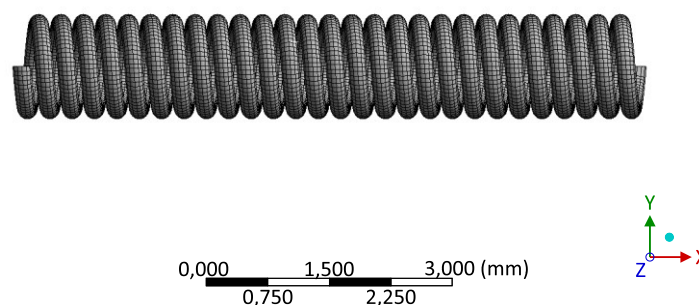
Seria interessante utilizar o elemento BEAM188 por possuir um número menor de nós, o que diminuiria o tempo das simulações, mas esse elemento apresentou algumas limitações. Ambos os elementos podem ser empregados para a implementação do modelo SME, mas somente o elemento SOLID186 pode ser utilizado nas simulações para o modelo SUPE. Além disso, mesmo no modelo SME, o elemento BEAM188 apresentou problemas de convergência. Assim o SOLID186 foi adotado para todas as simulações.

3.3.3.2 Malha

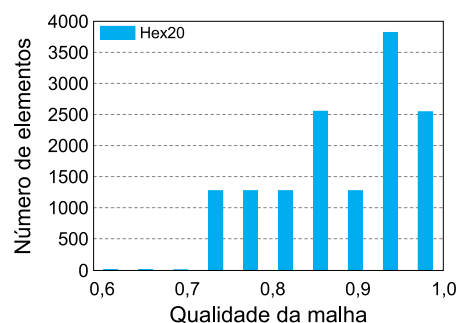
Na Figura 21(a) é apresentada a mola com a malha gerada no ANSYS® para as simulações empregando os modelos SUPE e SME, que utilizam o elemento SOLID186. Considerando a força de reação gerada, pela aplicação de um deslocamento sobre uma das extremidades da mola, a convergência do resultado foi obtida para uma malha com 14003 elementos na forma hexaédrica (Hex20) com 73876 nós. Apesar de apresentarem a mesma malha, a quantidade de subpassos para a convergência da força empregando o modelo SME é superior ao modelo SUPE devido a maior complexidade de parâmetros.

Figura 21 – (a) Malha utilizada nas simulações empregando os modelos SUPE e SME. (b) Métrica para a avaliação da qualidade da respectiva malha.

(a)



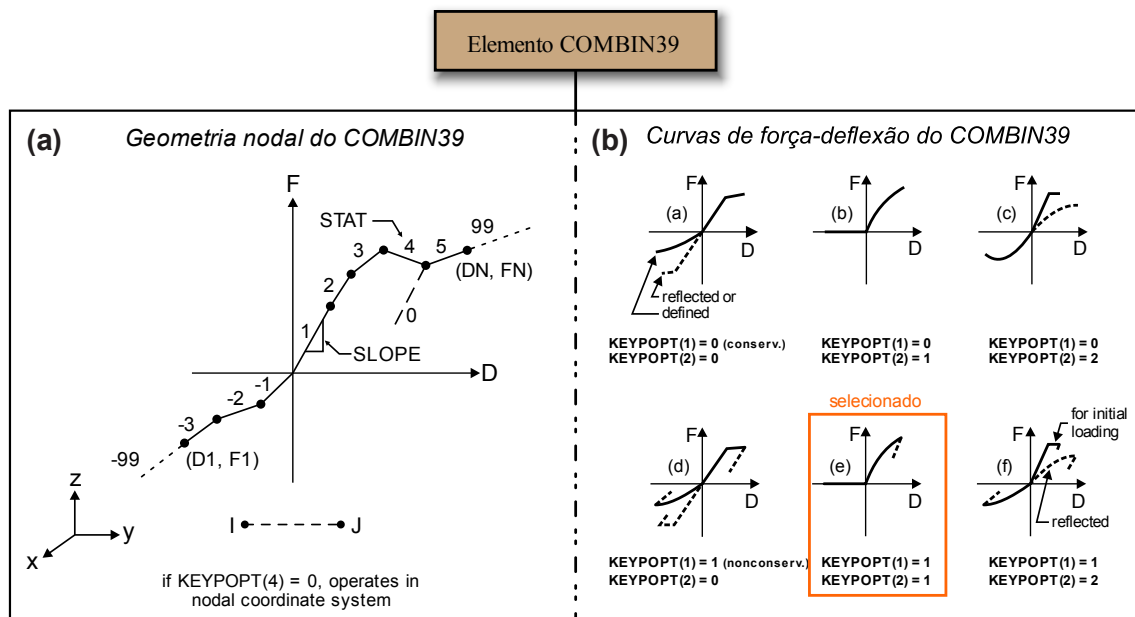
(b)



Fonte: Autoria própria

A qualidade da malha (*Mesh quality*) foi a métrica empregada para avaliar a qualidade dos elementos gerados nesse processo. Os valores variam entre 0 e 1, em que 0 indica que o elemento tem volume zero ou negativo, e 1 indica que o elemento tem o formato de um cubo perfeito. Pela Figura 21(b) é observado que cerca de 99,9% dos elementos possuem um fator de qualidade maior que 0,7, representando uma malha adequada para as simulações de acordo com o próprio ANSYS® (2015). Além disso, algumas condições foram habilitadas para considerar soluções não-lineares para o problema.

Uma solução alternativa aos modelos constitutivos de LMF disponíveis foi testada utilizando o elemento COMBIN39. Esse elemento tem comportamento de força-deflexão não-linear generalizado (Figura 22(a)) que pode ser usado em diversos tipos de análises. Possui capacidade de deformação longitudinal e de torção em aplicações 1-D, 2-D ou 3-D. Esse elemento está automaticamente incorporado a uma mola padrão gerada pelo próprio ANSYS®.

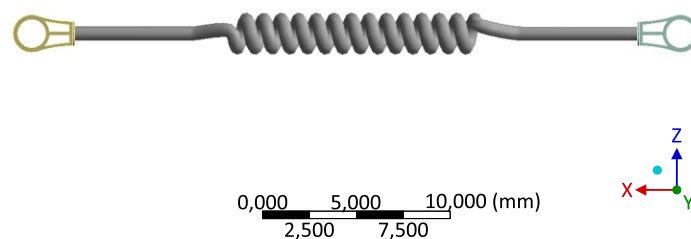


Como observado na Figura 22(b), esse elemento pode ser empregado para a representação de seis comportamentos força-deflexão distintos, sendo eles carregamentos lineares, não-lineares ou histeréticos, tanto em tração quanto em compressão. Essas funções são controladas internamente pelo comando KEYPOPT. Dentre eles temos: KEYPOPT(1) que controla a forma do descarregamento; KEYPOPT(2) que controla a compressão; KEYPOPT(3) que define os graus de liberdade em 1-D; e KEYPOPT(4) que define os graus de liberdade em 2-D ou 3-D. Nessa mesma imagem (Figura 22(b)) pode ser verificado o comportamento selecionado para as análises nesse trabalho. Com isso, os comandos KEYPOPTS (1) e (4) foram habilitados para considerar o descarregamento histerético e os graus de liberdade em X, Y e Z, respectivamente; enquanto que o comando KEYPOPT (2) é desabilitado já que não há compressão do atuador.

Como esse comportamento selecionado para o COMBIN39 leva em consideração efeitos não-lineares e histeréticos, os dados de entrada são inseridos na forma de tabela contendo os vários valores de força (N) e deflexão (mm) em diversos pontos da curva experimental de força-deflexão da mola de LMF.

A mola da Figura 23 é gerada no software pela seleção de pontos nas extremidades dos olhais e tem como padrão para a modelagem o elemento COMBIN39.

Figura 23 – Mola gerada automaticamente nas simulações empregando o elemento COMBIN39.



Fonte: Autoria própria

3.4 CONCEPÇÃO DO PROTÓTIPO

3.4.1 Mini-molas de LMF

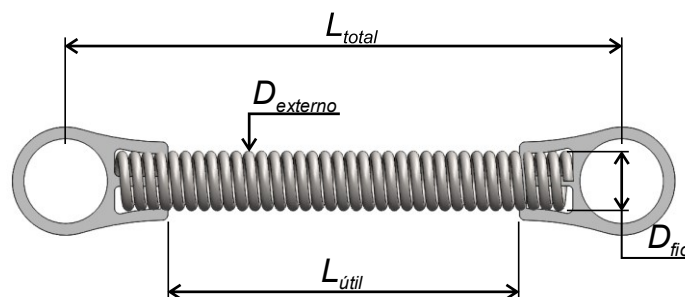
Tipicamente as LMF são utilizadas de forma ativa sob regime de memória de forma ou em aplicações passivas sob regime de superelasticidade. No entanto, esses dois

efeitos existem juntos e são combinados nas molas empregadas no trabalho. A contribuição de cada efeito depende das condições de carga e temperatura a que o atuador estiver submetido.

Um efeito pouco explorado é o EMF a partir da martensita induzida por tensão. Esse efeito pode ser observado em materiais superelásticos, ou seja, austeníticos na temperatura ambiente. Nessas condições, quando submetidos a carga induzem a formação de martensita por tensão, e ao ser aquecido a uma temperatura superior a transformação final de austenita (A_f), o material retorna ao estado de deformação inicial (LOPES; STEFFEN; SAVI, 2016). Sendo assim, o elemento LMF pode ser aplicado de forma combinada (ativa e passiva) alterando apenas as condições de carga e temperatura.

Com base nisso, os atuadores empregados foram mini-molas de LMF de NiTi com temperatura final de transformação austenítica $A_f \approx 17^\circ\text{C}$ sob deformação nula, sendo assim, superelásticas à temperatura ambiente ($T_{amb} \approx 27^\circ\text{C}$). Foram analisadas três molas de tamanhos diferentes: M9, M12 e M15, sendo o “M” designação do fabricante e o número posterior equivalente a distância entre centro dos olhais, com comprimentos úteis de 4,5; 7,5 e 10,5 mm, totalizando 20,5; 27 e 33,5 espiras ativas, respectivamente. Todas as molas possuem 1,27 mm de diâmetro externo fabricadas com fios de 0,22 mm de diâmetro. Na Figura 24 são apresentados os principais parâmetros geométricos para essas molas. O fenômeno da superelasticidade em conjunto com a geometria de mola contribuem para que o atuador possa sofrer deformações de até 600% do seu comprimento útil sem apresentar plasticidade.

Figura 24 – Principais dimensões (em mm) da mola de LMF.



Fonte: Autoria própria

Esses atuadores são originalmente desenvolvidos para aplicações passivas (estáticas) na temperatura ambiente com a $A_f \approx 17^\circ\text{C}$. Para a análise do EMF a partir da martensita induzida por tensão é necessário identificar as condições de início e fim de cada transformação de fase sob carga (Austenita $\rightarrow$ Martensita e Martensita $\rightarrow$ Austenita).

A variedade de parâmetros, não-linearidade e histerese são características intrínsecas do material com memória de forma e dependem do histórico da liga. Portanto, é necessária uma caracterização eletro-termomecânica do atuador. Essa caracterização usualmente é realizada por meio de ensaios de tração isotérmicos, ensaios de resistência elétrica em função da temperatura e ensaios de geração de força. Como as molas M9, M12 e M15 são fabricadas pelo mesmo fio de NiTi, os resultados em função da deformação de cada mola são equivalentes.

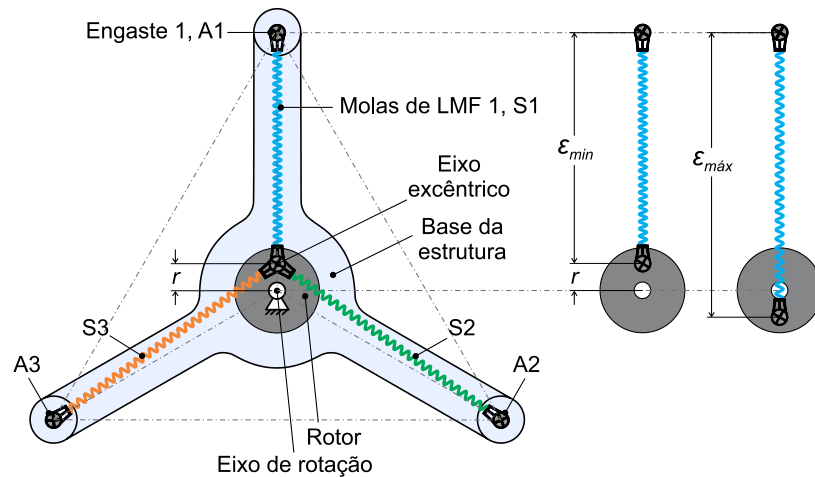
Para definição das dimensões da estrutura foi necessário o conhecimento das características das molas helicoidais de LMF de NiTi. Essas características foram obtidas a partir da completa caracterização do atuador englobando parâmetros mecânicos, térmicos e elétricos e serão apresentados na seção dos resultados.

A escolha deste atuador tipo mola foi fundamentada principalmente no fato de serem bastante pequenos, leves e com capacidade de deslocamentos de até 600% do seu tamanho original sem sofrer deformações plásticas. Isso permite um projeto de um protótipo de tamanho reduzido. Estas molas foram projetadas para trabalharem passivamente sob força constante a temperatura ambiente, com isso não há problemas em serem mantidas deformadas na estrutura do atuador na condição de repouso.

3.4.2 Projeto da estrutura

Na Figura 25 é apresentado o esquemático do atuador rotativo com a identificação dos principais componentes e dimensões utilizados para a sua fabricação. Nessa concepção, o número mínimo de fases adotadas (molas de LMF – S1, S2 e S3) deve ser três para que o rotor gire em 360 graus após a ativação sequencial das molas, visto que idealmente elas estão defasadas de 120 graus entre si. Na posição inicial de 0 graus, a mola está então deformada de ε_{min} . A máxima deformação $\varepsilon_{máx}$ imposta sobre a mola ocorre quando o rotor é rotacionado em 180 graus a partir da posição inicial citada.

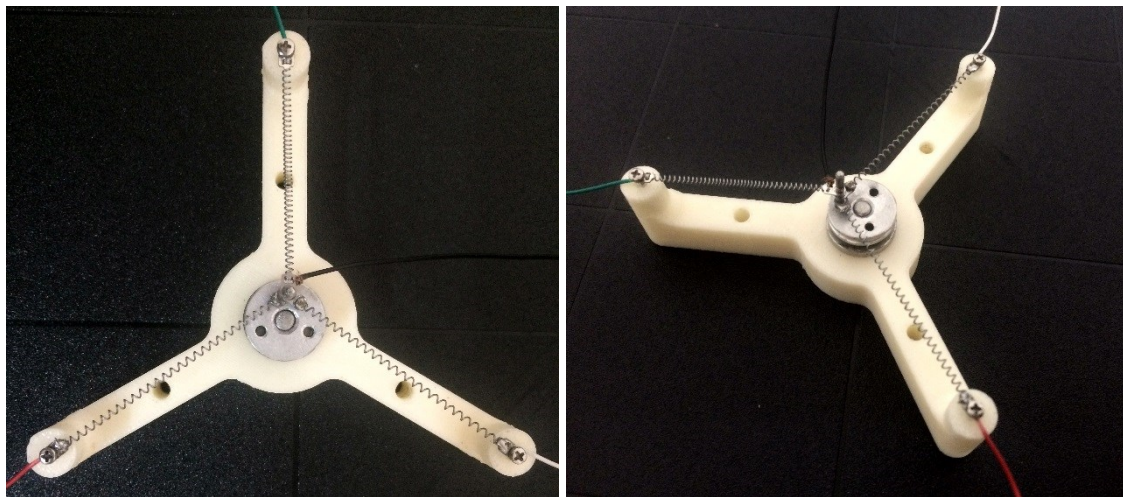
Figura 25 – Esquemático do motor rotativo contendo os principais parâmetros e dimensões geométricas.



Fonte: Autoria própria

Para este trabalho, foi adotada a topologia trifásica e o protótipo fabricado/montado pode ser observado na Figura 26. A base da estrutura do motor foi impressa em polímero ABS. Um minirolamento foi usado para acoplamento do eixo do motor ao pino de apoio dos olhais das minimolas. Depois de montado completamente o dispositivo ficou com uma massa de aproximadamente 11 gramas. A simplicidade na montagem da estrutura permite a reprodutibilidade do protótipo.

Figura 26 – Motor fabricado e montado com atuadores do tipo molas helicoidais de NiTi: (a) vista superior e (b) vista isométrica.



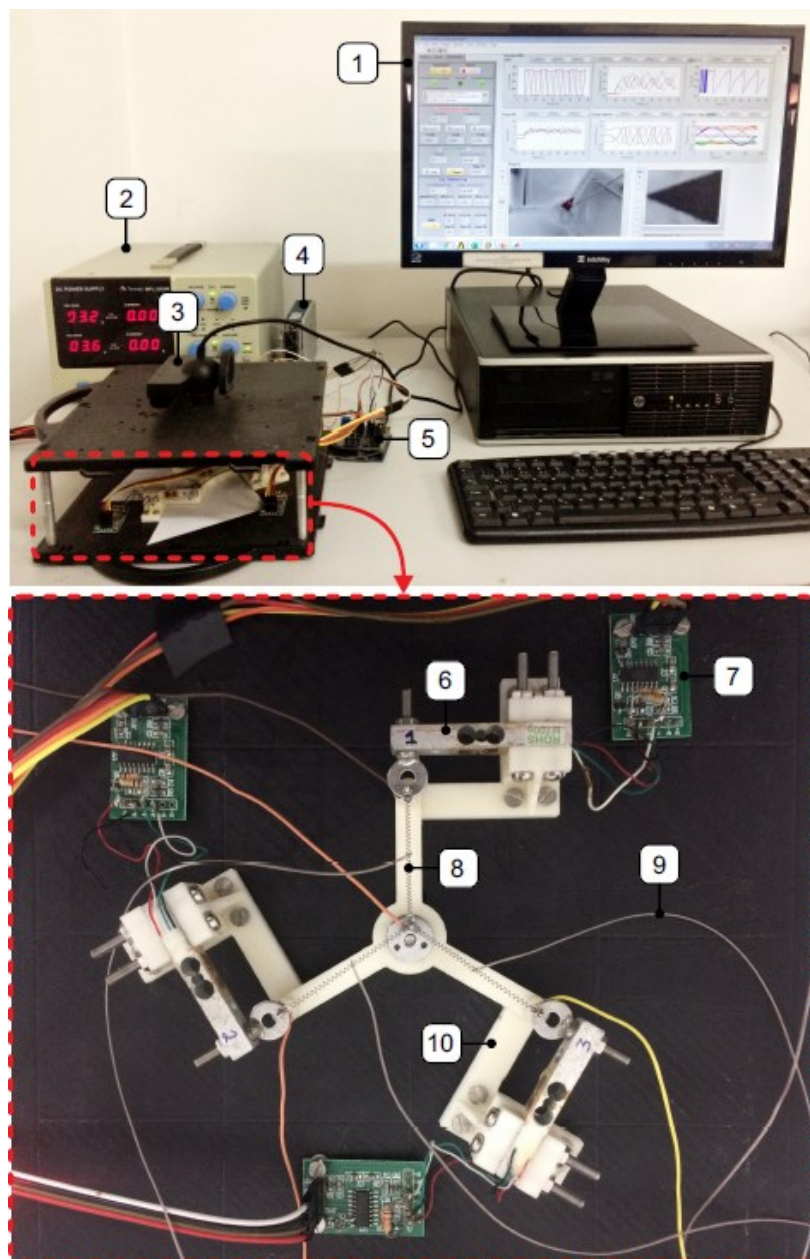
Fonte: Autoria própria

3.5 INSTRUMENTAÇÃO ELETRÔNICA

Na Figura 27 é apresentada a montagem experimental com a instrumentação eletrônica desenvolvida para a obtenção dos resultados de respostas sem acionamentos e também durante os acionamentos por corrente elétrica do motor. Na imagem são destacados: o computador (1) com a rotina para a coleta dos dados e acionamento do motor implementada no software LabVIEW®; a fonte de tensão elétrica (2) que alimenta os circuitos de corrente para a ativação das molas; a câmera (3) para captura do deslocamento angular durante a rotação do motor; o dispositivo de aquisição de temperatura (4) com os termopares (9); o microcontrolador (5) para o controle da corrente elétrica sobre os atuadores; as células de cargas (6) com os circuitos condicionadores de sinais (7); as molas de LMF (atuadores) (8); e o protótipo do motor proposto (10).

As correntes elétricas fornecidas as molas de LMF são controladas por sinais gerados no microcontrolador. Os circuitos integrados CAT4101 foram utilizados como drivers de corrente para acionamentos das molas de LMF. Termopares do tipo K foram utilizados como sensores de temperatura nas molas com os sinais capturados pela placa de aquisição NI 9213 da National Instruments. Uma câmera foi utilizada como sensor para a medição do deslocamento angular sem contato com eixo motor. Desse modo, o sensor de rotação não introduz força de atrito no movimento. A captura e o processamento das imagens foram realizados na própria rotina. Para a obtenção das forças e dos torques gerados pelo protótipo foram utilizadas três células de cargas, cada uma com capacidade máxima de 10 N condicionadas pelo circuito integrado HX711. O microcontrolador foi adequadamente configurado para enviar e receber dados dos circuitos CAT4101 e HX711, respectivamente, através de uma interface serial com o LabVIEW®.

Figura 27 – Aparato experimental empregado para a obtenção dos resultados de respostas experimentais do motor proposto.



Fonte: Autoria própria

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

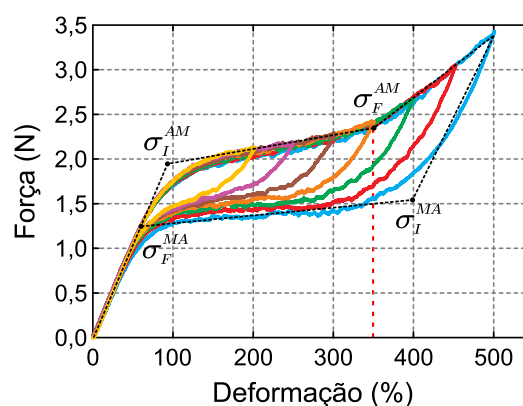
Neste capítulo serão apresentados os resultados referentes a caracterização das molas de LMF, indispensável no projeto do atuador; os resultados para a modelagem analítica; as comparações entre os modelos numéricos adotados para a implementação da modelagem numérica de todo o mecanismo com os atuadores acoplados; e por fim os resultados experimentais para a caracterização do motor rotativo proposto.

4.1 CARACTERIZAÇÃO ELETRO-TERMOMECÂNICA DAS MOLAS

Inicialmente foram realizados ensaios de tração quase-estáticos e isotérmicos a temperatura ambiente ($\approx 27\text{ }^{\circ}\text{C}$) para determinar os limites de deformação correspondentes ao início e fim das transformações de fase, assim como para avaliar a histerese do atuador durante o ciclo de carga e descarga mecânica.

Na Figura 28 são apresentadas essas curvas isotérmicas de carregamento e descarregamento mecânico quase-estático para a avaliação da relação força/deformação e histerese da mola de LMF.

Figura 28 – Ensaios de tração uniaxiais isotérmicos para a avaliação do comportamento mecânico da mola de LMF entre 200% e 500% de deformação.



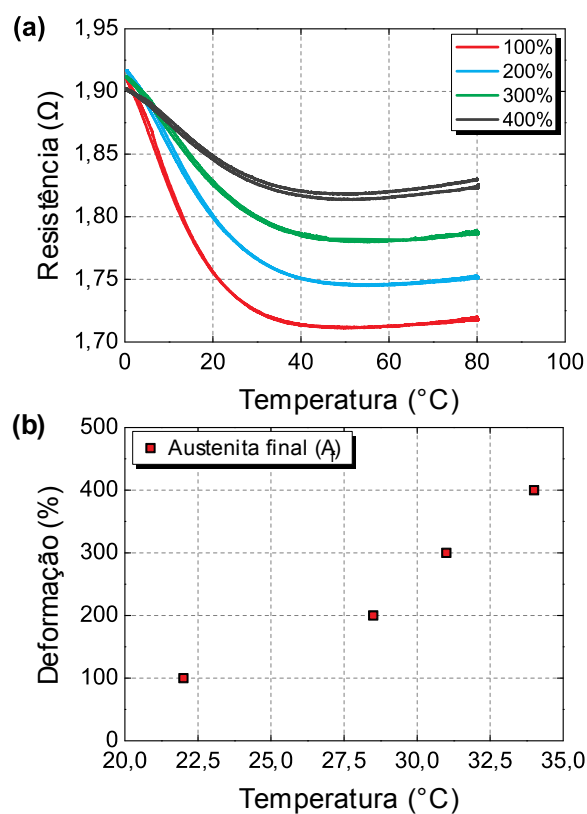
Fonte: Autoria própria

O atuador foi solicitado a carga e a descarga com deformações de 200% a 500% com incremento de 50% a cada ciclo. Como o elemento se encontrava sob o regime superelástico, a carga mecânica aplicada provocou a indução da fase martensita orientada

por tensão mecânica. Pelas curvas é verificado que essa fase é completamente induzida em torno de 350% (linha vermelha tracejada) de deformação determinada pelo método das tangentes. Para evitar a fadiga prematura do efeito memória de forma assim como a fadiga mecânica da mola, foi limitada a deformação máxima sobre o atuador a 400%.

Em seguida foram realizados ensaios de resistência elétrica em função da temperatura (Figura 29(a)) para determinar as temperaturas finais da Austenita (A_f) sob diferentes deformações.

Figura 29 – (a) Curvas de resistência elétrica *versus* temperatura. (b) Temperaturas de Austenita final obtidas a partir das respectivas curvas.

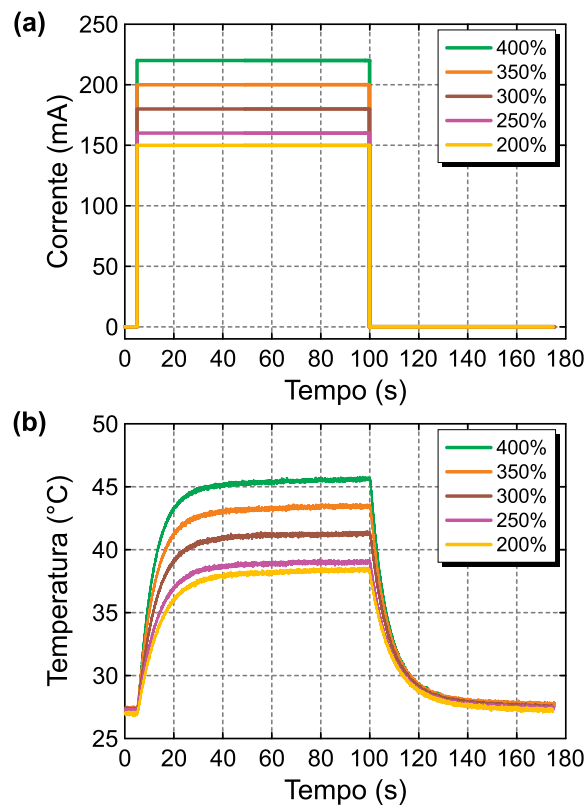


Fonte: Autoria própria

As molas pré-deformadas entre 200 e 400% foram imersas em um banho termo regulável, aquecidas e resfriadas entre 0 a 80 °C, medindo o valor da resistência elétrica em função da temperatura. Essas temperaturas foram determinadas aplicando o método das tangentes consolidado por Lagoudas (2008). Com esse método as temperaturas A_f obtidas foram de 28,5; 29,7; 31; 32,5 e 34 °C para as deformações de 200%, 250%, 300%, 350% e 400%, respectivamente (Figura 29(b)).

Essas temperaturas foram utilizadas como parâmetros para a realização dos ensaios de resposta térmica à passagem de corrente elétrica sobre a mola. O objetivo desses ensaios foi determinar os valores das amplitudes dos pulsos de corrente elétrica que promovessem o aquecimento do atuador até temperaturas de $A_f + 10\text{ °C}$ em regime permanente. A determinação desses valores de corrente elétrica é fundamental para que se garanta a mudança de fase sem que haja um superaquecimento do material. A plastificação pode ocorrer em aquecimentos em que a temperatura supere em no mínimo 40 °C a temperatura de A_f . Esses resultados são apresentados nas Figuras 30(a) e (b), e podem ser observados que as amplitudes de corrente encontradas foram de 150, 160, 180, 200 e 220 mA para as respectivas deformações analisadas.

Figura 30 – (a) Sinais de corrente elétrica fornecidos à mola de LMF sob diferentes deformações. (b) Respostas térmicas para os sinais de corrente fornecidos.



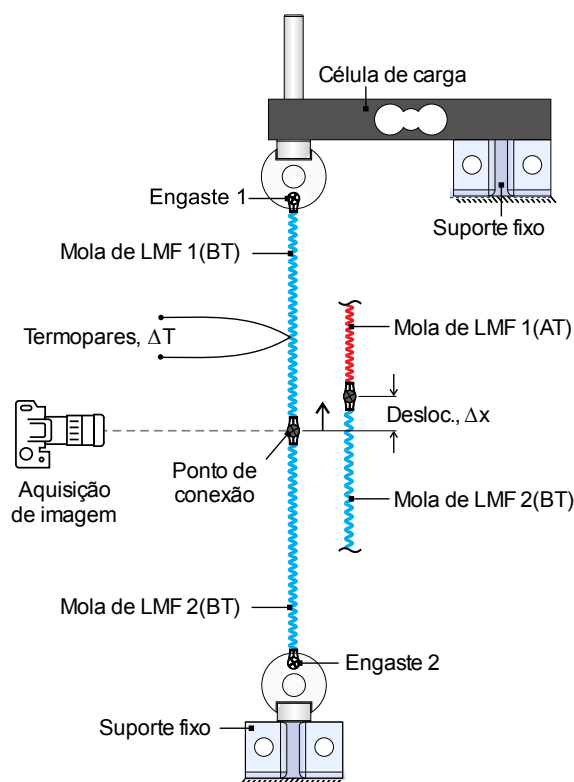
Fonte: Autoria própria

Em geral os atuadores de LMF sob o EMF são utilizados para dois propósitos: gerar força ou trabalho. Quando se deseja gerar força o material deve ser mantido sob deformação constante enquanto é submetido ao aquecimento. Se o objetivo é gerar trabalho, o material deve ser deformado e posteriormente aquecido para recuperar essa

deformação. No entanto em função da dependência entre tensão mecânica, deformação e temperatura, o trabalho gerado pelas molas pode ser otimizado.

Para aumentar a velocidade de retorno e a frequência de atuação da LMF, usualmente se utiliza uma mola passiva para forçar o retorno do material ao estado deformado por aplicação de carga. Esta velocidade pode ser incrementada utilizando molas de LMF na configuração antagônica e acionadas de forma alternada (SPAGGIARI; SPINELLA; DRAGONI, 2013; SPINELLA; DRAGONI, 2009).

Figura 31 – Esquemático referente ao aparato experimental para análise das respostas antagônicas.



Fonte: Autoria própria

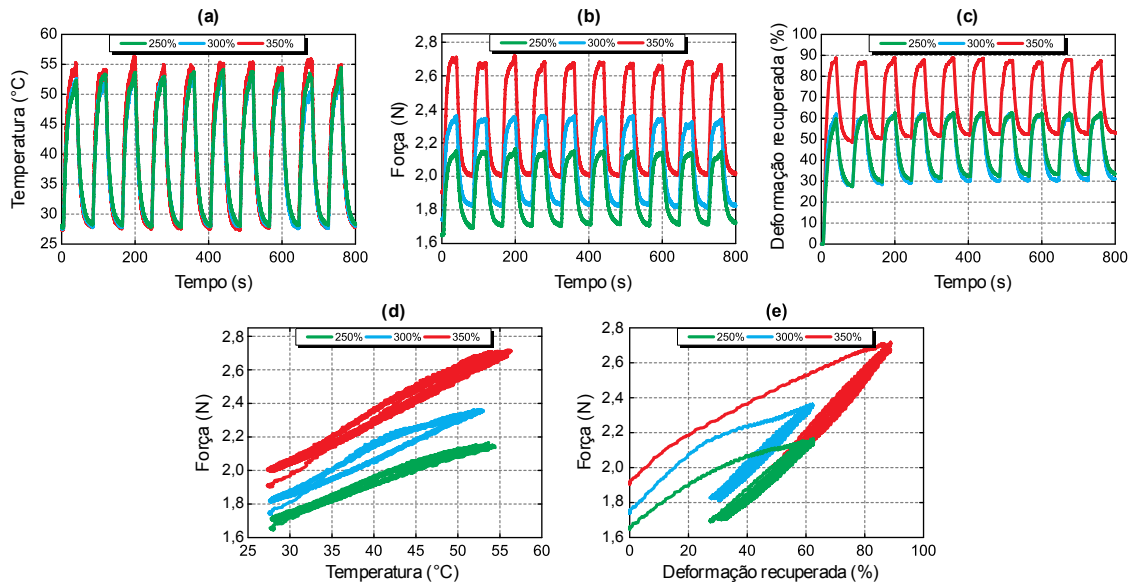
Nesta configuração (Figura 31), uma mola é posta atuando no sentido contrário a outra. A mola de LMF 1 quando ativada (AT) se contrai gerando trabalho e a mola de LMF 2 é deformada passivamente em baixa temperatura (BT) na região do platô (força quase constante), oferecendo uma resistência a deformação menor do que se utilizada molas de aço ou equivalentes (força cresce linearmente). Além disso, ao inverter o acionamento ativando a mola 2, neste caso, a mola 1 será forçada a retornar pela aplicação de carga que a deforma passivamente enquanto ela resfria por convecção natural (AT→BT). Portanto, na configuração antagônica as molas trabalham tanto sob o efeito SE (mola passiva) quanto sob o EMF (mola ativa).

A capacidade de recuperação da deformação e consequente geração de trabalho estão relacionados com a combinação desses dois efeitos e essa avaliação foi obtida utilizando uma bancada experimental representada pelo esquemático da Figura 31.

Nesses ensaios as molas foram dispostas de forma antagônica em série sob deformação de 250 a 350% com passo de 50%. Para estes ensaios as molas não foram testadas sob a deformação de 200% por não induzir martensita suficiente para reversão e nem sob 400% devido a deformação sobre a mola passiva ultrapassar o limite estipulado. A máxima contração da mola foi obtida acionando com pulsos de correntes, análogos aos apresentados na Figura 30(a), os quais aqueceram a mola de LMF produzindo os sinais de temperatura observados na Figura 32(a). Após cessar o aquecimento, a mola foi submetida ao resfriamento por convecção natural sob carga passiva da mola antagônica. As deformações de ambas as molas foram obtidas monitorando o ponto de conexão entre elas utilizando uma câmera e o processamento de imagem. Foram também monitoradas as temperaturas do ambiente e da mola 1 por meio de termopares tipo K, assim como a força resultante gerada através de uma célula de carga de no máximo 10 N.

Nas Figuras 32(a), (b) e (c) podem ser observadas as respostas de temperatura, força e deformação recuperada para 10 ciclos de aquecimento e resfriamento da mola 1. Os sinais de corrente fornecidos às molas de LMF possuem um período de 80 s, visto que o tempo em que o sinal de corrente permanece em amplitude máxima é de 36 s, equivalente a 45% do período. A máxima variação de força gerada (ΔF) após o primeiro ciclo de aquecimento foi de 0,71 N para a deformação inicial de 350%, resultando em uma recuperação de deformação ($\Delta \epsilon$) de aproximadamente 40%. Esses resultados também podem ser observados pelas curvas de histereses entre força e temperatura na Figura 32(d) e entre força e deformação recuperada na Figura 32(e). Sob esta deformação inicial e a temperatura ambiente, o material está 100% na fase martensita maximizando o EMF e a recuperação pela transformação de fase após um aquecimento acima de A_f .

Figura 32 – Respostas de (a) temperatura, (b) força e (c) deformação recuperada para os ensaios das molas na configuração antagônica da Figura 31. Destaque para os comportamentos histeréticos entre (d) força e temperatura; e entre (e) força e deformação recuperada.



Fonte: Autoria própria

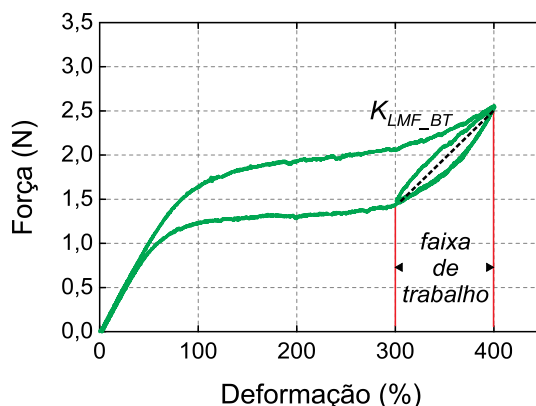
Considerando o comportamento termomecânico obtido a 350% de deformação, foram definidas as dimensões geométricas para os projetos das estruturas dos motores rotativos empregando as molas M9, M12 e M15. Baseado nas respostas antagônicas, a distância entre os pontos de engastes (A1, A2 e A3) e o centro do eixo de rotação (Figura 25) foi definida em 24,75; 38,25; 51,75 mm que correspondem a soma da deformação de 350% do comprimento útil e do comprimento total inicial não deformado de 9, 12 e 15 mm das molas M9, M12 e M15, respectivamente.

A deformação recuperada pela mola sob 350% de deformação foi admitida como parâmetro para a definição do raio r do eixo excêntrico. Portanto, limitou-se $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ a 400% e $\varepsilon_{m\acute{i}n}$ a 300% visando uma maior vida útil do elemento (Figura 25). Assim o raio do mecanismo de rotação do motor definido para as molas M9, M12 e M15 foram de 2,25; 3,75 e 5,25 mm, respectivamente, correspondentes a 50% do comprimento útil das molas.

Considerando que o atuador irá funcionar a partir de uma pré-carga com deformação de 300%, foram realizados ensaios de carga e descarga isotérmicos em baixa temperatura (BT) afim de verificar o comportamento histerético na região de trabalho definida (Figura 33). Nessa faixa de deformação as molas apresentam um comportamento com valores de rigidez diferentes e não-lineares entre a carga e a descarga. No entanto, esse comportamento pode ser simplificado por aproximações lineares (K_{LMF_BT}) resultando em valores de rigidez de 0,2593; 0,1556 e 0,1111 N/mm para as molas M9,

M12 e M15, respectivamente, com valores de 0,91 para o índice estatístico R^2 . Esses valores de rigidez foram determinados na faixa de trabalho, destacada na Figura 33.

Figura 33 – Comportamento histerético da mola de LMF na região de trabalho adotada.



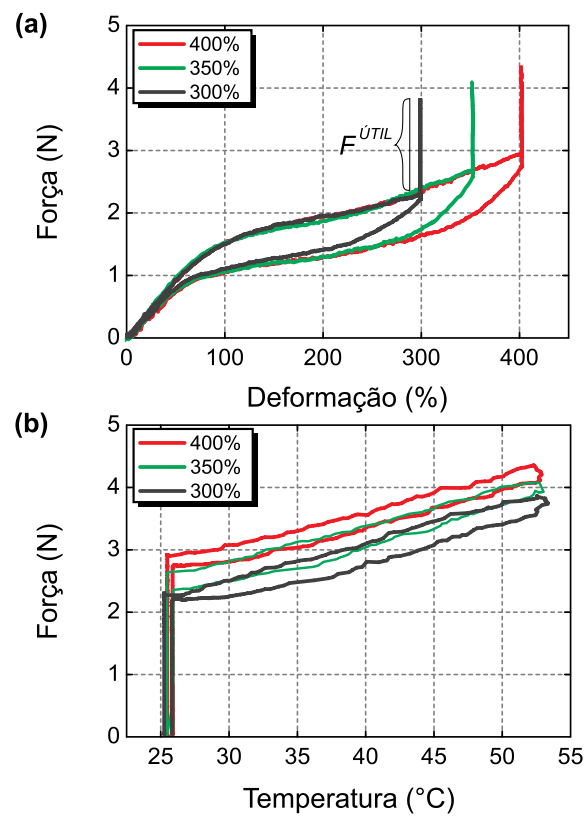
Fonte: Autoria própria

Segundo Sharma, Nayak e Dinesh (2008), na condição estática, quando todas as molas (fases) estão na mesma temperatura, as forças sobre o eixo excêntrico permanecem em equilíbrio em qualquer posição angular e uma pequena força então é suficiente para mover o rotor. Assim, as molas poderão promover uma maior recuperação de deformação em relação a configuração antagônica, nesse caso sendo suficiente para promover a rotação do rotor após o acionamento por corrente elétrica.

Dessa forma, foram realizados ensaios de geração de força tracionando as molas isotermicamente até as deformações de 300, 350 e 400% (Figura 34(a)). Em seguida, mantendo essas deformações constantes, foi realizado o aquecimento do atuador até uma temperatura em torno de 53 °C para verificar a força máxima gerada em cada deformação (Figura 34(b)). Retirado o aquecimento, a mola retorna a temperatura ambiente reduzindo a força e voltando ao estado original.

Pode ser observado a geração de uma força útil (F^{UTIL}) média de aproximadamente 1,2 N para a faixa de temperatura entre 27 e 50 °C (Figura 34(b)). Essa força será responsável pelo torque e movimento de rotação do motor.

Figura 34 – Curvas de geração de força entre (a) força *versus* deformação e (b) força *versus* temperatura.



Fonte: Autoria própria

Com base na caracterização foi possível definir os parâmetros geométricos do projeto, assim como a obtenção das propriedades eletro-termomecânicas do atuador para as simulações analíticas do modelo dinâmico (Tabela 4) e posterior fabricação do protótipo em função da mola a ser empregada.

Tabela 4 – Principais parâmetros para o projeto e simulações dos motores.

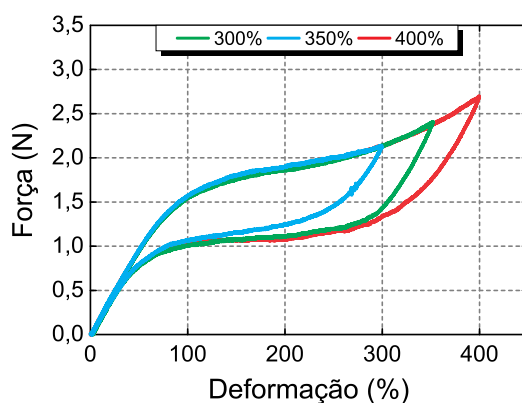
Mola	x_o (mm)	r (mm)	K_{LMF_BT} (N/mm)	$F_{ÚTIL}$ (N)
M9	18	2,25	0,2593	1,2
M12	30	3,75	0,1556	1,2
M15	42	5,25	0,1111	1,2

Fonte: Autoria própria

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS NUMÉRICOS

Para a comparação entre os três modelos analisados durante as simulações numéricas, foram levados em consideração os resultados experimentais presentes na Figura 35 obtidos através dos ensaios de tração uniaxiais isotérmicos em $T_{amb} \approx 27^{\circ}C$. Três níveis de deformações do comprimento útil da mola foram avaliados: 300%, 350% e 400%. Como já descrito, os valores de 300% e 400% são os valores limites de deformações da mola adotados para a região de trabalho do motor. Vale destacar que os valores de entrada de força (N) e deflexão (mm) para as simulações com o elemento COMBIN39 foram extraídos dessas curvas experimentais.

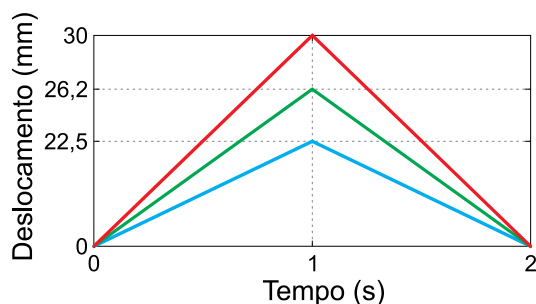
Figura 35 – Resultados experimentais utilizados como parâmetros para validação e análise das simulações realizadas.



Fonte: Autoria própria

Para simular o procedimento realizado durante os ensaios experimentais de tração uniaxiais isotérmicos, foram aplicados deslocamentos de 22,5; 26,2 e 30 mm correspondendo as deformações de 300%, 350% e 400%, respectivamente, do comprimento útil da mola M12. Como os resultados em função da deformação são equivalentes, não houve a necessidade de realizar as simulações numéricas sobre as molas M9 e M15. Os carregamentos da Figura 36 foram aplicados em uma das extremidades da mola nas simulações empregando os modelos SUPE, SME e o COMBIN39.

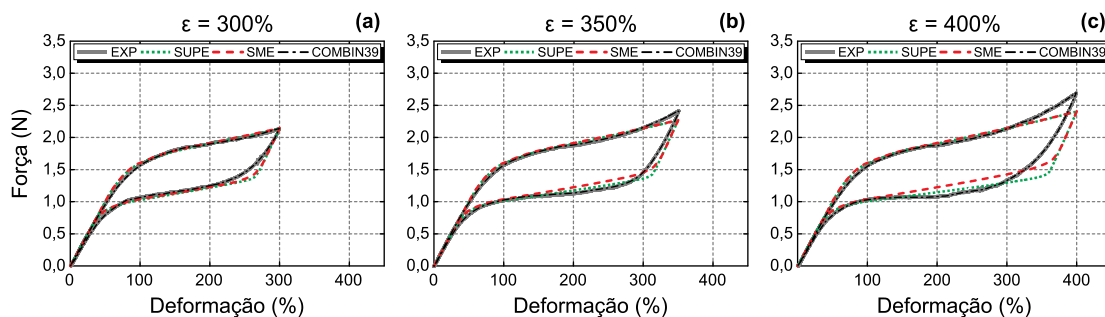
Figura 36 – Deslocamentos aplicados nas simulações numéricas correspondendo as deformações de 300%, 350% e 400% do comprimento útil da mola.



Fonte: Autoria própria

Nas Figuras 37(a), (b) e (c) são apresentados os resultados experimentais e numéricos da mola de LMF para os ensaios de deformações de 300%, 350% e 400%. A partir dessas curvas foram calculadas as variações percentuais dos resultados numéricos em relação aos dados experimentais. Os maiores desvios percentuais de 22,69%; 13,85% e 1,85%, para os modelos SUPE, SME e CONBIM39 respectivamente, foram obtidas para o ensaio de 400% de deformação. As curvas para o elemento COMBIN39 apresentaram pequenas dispersões em relação aos dados experimentais já que os pontos de força-deflexão foram extraídos dessas próprias curvas para compor a tabela com os dados de entrada no software. Com relação ao tempo de simulação, o modelo utilizando o elemento COMBIN39 precisou de aproximadamente 32 vezes menos tempo que o modelo SME e 3,2 vezes menos tempo que o modelo SUPE.

Figura 37 – Resultados experimentais e numéricos empregando os três modelos avaliados para as deformações de (a) 300%, (b) 350% e (c) 400% da mola.



Fonte: Autoria própria

Como o objetivo final seria realizar simulações do mecanismo de rotação contendo as três molas no intuito de obter as respostas numéricas sem acionamento do motor em termos de força e torque, o elemento COMBIN39 foi adotado devido ter

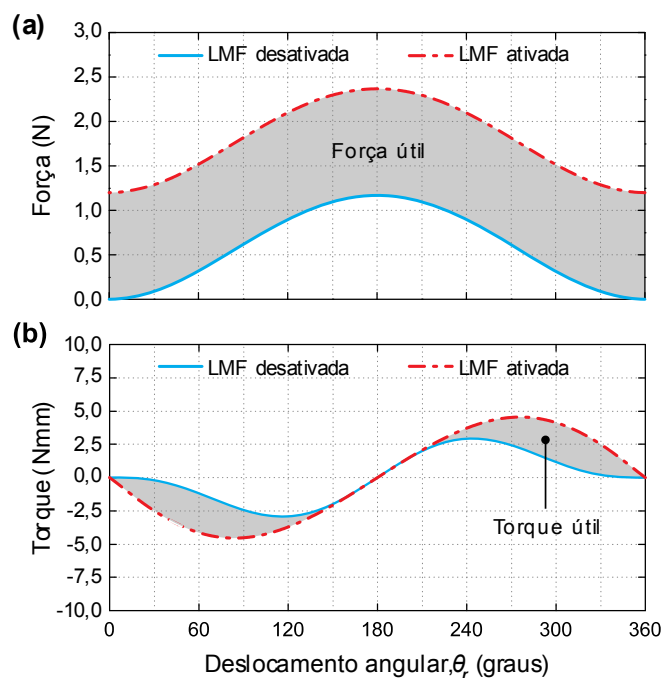
apresentado as melhores respostas em termos de representação do comportamento da mola com o menor tempo de simulação.

4.3 ANÁLISE DO MOTOR SEM ACIONAMENTO

4.3.1 Resultados analíticos

Na Figura 38 são apresentados os gráficos de força e torque para o modelo de uma única fase (demais fases desconectadas mecanicamente) simulados com a mola M12. Essas análises representam uma rotação completa quando uma força externa hipotética é aplicada sobre o rotor. Para fins de cálculo foi desprezado o valor da pré-carga na mola na $\varepsilon_{\min}$ (300%), ou seja, $F_{\min}$ igual a 2,3 N (Figura 34(a)).

Figura 38 – Curvas de (a) forças e (b) torques para a mola M12 ativada e desativada no modelo de única fase (demais fases desconectadas mecanicamente).



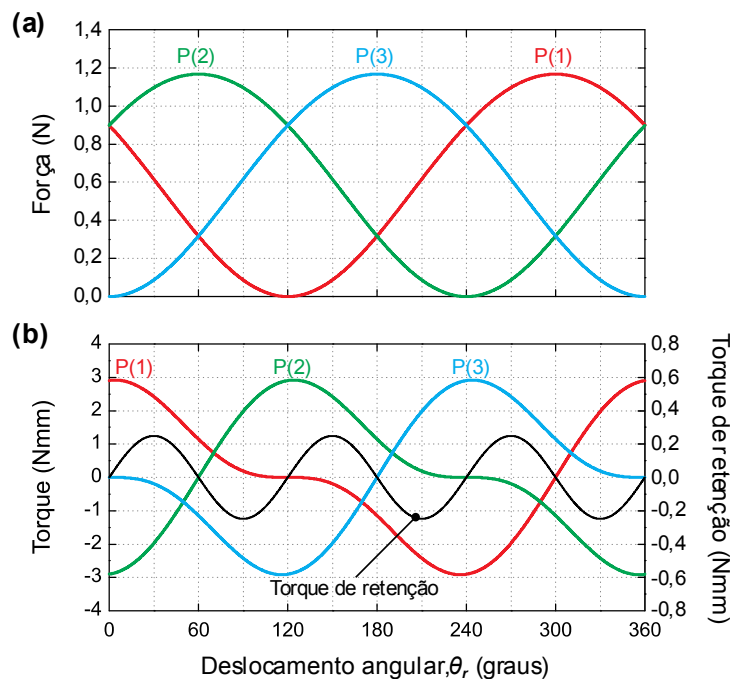
Fonte: Autoria própria

A restrição ao movimento faz com que ao aquecer a mola haja um acréscimo na força gerada sobre o rotor como mostrado na Figura 38(a). A área em destaque evidencia a força útil da mola ativada em relação a condição desativada. Essa força é aproximadamente constante com modulo de 1,167 N e pode ser estendida para as demais

molares M9 e M15. Da mesma forma, na Figura 38(b) são apresentados os torques gerados pela mola nas condições ativada e desativada. O torque útil teórico é dado pela diferença entre essas curvas e é responsável pelo movimento de rotação do mecanismo por meio dos acionamentos.

Na Figura 39(a) são apresentadas as curvas de forças para as molas M12 desativadas utilizando o modelo trifásico adotado. Os torques produzidos por cada uma dessas fases são apresentados na Figura 39(b) em linhas sólidas (P(1), P(2) e P(3)). O valor máximo de torque teórico encontrado foi de 2,91 Nmm na condição desativada. A linha traço-ponto representa o torque de retenção do sistema. Esse torque é gerado devido as forças de atrito, vibrações e desbalanceamento, e seu módulo é estimado em 10% do torque máximo gerado quando as molas estão desativadas (SHARMA; NAYAK; DINESH, 2008).

Figura 39 – (a) Curvas de forças e (b) torques para as molas M12 desativadas no modelo trifásico.

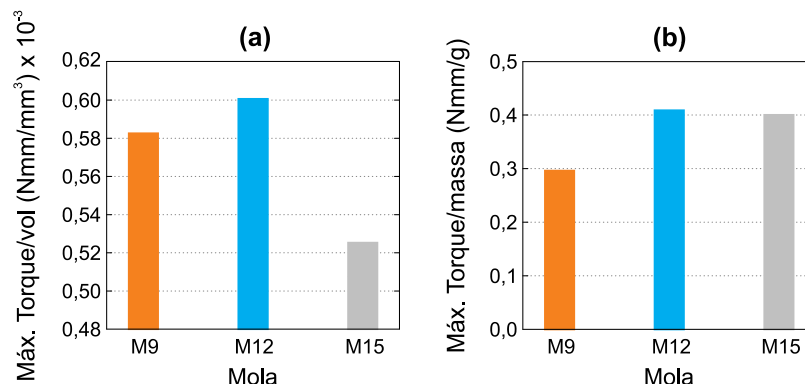


Fonte: Autoria própria

Essas análises também foram realizadas empregando os parâmetros da Tabela 4 para as molas M9 e M15. Para avaliar o melhor desempenho entre os três atuadores foi estabelecido como critério as relações de torque por unidade de volume (Nmm/mm^3) e de torque por unidade de massa (Nmm/g). A partir das simulações efetuadas, chegou-se à conclusão que o motor acionado com as molas M12 foi o que apresentou melhores índices

de densidade de energia e por isso foi adotado como padrão para a fabricação do protótipo e para as análises experimentais. Essa conclusão pode ser verificada por meio dos resultados presentes nas Figuras 40(a) e (b).

Figura 40 – Relações entre max. torque/volume e max. torque/massa avaliadas para o sistema empregando as molas M9, M12 e M15.



Fonte: Autoria própria

Definida a mola M12 a ser empregada no sistema, foram verificadas a influência do número de fases e dos acionamentos teóricos no torque gerado pelo motor. Assim, são apresentados na Fig. 41(a), (b), (c) e (d) os resultados de torques úteis teóricos para o motor com 3, 4, 5 e 6 fases (molas), respectivamente. Os casos acima de 3 fases foram simulados como forma de perspectiva de implementação futura de outros motores.

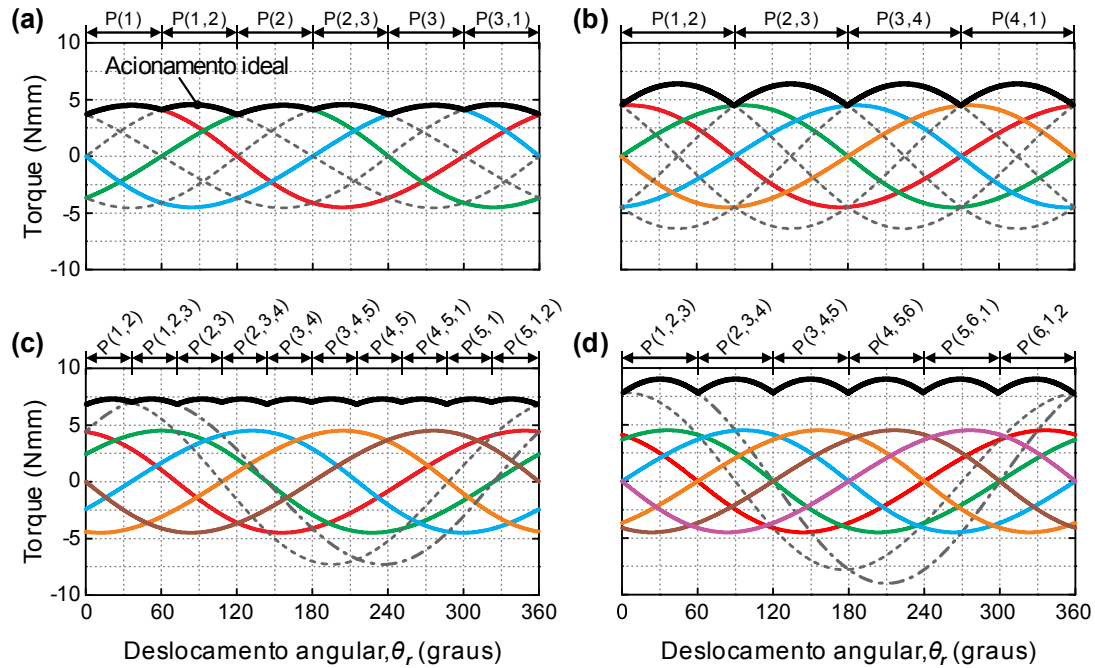
Para o caso trifásico, foram avaliadas as ativações simples (linhas sólidas) e dupla das fases (linhas tracejadas). O valor máximo de torque encontrado para a ativação simples (P1 – P3 – P2) foi de 4,5 Nmm. Na situação de ativação dupla (P1,2 – P2,3 – P3,1) o valor máximo de torque permanece constante, porém os pontos de equilíbrio do rotor são modificados e defasados em 60 graus pelo balanceamento das forças (linhas tracejadas na Figura 41(a)).

Para motores acima de três fases (Figuras 41(b), (c), (d)) a ativação dupla proporciona um acréscimo no torque máximo quando comparado ao caso trifásico. O acionamento com ativação simultânea de três fases pode ser implementado a partir de um sistema com cinco ou mais fases resultando em um acréscimo ainda maior no torque (linhas traço-ponto nas Figuras 41(c), (d)).

Visando-se obter esses máximos valores de torque durante os acionamentos das diversas topologias, as ativações simples, duplas e triplas foram combinadas da melhor forma possível resultando nas curvas de acionamentos ideais da Figura 41. A partir desses

acionamentos os valores máximos de torques alcançados foram de 4,5; 6,38; 7,29 e 9 Nmm para 3, 4, 5 e 6 fases presentes no mecanismo, respectivamente.

Figura 41 – Curvas de torques úteis teóricos para o motor com (a) 3, (b) 4, (c) 5 e (d) 6 fases analisando diferentes tipos de acionamentos.



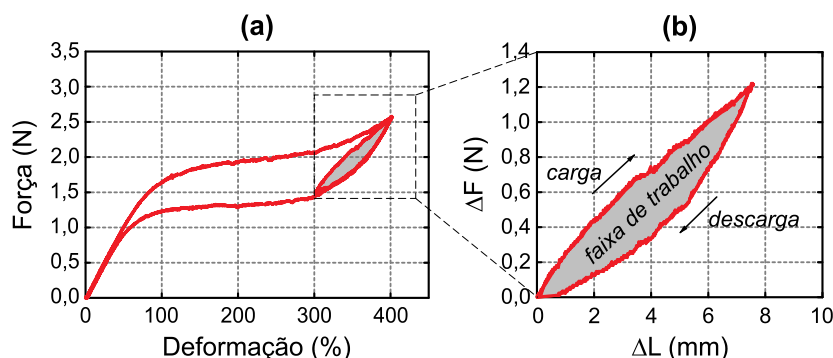
Fonte: Autoria própria

Apesar do aumento no torque gerado com o acréscimo do número de fases, foi adotado experimentalmente o motor trifásico por uma questão de simplificação estrutural e de instrumentação.

4.3.2 Resultados numéricos

Foram realizados ensaios experimentais de carga e descarga mecânica com o seguinte ciclo de deformação: 0% → 400% → 300% → 400% → 0% (Figura 42(a)) com a finalidade de caracterizar a região de trabalho do atuador entre 300% e 400%.

Figura 42 – (a) Ensaio de tração uniaxial isotérmico com um loop entre 300% e 400%. (b) Histerese de ΔF versus ΔL na região de trabalho desprezando a pré-carga em 300%.

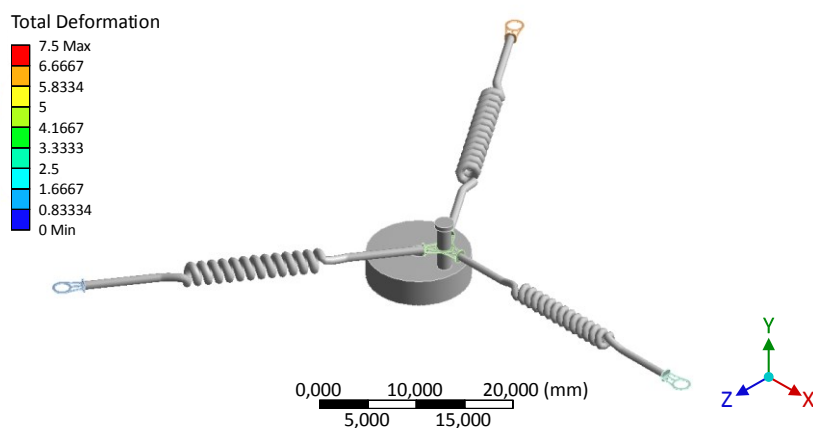


Fonte: Autoria própria

Essa região de trabalho mesmo sendo restrita demonstrou a existência de histerese entre a carga e descarga da mola na Figura 42(a), porém pequena se comparada a histerese de a toda a curva que vai de 0 a 400% de deformação. Desprezando a pré-carga em 300% e convertendo a deformação ($\frac{\Delta L}{L_0} \times 100\%$) para a unidade de deslocamento (ΔL) sobre a mola durante o ensaio, foi obtida a curva força-deflexão apresentada na Figura 42(b). Essa curva foi utilizada na discretização dos dados de entrada do modelo para as simulações realizadas com o mecanismo de rotação empregando o elemento COMBIN39 nas três molas de LMF.

Na Figura 43 é apresentado o mecanismo de rotação com as três molas acopladas modelados no Design Modeler do ANSYS®.

Figura 43 – Mecanismo de rotação com as três molas acopladas modelados no ANSYS® para a avaliação da resposta numérica do motor.

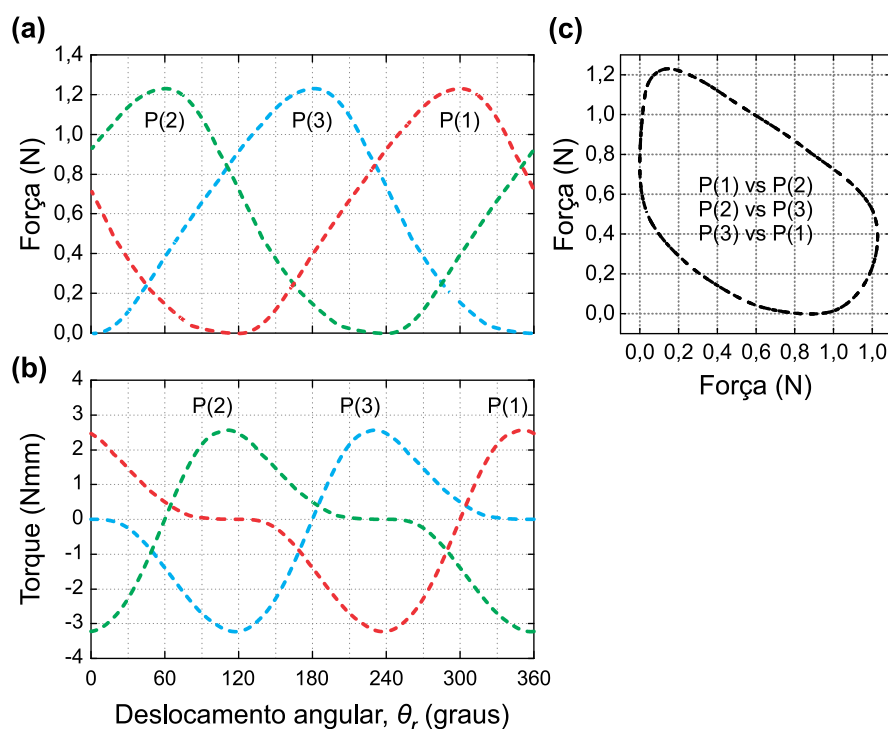


Fonte: Autoria própria

Na parte superior esquerda dessa mesma figura é apresentado o deslocamento gerado na mola 3 quando o rotor está na posição de 180 graus. Nessas simulações os corpos flexíveis são as molas, os demais são tratados como corpos rígidos para otimizar o processo de solução. Os parâmetros relacionados as forças e as deflexões foram inseridos igualmente para as três molas de LMF na rotina de simulação. Sobre o rotor foi aplicada uma condição de coturno para que ele rotacione em 360 graus a partir da posição inicial ao final de um passo de 1s. As forças foram avaliadas individualmente para cada mola e realizados os devidos cálculos para quantificar os torques gerados sem acionamento elétrico.

Nas Figuras 44(a) e (b) são apresentados os resultados numéricos de forças e torques gerados com defasagem de 120 graus entre cada resposta da mola. Os máximos valores para as forças e os torques obtidos foram de aproximadamente 1,22 N e 3,33 Nmm, respectivamente. Na Figura 44(c) são apresentadas as curvas das relações entre as forças nas fases, ou seja, a influência da força de uma mola sobre a outra no ciclo de movimento. Devido a não-linearidade e histerese da mola de LMF, o comportamento entre as forças de fases vizinhas não se apresentam na forma de uma elipse como seria observado para o caso de um atuador com rigidez linear.

Figura 44 – Resultados numéricos das (a) forças e (b) torques gerados pelo motor em cada fase sem acionamento. (a) Relações entre forças geradas a cada duas fases vizinhas.



Fonte: Autoria própria

4.3.3 Resultados experimentais

Nas Figuras 45(a) e (b) são apresentados os resultados experimentais, analíticos e numéricos das forças e dos torques gerados sem acionamento elétrico. Para obter os resultados experimentais, o rotor foi acionado em posições angulares fixas e as forças e os torques de reação gerados nas molas foram medidos. Os máximos valores de força e torque experimentais foram de 1,27 N e 3,51 Nmm. O perfil dos gráficos de força e de torque por fase (mola) se mostraram bastante similares entre o experimental, o analítico e o numérico. Os máximos desvios percentuais entre os resultados analíticos e numéricos em relação aos dados experimentais foram de 8,11% e 3,94% para a força, e 17,09% e 5,13% para o torque, respectivamente, como resumido na tabela 5.

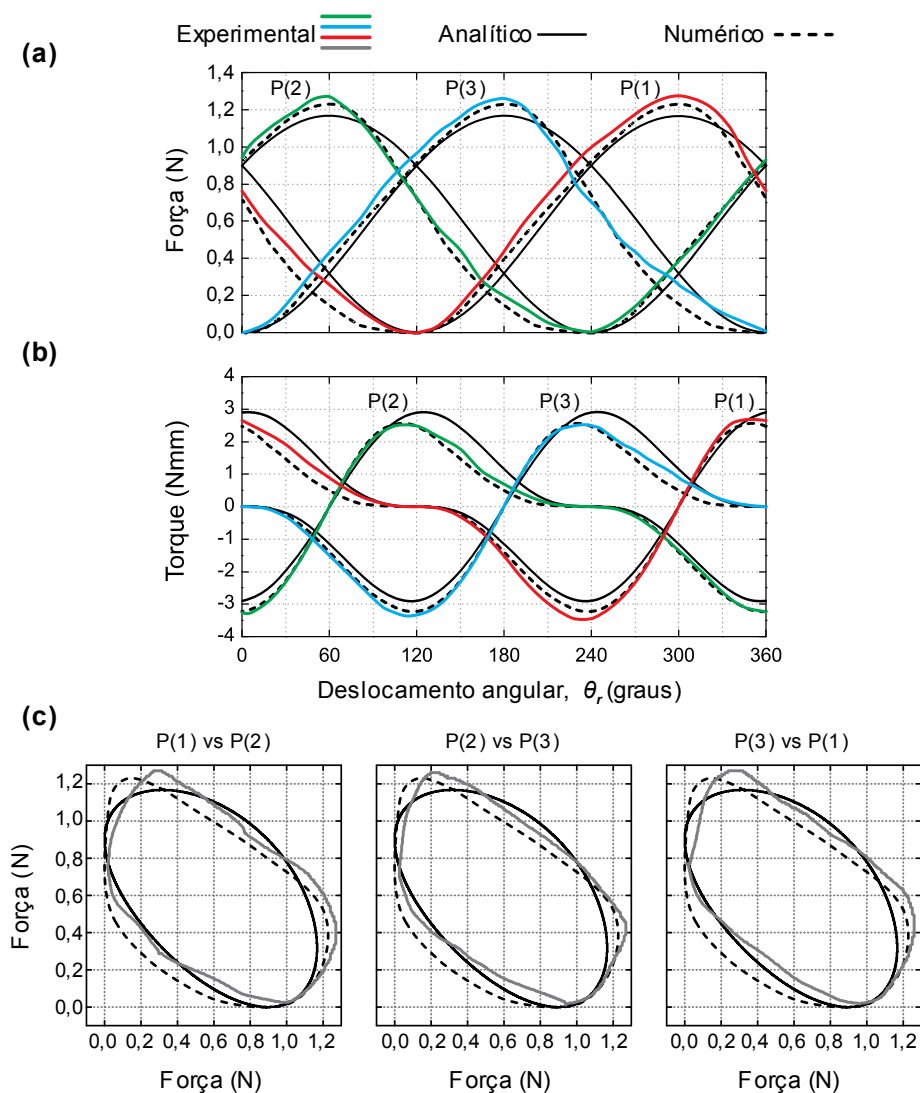
Tabela 5 – Máximos valores de força, torque e desvios percentuais com relação aos dados experimentais.

Resultados	F_{máx} (N)	máx. desvio (%)	T_{máx} (Nmm)	máx. desvio (%)
Experimental	1,27	-	3,51	-
Analítico	1,167	8,11	2,91	17,09
Numérico	1,22	3,94	3,33	5,13

Fonte: Autoria própria

Na Figura 45(c) são apresentadas as curvas de forças para cada duas fases vizinhas. A não-linearidade e histerese demonstram perfis semelhantes entre o experimental e o numérico, o que difere ambos das curvas analíticas as quais foram calculadas empregando uma rigidez constante. Outras perdas, como por exemplo, o atrito existente no protótipo real e não considerado nas simulações, promoveram acréscimos nos desvios percentuais gerados.

Figura 45 – Resultados experimentais, analíticos e numéricos das respostas do motor sem acionamento. Deslocamento angular *versus* (a) forças e (b) torques de reação gerados pelas três fases. (c) Curvas de forças para duas fases vizinhas.



Fonte: Autoria própria

4.4 ACIONAMENTOS DO MOTOR

Na Figura 46 são apresentadas as respostas para cinco ciclos de rotação do motor com os acionamentos elétricos demonstrados nas Figuras 46(a.1), (a.2) e (a.3). A amplitude máxima de corrente elétrica aplicada na condição ativada (ON) em cada mola foi de 360 mA. Todos os sinais de acionamentos apresentados possuem o mesmo período de tempo de 15,38 s. Porém, a diferença entre esses sinais das Figuras 46(a.1-3) é com relação ao tempo em que a corrente passa ativada (time ON), ou seja, o tempo em que a

mola permanece sobre aquecimento por efeito joule. Os respectivos valores de tempos ativados adotados foram de 5,12; 6,15 e 7,69 s equivalentes a 33%, 40% e 50% do período de 15,38 s dos sinais. Esses valores foram definidos com base nas respostas térmicas analisadas durante a caracterização da mola apresentadas na seção 4.1. O objetivo desses acionamentos foi verificar a influência do tempo de ativação na continuidade de rotação do motor e nos valores de forças e torques gerados.

Nas Figuras 46(b.1-3) são apresentadas as curvas de temperatura de cada fase devido ao aquecimento por efeito Joule. Com o tempo ON de 7,69 s, a temperatura atingida na mola foi próxima de 52 °C, de fato maior que nos outros dois casos devido ao maior tempo sob aquecimento. Para 5,12 e 6,15 s, as temperaturas máximas foram de aproximadamente 48 e 49,5 °C, respectivamente. Cada ciclo começa e termina em temperaturas em torno de 25 °C. Durante os ciclos, elas são aquecidas até temperaturas em torno de 50 °C. As molas podem dissipar a energia térmica após as ativações visto que durante o resfriamento elas atingem temperaturas (≈ 25 °C) abaixo da austenita final (≈ 34 °C para 400% de deformação).

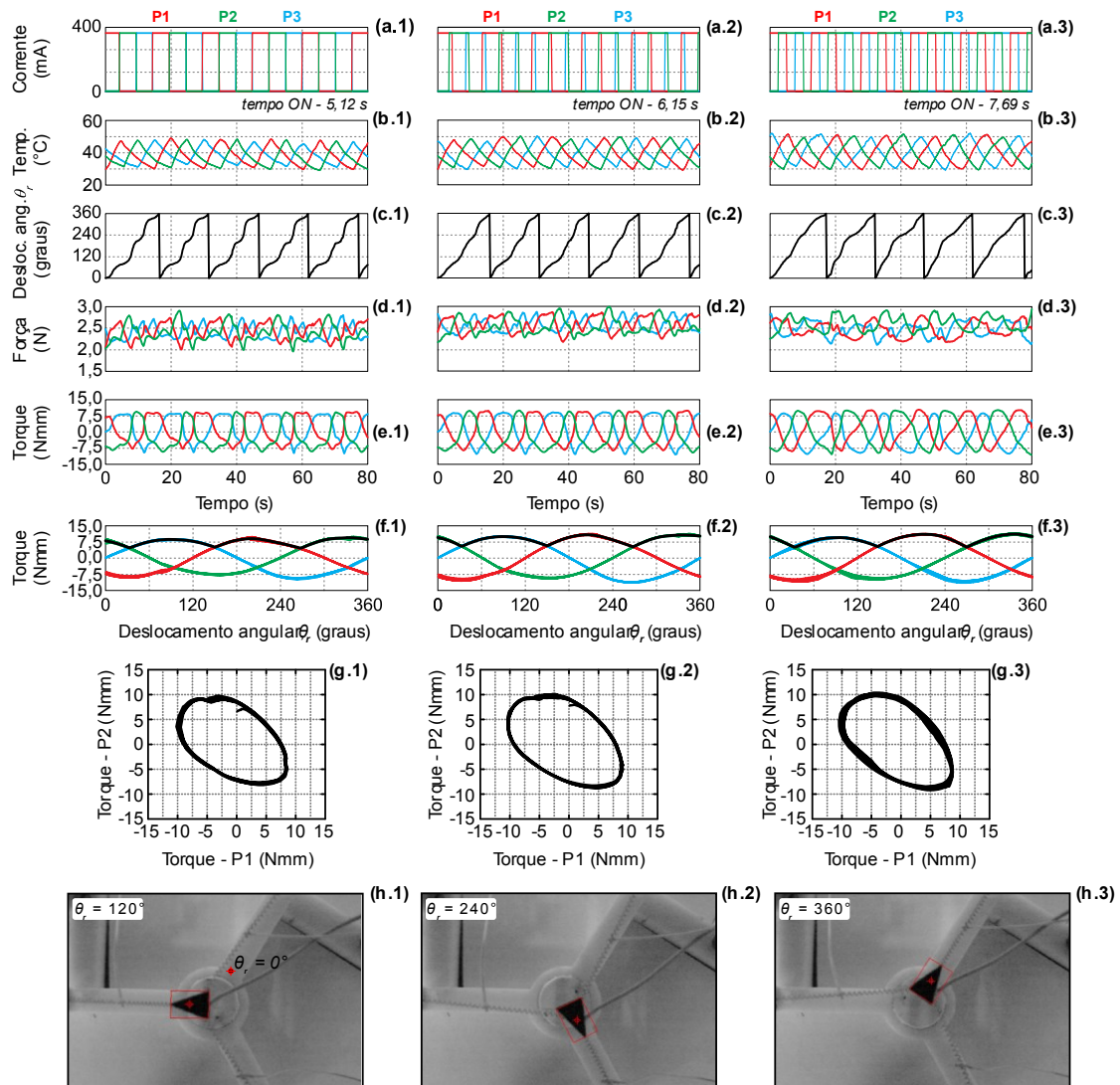
A influência dos diferentes tempos de ativação foram significantes nas respostas de deslocamento angular mostrados nas Figuras 46(c.1-3). A melhor continuidade de rotação foi verificada nas curvas para as correntes com tempo de ativação de 7,69 s. Nessa condição (Figura 46(a.3)), a área de intersecção entre os acionamentos é maior que nos demais casos (Figuras 46(a.1) e (a.2)). Com isso, a primeira mola ainda está sob aquecimento quando a próxima mola é então acionada proporcionando maior suavização na transição do movimento. Como visto nas curvas de temperatura, o tempo em que as molas passam desativadas ($i = 0$) é suficiente para o respectivo resfriamento, permitindo uma nova ativação para o início de um novo ciclo de trabalho sem instabilidade térmica.

Os valores das amplitudes de forças e torques nas Figuras 46(d.1-3) e (e.1-3), respectivamente, são pouco influenciados pela variação do tempo de ativação, permanecendo quase que aproximadamente constantes com máximos valores de 3,00 N e 10,54 Nmm. Nas Figuras 46(f.1-3) são apresentadas as curvas de torque em função do deslocamento angular do rotor com destaque para o máximo torque que atua sobre o eixo de rotação (linha sólida preta).

Nas Figuras 46(g.1-3) estão mostrados os torques entre duas fases do motor. Como as não-linearidades estão associadas com o movimento do protótipo, a relação desses torques entre as fases não se apresenta com geometria elíptica perfeita como já mencionado para o caso do modelo analítico de três fases.

Nas Figuras 46(h.1-3) são apresentadas imagens da vista superior do motor capturadas pelo processamento de imagem para a obtenção dos deslocamentos angulares do rotor. São destacadas imagens para as posições de 120, 240 e 360 graus do rotor a partir do acionamento da posição de origem ($\theta_r = 0$ graus).

Figura 46 – Respostas de (b.1-3) temperaturas, (c.1-3) deslocamentos angulares, (d.1-3) forças, e (e.1-3) torques para os sinais de (a.1-3) corrente elétrica com amplitudes de 360 mA para tempos de ativação de 5,12; 6,15 e 7,69 s. (f.1-3) Curvas de torque *versus* deslocamento angular. (g.1-3) Curvas de torque entre duas fases vizinhas. (h.1-3) Imagens da câmera para as posições de 120, 240 e 360 graus do rotor a partir do acionamento da posição de origem ($\theta_r = 0$ graus).



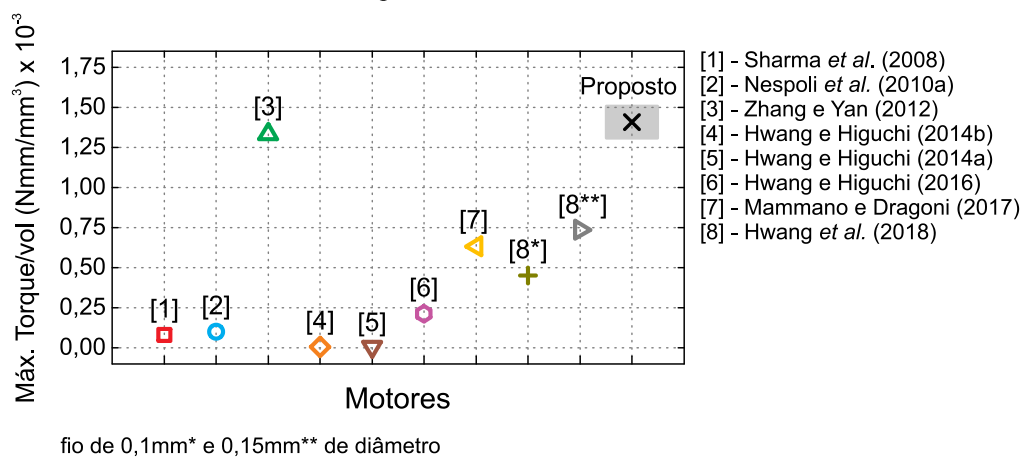
Fonte: Autoria própria

Por fim, graças as mini-molas de LMF utilizadas em conjunto com o mecanismo de rotação empregado, foi possível a geração de bons torques, além de permitirem também o projeto do motor rotativo de forma compacta devido à ausência de polias,

engrenagens e catracas. A consequência disso é que foram produzidas satisfatórias relações de densidade de energia para o máximo torque/volume de 0,001406851 Nmm/mm³ e para o máximo torque/massa de 0,958 Nmm/g.

Considerando a relação de desempenho de máximo torque experimental gerado por unidade de volume (Nmm/mm³) são comparados na Figura 47 os índices para o motor proposto neste trabalho em relação aos principais motores rotativos presentes na literatura atualmente. Com o valor de 0,001406851 Nmm/mm³ o presente motor possui atualmente o maior índice de torque/volume dentre os motores rotativos acionados por LMF.

Figura 47 – Relações de torque/volume do protótipo fabricado e dos principais motores rotativos presentes na literatura.



Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foram apresentados o projeto, a fabricação, as modelagens analítica e numérica e as análises experimentais do motor rotativo contínuo, que pode funcionar no sentido horário e anti-horário, acionado por mini molas de LMF de NiTi. Os resultados antagônicos mostraram que a mola sob 350% de deformação promove uma recuperação de quase 50% do seu comprimento após um aquecimento térmico acima de A_f . As simulações utilizando o elemento finito COMBIN39 resultaram na melhor representação do comportamento de carga e descarga para as deformações de 300%, 350% e 400% sobre a mola de LMF com menor tempo para a solução. Para esse caso, o máximo desvio percentual encontrado em relação a curva experimental (400% de deformação) foi de 1,85%. As curvas para as forças e os torques gerados demonstraram a proximidade entre os resultados experimentais, analíticos e numéricos obtidos.

Os resultados dos acionamentos mostraram que os máximos valores de forças e torques obtidos foram de 3,00 N e 10,54 Nmm. A maior intersecção de acionamento (aquecimento) das molas demonstraram uma maior continuidade no movimento do motor e foi obtida na situação em que o tempo ativado foi de 7,69 s.

Por fim, a partir da configuração do motor adotada, foi possível obter uma alta relação de torque por volume de 0,001406851 Nmm/mm³ quando comparada com outros motores na literatura que utilizam atuadores de liga com memória de forma. Nesse caso, garantindo posição de destaque para o motor desenvolvido neste trabalho

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Determinar o desempenho com relação ao número de ciclos de trabalho baseado na vida útil das molas;
- Acoplar um sistema de transmissão na saída para o acionamento de um mecanismo externo;
- Projetar um sistema mais compacto que possibilite usar um maior número de molas para aumento do torque de saída;
- Implementar um controle para acionamento em função do ângulo de rotação do rotor;
- Implementar um modelo constitutivo das LMF que permita avaliar as respostas do motor com a aplicação de um campo térmico.

6 REFERÊNCIAS

- ANSYS, I. (2015). *Ansys Mechanical APDL Element Reference*. Retrieved from <http://www.ansys.com>
- Auricchio, F. (2001). A robust integration-algorithm for a finite-strain shape-memory-alloy superelastic model. *International Journal of Plasticity*, 17, 971–990.
- Auricchio, F., Coda, A., Reali, A., & Urbano, M. (2009). SMA Numerical Modeling Versus Experimental Results: Parameter Identification and Model Prediction Capabilities. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(August), 649–654. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9409-7>
- Auricchio, F., & Petrini, L. (2002). Improvements and algorithmical considerations on a recent three-dimensional model describing stress-induced solid phase transformations. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1284(June), 1255–1284. <https://doi.org/10.1002/nme.619>
- Auricchio, F., & Taylor, R. L. (1997). Shape-memory alloys: macromodelling and numerical simulations of the superelastic behavior. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 143(96), 175–194.
- Casati, R., Biffi, C. A., Vedani, M., & Tuissi, A. (2014). High performance shape memory effect in nitinol wire for actuators with increased operating temperature range. *Functional Materials Letters*, 7(5), 10–13. <https://doi.org/10.1142/S1793604714500635>
- D. C. Lagoudas. (2008). Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications. In *Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-47685-8>
- Emiliavaca, A., de Araújo, C. J., Souto, C. R., & Ries, A. (2018). Characterization of shape memory alloy micro-springs for application in morphing wings. *Smart*

Materials and Structures, 28(1), 015010. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/aaeb80>

Gabriel, K. J., Trimmer, W. S. N., & Walker, J. A. (1988). A Micro Rotary Actuator Using Shape Memory Alloy. *Sensors and Actuators*, 15(1), 95–102. [https://doi.org/10.1016/0250-6874\(88\)85021-2](https://doi.org/10.1016/0250-6874(88)85021-2)

Gaudenzi, P. (2009). *Smart Structures: Physical Behavior, Mathematical Modelling and Applications*. John Wiley & Sons, Ltd.

Hartl, D. J., & Lagoudas, D. C. (2007). Aerospace applications of shape memory alloys. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 221(4), 535–552. <https://doi.org/10.1243/09544100JAERO211>

Hwang, D., & Higuchi, T. (2014a). A cycloidal wobble motor driven by shape memory alloy wires. *Smart Materials and Structures*, 23(5). <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/5/055023>

Hwang, D., & Higuchi, T. (2014b). A rotary actuator using shape memory alloy (SMA) wires. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 19(5), 1625–1635. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2013.2290545>

Hwang, D., & Higuchi, T. (2016). A Planar Wobble Motor with a XY Compliant Mechanism Driven by Shape Memory Alloy. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(1), 302–315. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2015.2439046>

Hwang, D., Ihn, Y. S., & Kim, K. (2018). Compact Modular Cycloidal Motor With Embedded Shape Memory Alloy Wires. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65(5), 4028–4038. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2764839>

Hwang, D., Lee, J., & Kim, K. (2017). On the design of a miniature haptic ring for cutaneous force feedback using shape memory alloy actuators. *Smart Materials and Structures*, 26(10). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aa860d>

- Jani, J. M., Leary, M., & Subic, A. (2014). Shape memory alloys in automotive applications. *Applied Mechanics and Materials*, 663, 248–253. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.663.248>
- Kadir, M. R. A., Dewi, D. E. O., Jamaludin, M. N., Nafea, M., & Ali, M. S. M. (2019). Sensors and Actuators A : Physical A multi-segmented shape memory alloy-based actuator system for endoscopic applications. *Sensors & Actuators: A. Physical*, 296, 92–100. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2019.06.056>
- Kittinanthapanya, R., Sugahara, Y., Matsuura, D., & Takeda, Y. (2019). Development of a Novel SMA-Driven Compliant Rotary Actuator Based on a Double Helical Structure. *Robotics*, 8, 18. <https://doi.org/10.3390/robotics8010012>
- Kuribayashi, K. (1989). A new servo motor using shape memory alloy. *15th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society*, 238–243. <https://doi.org/10.1109/iecon.1989.69641>
- Kuribayashi, Katsutoshi. (1997). Millimeter size joint actuator using shape memory alloy. In *Micromechanics and MEMS: Classic and Seminal Papers to 1990* (Vol. 20, pp. 379–384). <https://doi.org/10.1109/9780470545263.sect7>
- Lan, C. C., Wang, J. H., & Fan, C. H. (2009). Optimal design of rotary manipulators using shape memory alloy wire actuated flexures. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 153(2), 258–266. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.05.019>
- Lopes, V., Steffen, V., & Savi, M. A. (2016). Dynamics of Smart Systems and Structures: Concepts and Applications. In *Dynamics of Smart Systems and Structures: Concepts and Applications*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-29982-2>
- Machado, L. G., & Savi, M. A. (2003). Medical applications of shape memory alloys. *Brazilian Journal of Medical and Biological Research*, 36(6), 683–691. <https://doi.org/10.1590/S0100-879X2003000600001>
- Mammano, G. S., & Dragoni, E. (2017). Design and Characterization of a Continuous

- Rotary Minimotor Based on Shape-Memory Wires and Overrunning Clutches. *Journal of Mechanical Design*, 139(1), 015001. <https://doi.org/10.1115/1.4034401>
- Modabberifar, M., & Spenko, M. (2018). A shape memory alloy-actuated gecko-inspired robotic gripper. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 276, 76–82. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2018.04.018>
- Mohd Jani, J., Leary, M., & Subic, A. (2017). Designing shape memory alloy linear actuators: A review. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(13), 1699–1718. <https://doi.org/10.1177/1045389X16679296>
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
- Nespoli, A., Bassani, E., Besseghini, S., & Villa, E. (2010a). Rotational mini-actuator activated by two antagonist shape memory alloy wires. *Physics Procedia*, 10, 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2010.11.096>
- Nespoli, Adelaide, Besseghini, S., Pittaccio, S., Villa, E., & Viscuso, S. (2010b). 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*, 158(1), 149–160. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2009.12.020>
- Otsuka, K., & Ren, X. (1999). *Recent developments in the research of shape memory alloys*. 7, 511–528.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. (1998). *Shape Memory Materials* (K. Otsuka & C. M. Wayman, eds.). Cambridge University Press.
- Reynaerts, D., & Van Brussel, H. (1998). Design aspects of shape memory actuators. *Mechatronics*, 8(6), 635–656. [https://doi.org/10.1016/S0957-4158\(98\)00023-3](https://doi.org/10.1016/S0957-4158(98)00023-3)
- Sharma, S. V., Nayak, M. M., & Dinesh, N. S. (2008). Modelling, design and

- characterization of Shape Memory Alloy-based Poly Phase motor. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 147(2), 583–592. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2008.05.021>
- Shaw, J. A., & Kyriakides, S. (1995). Thermomechanical aspects of NiTi.pdf. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 43(8), 1243–1281. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(95\)00024-D](https://doi.org/10.1016/0022-5096(95)00024-D)
- Song, G. (2001). Robust position regulation of a rotary servo actuated by a shape memory alloy wire. *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 3, 1923–1928.
- Song, G. (2007). Design and control of a Nitinol wire actuated rotary servo. *Smart Materials and Structures*, 16(5), 1796–1801. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/16/5/034>
- Souza, A. C., Mamiya, E. N., & Zouain, N. (1998). Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 7, 789–806.
- Spaggiari, A, Castagnetti, D., & Golinelli, N. (2016). *Smart materials : Properties , design and mechatronic applications*. 0(0), 1–29. <https://doi.org/10.1177/1464420716673671>
- Spaggiari, Andrea, Spinella, I., & Dragoni, E. (2013). Design equations for binary shape memory actuators under arbitrary external forces. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 24(6), 682–694. <https://doi.org/10.1177/1045389X12444491>
- Spinella, I., & Dragoni, E. (2009). Design equations for binary shape memory actuators under dissipative forces. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 223(3), 531–543. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1232>
- Spinella, I., Scirè Mammano, G., & Dragoni, E. (2009). Conceptual design and simulation of a compact shape memory actuator for rotary motion. *Journal of Materials*

Engineering and Performance, 18(5–6), 638–648. <https://doi.org/10.1007/s11665-009-9421-y>

Tanaka, Y., & Yamada, A. (1991). Rotary Actuator Using Shape Memory Alloy for a Robot - Analysis of the Response with Load. *Proceedings IROS '91:IEEE/RSJ International Workshop on Intelligent Robots and Systems '91*, (91), 3–5.

Wu, M. H., & Schetky, L. M. (2000). Industrial Applications for Shape Memory Alloys. *International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, 182, 171–182.

Yamano, A., Shintani, A., Ito, T., & Nakagawa, C. (2018). Reducing the Power Consumption of a Shape Memory Alloy Wire Actuator Drive by Numerical Analysis and Experiment. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 23(4), 1854–1865. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2018.2836352>

Yuan, H., Chapelle, F., Fauroux, J. C., & Balandraud, X. (2018). Concept for a 3D-printed soft rotary actuator driven by a shape-memory alloy. *Smart Materials and Structures*, 27(5). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aab56f>

Yuan, H., Fauroux, J. C., Chapelle, F., & Balandraud, X. (2017). A review of rotary actuators based on shape memory alloys. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 28(14), 1863–1885. <https://doi.org/10.1177/1045389X16682848>

Zhakypov, Z., & Paik, J. (2018). Design Methodology for Constructing Multimaterial Origami Robots and Machines. *IEEE Transactions on Robotics*, 34(1), 151–165. <https://doi.org/10.1109/TRO.2017.2775655>

Zhang, X. Y., & Yan, X. J. (2012). Continuous rotary motor actuated by multiple segments of shape memory alloy wires. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 21(12), 2643–2649. <https://doi.org/10.1007/s11665-012-0390-1>

APÊNDICE A

Painel frontal da rotina no LabVIEW® para aquisição das respostas experimentais

