

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

**Desenvolvimento de uma válvula inteligente
acionada por atuador de liga de memória de forma**

Gabriel Macedo Silveira

Rodrigo de Amorim Chermont

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

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

**Desenvolvimento de uma válvula inteligente
acionada por atuador de liga de memória de forma**

Gabriel Macedo Silveira

Rodrigo de Amorim Chermont

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

Prof.^a Orientadora: Luciana Loureiro da Silva Monteiro

Prof. Coorientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

**Rio de Janeiro
Dezembro de 2017**

FICHA CATALOGRÁFICA

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho as nossas famílias por todo incentivo e suporte ao longo das nossas trajetórias, sempre dedicados e dispostos a nos ajudar em qualquer adversidade, dedicamos também aos nossos amigos que torceram para que este momento se tornasse realidade e também aos professores com quem tivemos a oportunidade de aprender, sempre com um belo propósito de transmitir da melhor forma o conhecimento acadêmico.

Gabriel Macedo Silveira
Rodrigo de Amorim Chermont

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaríamos de agradecer a Deus por proporcionar saúde e sabedoria para seguir em nossa caminhada.

Agradecemos aos nossos familiares que nos apoiaram, em todos os momentos difíceis, sendo o que nos manteve firmes durante toda nossa trajetória. Nossos pais, mães, avós, irmãos, tios e todos que, a sua maneira, contribuíram para que conseguíssemos **sucesso** em nossa trajetória.

Aos mestres, que nos acompanham desde o primeiro semestre, que contribuíram com suas experiências, sabedoria nos proporcionando o melhor ensino possível.

Aos nossos orientadores, Luciana Loureiro da Silva Monteiro e Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, que nos direcionaram ao nosso projeto, nos ajudaram sempre, muito solícitos e dispostos a tirar dúvidas, mesmo tarde da noite ou de manhã cedo, agradecemos as palavras de incentivo, as críticas construtivas que nos fizeram evoluir, a paciência e todo o carinho e dedicação.

Agradecemos também a Brenno Duarte, Gabriel Guimarães Averbug, Arthur Adeodato, Humberto Terço, Rodrigo de Almeida Ai, e aos demais colegas que trabalharam conosco no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM) pelo auxílio prestado e pelo apoio durante o decorrer deste trabalho.

Gabriel Macedo Silveira
Rodrigo de Amorim Chermont

RESUMO

Este projeto visa o estudo de materiais inteligentes para atuadores em válvulas utilizando ligas de memória de forma, ou *Shape Memory Alloys* (SMA), visto que com o desenvolvimento industrial cada vez mais acelerado, existe a necessidade de investir em novas tecnologias de materiais. A conversão de energia térmica em energia mecânica é o cerne da utilização das ligas de SMA e o desafio atual nessa área, além dos estudos que buscam aprofundamento sobre as características e propriedades dos materiais de SMA, é o desenvolvimento de dispositivos que possam trabalhar com alta eficiência, de forma precisa e aproveitando sua alta densidade energética na infinidade de aplicações para atuadores. Primeiramente foi feita uma análise sobre os tipos de atuadores estudados e fabricados atualmente. O objetivo foi estudar estes sistemas de atuadores em válvulas para então elaborar um projeto de atuador de SMA com possibilidade de ampla utilização no mercado. Por fim, a partir de um fio de SMA comercial foram confeccionadas em laboratório molas helicoidais, as quais passaram por análises experimentais, com o fim de caracterizá-las e verificar a viabilidade do emprego do material escolhido no projeto.

Palavras-chave: *Shape Memory Alloys*, válvula inteligente, molas helicoidais.

ABSTRACT

The aim of this project is the study of smart materials for actuators in valves that use Shape Memory Alloys (SMA), since with the increasing rapid industrial development, there is a need for investments in new materials technologies. The conversion of thermal energy into mechanical energy is the core of the SMA application and the current challenge in this area, as well as studies that seek to deepen the characteristics and properties of SMA materials, the development of devices that work with high efficiency, precisely and taking advantage of its high energy density in the multiplicity of applications for actuators. Firstly, an analysis was made of the types of actuators studied and manufactured nowadays. The objective was to study these valve actuator systems to develop an SMA actuator design with the possibility of wide commercial use. Finally, from a commercial SMA wire, helical springs were made in the laboratory, which were analyzed experimentally, in order to characterize them and verify the feasibility of using the material chosen in the project.

Key-words: Shape Memory Alloys, smart valve, helical springs.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama indicativo dos intervalos típicos de atuação, tensão de atuação e densidade da energia de atuação para diferentes materiais com acoplamento direto. Adaptado de [1].	5
Figura 2: Diagrama de frequência de atuação para diferentes materiais com acoplamento direto. Adaptado de [1].	5
Figura 3: Atuador SMA linear composto de parafuso (1), eixo (2), placa-guia (3), flange (4) e fios SMA (5). Fonte [10].	7
Figura 4: Protótipo do atuador proposto. Fonte [10].	7
Figura 5: Esquema das configurações do boiler para aquecimento central (à esquerda) e para uso doméstico (à direita). Fonte [11].	8
Figura 6: Esquema do funcionamento geral da válvula de desvio. Fonte [11].	9
Figura 7: Vista em corte da válvula proposta. A mola restituidora não está mostrada para garantir a visibilidade dos outros componentes. Fonte [11].	9
Figura 8: Diagrama da válvula quando o circuito de água quente doméstica está fechado. Fonte [11].	10
Figura 9: Diagrama da válvula quando o circuito destinado ao aquecimento central está fechado. Fonte [11].	10
Figura 10: Atuador montado em um boiler. Fonte [11].	11
Figura 11: Pinça robótica. Detalhe: (a) Visão geral; (b) Parte intermediária; (c) pinça com elementos SMA (1- pistão, 2-mola). Fonte [9].	12
Figura 12: Protótipo do dispositivo (1-pistão de SMA, 2-mola de SMA). Fonte [9].	12
Figura 13: Rascunho do atuador. Fonte [12].	13
Figura 14: Vista superior da válvula (a) normalmente aberta e (b) normalmente fechada. Fonte [12].	14
Figura 15: Visão explodida da válvula. A montagem em camadas dos componentes permite o empilhamento modular dos componentes. Fonte [13].	15
Figura 16: Vista em corte da válvula. (a) e (c) denotam os estados 1 e 2 de funcionamento, enquanto que (b) ilustra a transição entre esses estados. Fonte [13].	16
Figura 17: Vista superior do atuador SMA, com quatro vigas de SMA unidas no centro e abas salientadas para o contato elétrico. Fonte [13].	16
Figura 18: Princípio de operação da válvula. Em (a), a válvula está aberta. Em (b), o efeito de memória de forma faz com que a válvula feche. Fonte [14].	17

Figura 19: Ilustrações mais detalhadas do projeto, algumas dimensões-chave e um exemplo de válvula enclausurada. Modificado de [14].	18
Figura 20: Válvula projetada quando está (a) fechada e quando está (b) aberta. Fonte [15].	19
Figura 21: Vista superior do protótipo da micro-válvula. (a) fotografia, (b) ilustração. Fonte [15].	20
Figura 22: (A) Esquema demonstrativo do funcionamento do atuador. (B) Fotografia das bombas. À esquerda, um comparativo de tamanho. Ao centro, uma única bomba fixada em um suporte de acrílico. À direita, uma série de bombas para movimentos peristálticos. Modificado de [16].	22
Figura 23: Modos de funcionamento da micro-bomba, com o transporte do fluido indicado pelas setas. Em (A), o funcionamento de uma única bomba. Em (B), o movimento peristáltico tanto para frente quanto para trás. Fonte [16].	23
Figura 24: (a) Esquema do projeto inicialmente concebido. (b) Projeto modificado. (c) Aspecto do fio de SMA atuando sobre o tubo. Fonte [17].	24
Figura 25: (a) Montagem do protótipo. (b) Comparação do tamanho com uma moeda. Fonte [17].	25
Figura 26: Estrutura do atuador tipo A (a), tipo B (b). Em (c) e (d) temos fotografias dos atuadores tipo A e B, respectivamente. Em (e) é demonstrada o dobramento do atuador. Fonte [18].	26
Figura 27: Atuador TiNiPd montado em um dissipador de calor de Cu. Fonte [19].	27
Figura 28: Vista explodida da micro-válvula atuada pelo TiNiPd. Fonte [19].	28
Figura 29: Protótipo da micro-válvula em comparação de tamanho com uma moeda. Fonte [19].	28
Figura 30: Foto da bomba de NiTi. Fonte [20].	29
Figura 31: A membrana de NiTi sob influência da pressão P. O diâmetro é indicado por $2a$ e as deflexões por d e d' . Fonte [20].	29
Figura 32: (a) Vista da seção transversal da válvula. (b) Vista superior da face do atuador de NiTi. Fonte [20].	30
Figura 33: Esquema representativo da válvula misturadora, empregando uma mola de SMA e outra de aço. Fonte [21].	31
Figura 34: Válvula de controle de fluxo. Fonte [21].	31
Figura 35: Esquema do protótipo para a análise experimental de fios de SMA. Fonte [6].	32
Figura 36: Figura esquemática do teste experimental. Fonte [6].	32

Figura 37: Esquema da caracterização termomecânica das molas de SMA. Adaptado de [22].	34
Figura 38: Esquema do atuador proposto, com as molas de SMA e de aço. Adaptado de [22].	35
Figura 39: Transformações de fase em uma liga de memória de forma. Adaptado de [1].	38
Figura 40: Esquema do efeito de memória de forma sujeito à tensão. Adaptado de [1]......	39
Figura 41: Tensão/deformação em SMA NiTi. Adaptado de [1]......	40
Figura 42: Gráfico do comportamento pseudoelástico. Fonte [25]......	41
Figura 43: O efeito de memória de forma reversível. Fonte [25].	42
Figura 44: Os componentes da válvula. Fonte própria.....	43
Figura 45: Desenho da luva. Fonte própria.	44
Figura 46: Desenho do travamento. Fonte própria.....	44
Figura 47: Desenho do tampão. Fonte própria.	45
Figura 48: Desenho das molas de aço (à esquerda) e de SMA (à direita). Fonte própria.	45
Figura 49: Esquema de instalação da válvula inteligente. Fonte própria.	46
Figura 50: Desenho da válvula na configuração "aberta". A seta representa o sentido do fluxo. Fonte própria.	50
Figura 51: Desenho da válvula na configuração "fechada". A seta indica o sentido do fluxo. Fonte própria.	51
Figura 52: Gráfico Temperatura versus Deformação sob carga mecânica constante de 172 MPa. Fonte [28]......	53
Figura 53: Rolo do fio SMA FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte própria.	53
Figura 54: Ensaio de tração do fio FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte [29].	54
Figura 55: Aparelho Netzsch DSC 200 F3 utilizado na análise térmica. Fonte própria.	55
Figura 56: Foto das molas enroladas nos fusos antes de irem para o forno. Fonte própria. ...	56
Figura 57: Forno utilizado no tratamento térmico das molas. Fonte própria.	57
Figura 58: Foto das molas construídas. Fonte própria.	57
Figura 59: Foto das molas de SMA com comparação de tamanho. Fonte própria.	58
Figura 60: Ensaio de tração da mola M4. Fonte própria.	59
Figura 61: Detalhe do ensaio. Fonte própria.	60
Figura 62: Desenho conceitual do aparato. Fonte própria.	61
Figura 63: Transdutor de posição GEFRAN modelo PY2-F-25-S. Fonte própria.....	62
Figura 64: Aquisitor de dados Spider 8. Fonte própria.	62
Figura 65: Discos de alumínio cortados. Fonte própria.	64

Figura 66: As molas de SMA devidamente fixadas aos olhais e conectadas entre si pela fiação em paralelo. Fonte própria.	64
Figura 67: Foto do aparato experimental pronto. Fonte própria.	65
Figura 68: Detalhe do aparato experimental, focado nas molas e no GEFTRAN. Fonte própria.	66
Figura 69: Gráfico Força versus Deslocamento do ensaio de tração do fio de SMA. Fonte [29].	68
Figura 70: Gráfico Carregamento x Deslocamento da mola M6. Fonte própria.....	69
Figura 71: Gráfico do DSC do fio FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte própria.....	70
Figura 72: Gráfico DSC da mola M6. Fonte própria.	71
Figura 73: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.	72
Figura 74: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.	73
Figura 75: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.	74
Figura 76: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.	75
Figura 77: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.	76
Figura 78: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.	77
Figura 79: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.	78
Figura 80: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.	79
Figura 81: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.	80
Figura 82: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 100 g. Fonte própria.	82
Figura 83: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 300 g. Fonte própria.	83
Figura 84: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 500 g. Fonte própria.	84

Figura 85: Gráfico do deslocamento médio de atuação pelas massas usadas nos testes. Fonte própria..... 85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Propriedades gerais típicas das ligas de NiTi, CuZnAl e CuAlNi. Fonte [24].....	37
Tabela 2: Especificações do fio SMA FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte [28].....	52
Tabela 3: Parâmetros do ensaio DSC do fio de NiTi. Fonte própria.....	56
Tabela 4: Medidas das molas confeccionadas. Fonte própria.	58
Tabela 5: Parâmetros do ensaio DSC da mola M6. Fonte própria.	60
Tabela 6: Parâmetros das baterias experimentais. Fonte própria.	67
Tabela 7: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 100 g. Fonte própria.....	82
Tabela 8: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 300 g. Fonte própria.....	83
Tabela 9: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 500 g. Fonte própria.....	84
Tabela 10: Deslocamento médio dos ciclos de atuação. Fonte própria.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

A – Austenita

A_f – Temperatura final de transformação para a fase austenítica

A_s – Temperatura inicial de transformação para a fase austenítica

C – Índice da mola

D – Diâmetro da espira da mola

D_{tub} – Diâmetro da tubulação

d – Diâmetro do fio da mola

F – Força exercida pela coluna d'água na tubulação

F_h – Força hidrostática

g – Aceleração da gravidade

h – Altura manométrica

k – Rigidez da mola

M – Martensita

M^d – Martensita não-maclada

M_f – Temperatura final de transformação para a fase martensítica

M_s – Temperatura inicial de transformação para a fase martensítica

M^t – Martensita maclada

\dot{m} – Vazão mássica

P_h – Pressão hidrostática

Q – Vazão

S – Área transversal da tubulação

v – Velocidade de escoamento

δ – Deslocamento

ρ – Densidade

σ – Tensão

σ_f – Tensão final da transformação de M^t para M^d

σ_s – Tensão inicial da transformação de M^t para M^d

σ_f^{AM} – Tensão final da transformação $A \rightarrow M$

σ_s^{AM} – Tensão inicial da transformação $A \rightarrow M$

σ_f^{MA} – Tensão final da transformação $M \rightarrow A$

σ_s^{MA} – Tensão inicial da transformação $M \rightarrow A$

σ_{ult} – Tensão última de ruptura

SUMÁRIO

Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 – Motivação	1
1.2 – Justificativa	2
1.3 – Objetivo	2
1.4 – Organização do Trabalho.....	2
Capítulo 2	4
Revisão Bibliográfica	4
2.1 – Atuadores de SMA	4
2.2 – Design de Atuadores.....	7
Capítulo 3	36
Fundamentação Teórica	36
3.1 – Ligas de Memória de Forma.....	36
3.2 – Transformações de Fase em Ligas de Memória de Forma.....	37
3.3 – Efeito de Memória de Forma.....	39
3.4 – Pseudoelasticidade.....	40
3.5 – Efeito de Memória de Forma Reversível.....	41
Capítulo 4	43
Projeto da válvula inteligente	43
4.1 – Válvula de travamento.....	43
4.2 – Carga hidrostática	46
4.2.1 – Cálculo da pressão hidrostática	46
4.2.2 – Cálculo da força hidrostática na tubulação.....	47
4.2.3 – Análise dinâmica	47
4.3 – Funcionamento da válvula inteligente.....	49
Capítulo 5	52
Metodologia Experimental	52
5.1 – Fio SMA utilizado	52
5.2 – Caracterização do fio de SMA.....	54
5.2.1 – Ensaio de tração.....	54
5.2.2 – Análise térmica (DSC)	55
5.3 – Confecção das molas helicoidais de SMA	56
5.4 – Caracterização das molas de SMA	59
5.4.1 – Ensaio de tração.....	59
5.4.2 – Análise térmica (DSC)	60
5.5 – Teste com carregamento constante.....	61

5.5.1 – Montagem do aparato experimental	63
5.5.2 – Procedimento experimental	66
Capítulo 6	68
Resultados Experimentais	68
6.1 – Ensaio de tração	68
6.1.1 – Fio FLEXINOL® Actuator Wire	68
6.1.2 – Mola M4 de SMA.....	69
6.2 – Análise térmica (DSC)	70
6.2.1 – Do fio FLEXINOL® Actuator Wire	70
6.2.2 – Da Mola M6	71
6.3 – Testes com carregamento constante	72
6.3.1 – Teste com massa de 100,0 g e 1,5 A por mola	72
6.3.2 – Teste com massa de 100,0 g e 2,0 A por mola	73
6.3.3 – Teste com massa de 100,0 g e 2,5 A por mola	74
6.3.4 – Teste com massa de 300,0 g e 1,5 A por mola	75
6.3.5 – Teste com massa de 300,0 g e 2,0 A por mola	76
6.3.6 – Teste com massa de 300,0 g e 2,5 A por mola	77
6.3.7 – Teste com massa de 500,0 g e 1,5 A por mola	78
6.3.8 – Teste com massa de 500,0 g e 2,0 A por mola	79
6.3.9 – Teste com massa de 500,0 g e 2,5 A por mola	80
6.3.10 – Resultados comparativos	81
Capítulo 7	86
Conclusões	86
7.1 – Sobre o material utilizado.....	86
7.2 – Sugestões futuras	87
BIBLIOGRAFIA	88
APÊNDICE A: Desenhos técnicos do projeto da válvula inteligente	90

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Motivação

Um dos grandes desafios da humanidade sempre foi promover uma melhor eficiência das máquinas e seus componentes, dentre eles seus atuadores. Os projetos em geral podem ter sua eficiência aprimorada diminuindo sua massa, o que traduz uma redução de custo e em uma melhora de rendimento, por isso a utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nos últimos anos, ocupando um importante espaço no planejamento e desenvolvimento de sistemas mecânicos. Esta classe de materiais, usualmente utilizada como sensores e atuadores nos chamados sistemas inteligentes, possui características adaptativas, modificando sua forma ou propriedades físicas a partir da imposição de um campo elétrico, magnético, temperatura ou carregamentos mecânicos. Em linhas gerais, pode-se dizer que, atualmente, os principais materiais inteligentes são os materiais piezelétricos, as ligas e polímeros com memória de forma, do inglês, *Shape Memory Alloys* (SMAs) e *Shape Memory Polymers* (SMPs), as ligas magnéticas com memória de forma, do inglês, *Magnetic Shape Memory Alloys* (MSMAs), os materiais magnetostrictivos e os fluidos eletro-magneto reológicos [1-3].

Os atuadores são fundamentais em qualquer sistema que haja necessidade de intervenção para uma mudança de natureza mecânica. As ligas com memória de forma, por serem materiais que tem uma excelente relação força por massa, podem contribuir muito nessa proposta. Atuadores de SMA são mais leves e proporcionam um rendimento melhor ao sistema além de um menor custo que componentes mecatrônicos e a possibilidade de acionamento automático.

Portanto, tendo em vista o alto número de acidentes domésticos envolvendo sistemas hidráulicos de alta temperatura, buscamos desenvolver um dispositivo de travamento que utilize um atuador de SMA, com baixo custo e boa relação força por massa, utilizando o material disponível no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico dos Materiais do CEFET/RJ.

1.2 – Justificativa

As ligas com memória de forma são materiais muito atrativos devido ao seu potencial para aplicações como atuadores usando sua habilidade de memorizar formas através de carregamentos termomecânicos. As propriedades singulares desses materiais estão associadas com as transformações martensíticas responsáveis por diferentes comportamentos termomecânicos. Além da pseudoelasticidade e do efeito de memória de forma, as SMAs podem ser atuadas de modo reversível através de carregamentos térmicos utilizando o efeito de memória de forma com tensão assistida SATWME (*Stress-Assisted Two-Way Memory Effect*).

O trabalho propõe o estudo experimental do conceito de atuação inteligente empregando o efeito de memória de forma para o desenvolvimento de uma válvula de controle de fluxo hidráulico.

1.3 – Objetivo

O objetivo principal deste trabalho é o estudo de ligas com memória de forma para a fabricação de um atuador capaz de acionar uma válvula de travamento para uso doméstico, a qual interromperia a vazão caso a temperatura do fluido excedesse 45°C. Para isso, será feita uma análise experimental das propriedades termomecânicas do material SMA em suas possíveis configurações. Assim sendo, após a obtenção de parâmetros e dados experimentais, será realizada a confecção de um protótipo experimental.

1.4 – Organização do Trabalho

Este projeto está dividido em sete capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentada uma introdução ao assunto, a justificativa e os objetivos deste trabalho. No segundo capítulo é feita uma revisão bibliográfica com o fim de familiarizar o leitor ao tema principal do projeto e apresentar diversos exemplos de aplicações dos chamados materiais de memória de forma, com foco naquelas que envolvem a construção de válvulas ou micro-válvulas ou o emprego de molas helicoidais. O terceiro capítulo aprofunda-se na teoria por trás dos materiais de memória de forma, explicando os princípios do comportamento termomecânico das ligas de memória de forma. O capítulo 4 se trata a respeito do projeto da válvula e seu modo de

funcionamento. O capítulo 5 descreve a metodologia empregada no trabalho, com a confecção dos atuadores e os devidos procedimentos experimentais realizados, cujos resultados são discutidos no sexto capítulo. Por fim, o sétimo e último capítulo está destinado às conclusões referentes aos resultados obtidos e sugestões para aprimoramentos futuros.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

2.1 – Atuadores de SMA

Os chamados materiais inteligentes vêm, ao longo dos anos mais recentes, desempenhando um papel cada vez mais importante no desenvolvimento de projetos de engenharia, atendendo aos desejos de aperfeiçoamento e economia. Esses materiais conseguem, através de um estímulo externo, modificar suas propriedades físicas, sendo capazes de atuar. Um atuador consegue converter um sinal de entrada não mecânico em um sinal de saída mecânico, e a resposta mecânica dos materiais inteligentes é tipicamente uma ou duas ordens de grandeza superior à resposta dos materiais de comportamento convencional. Os tipos de materiais inteligentes mais conhecidos são os piezelétricos e eletrostrictivos, os piezomagnéticos e magnetostrictivos, e as ligas com memória de forma [1].

Em relação ao projeto de atuadores inteligentes, dois aspectos se destacam: a densidade de energia disponível e a frequência de atuação do material. A Figura 1 compara a densidade de energia, denotada pelas linhas tracejadas, entre vários materiais, enquanto que a Figura 2 compara a frequência de atuação. Conforme mostrado, as ligas de memória de forma podem apresentar uma frequência de atuação baixa, visto que sua atuação depende da troca de calor do atuador com o ambiente.

Desde sua descoberta, a demanda das ligas de memória de forma (SMAs) para aplicações diversas nas áreas de engenharia vêm crescendo em vários ramos comerciais, tais como aplicações industriais, estruturas e compósitos, nas áreas automotivas, aeroespaciais e biomédicas, mini-atuadores e sistemas micro-eletrônicos, atenuadores de vibrações, telecomunicações, aquecimento e condicionamento de ar e até mesmo em moda, conforme citam os trabalhos de [4] e [5]. As SMAs demonstram a capacidade de restabelecer sua forma original mesmo após sofrerem altas deformações (até 8%), desde que seja aplicado um carregamento térmico adequado. Esta capacidade extraordinária advém das transformações de fase na microestrutura do material. Existem vários materiais que podem ser classificados como SMAs, entre eles destacam-se as ligas com base em Níquel e Titânio (NiTi); as ligas com base em Cobre, como CuAlNi e CuZnAl; as ligas ferrosas tais como FeCrNiMnSi,

FeMnSiCrNi e FeCrNiMnSiCo; além de filmes finos, compósitos e espumas poliméricas [6]. Contudo, as ligas com base em Cu e Fe apresentam instabilidade, impraticabilidade e desempenho termomecânico inferior quando comparadas com o NiTi, sendo esta a razão pela grande preferência por este último nas mais diversas aplicações de SMAs [4].

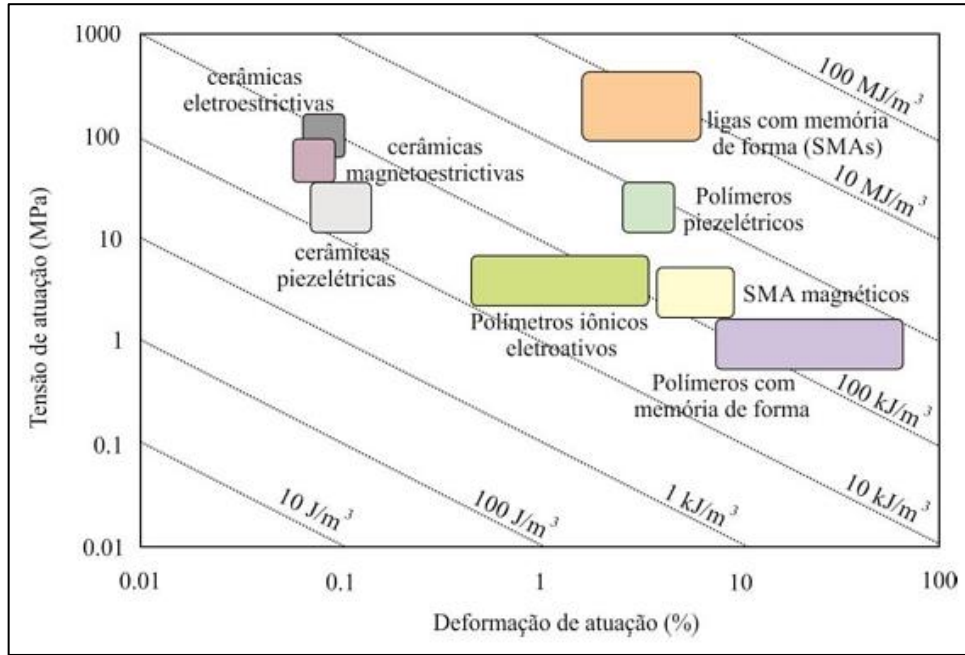


Figura 1: Diagrama indicativo dos intervalos típicos de atuação, tensão de atuação e densidade da energia de atuação para diferentes materiais com acoplamento direto. Adaptado de [1].

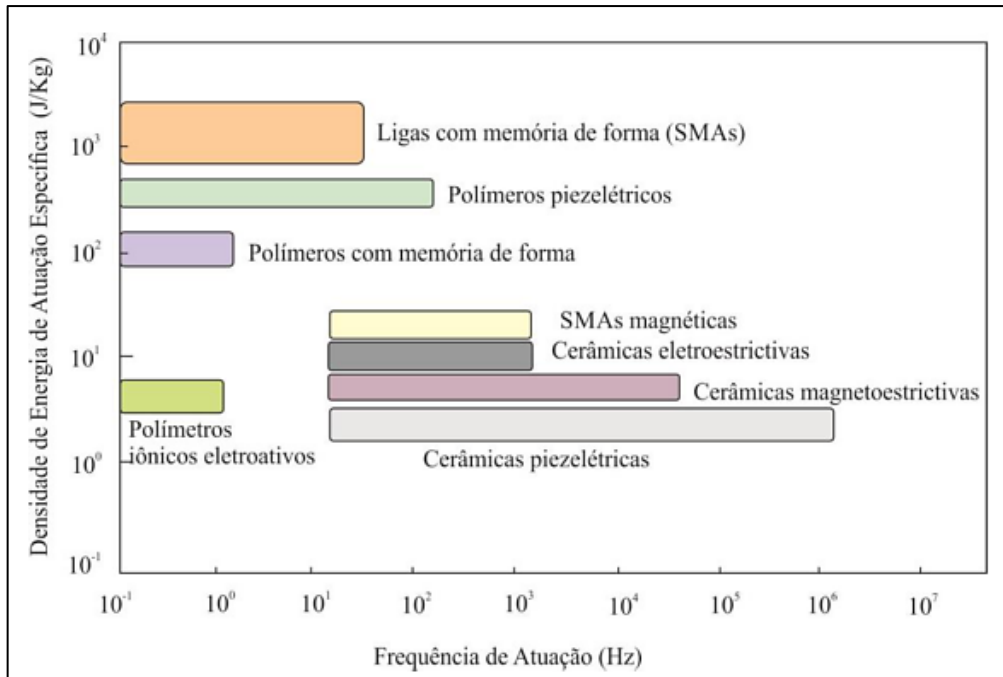


Figura 2: Diagrama de frequência de atuação para diferentes materiais com acoplamento direto. Adaptado de [1].

As ligas à base de NiTi, cunhadas comercialmente como Nitinol, alcunha originada da junção do nome do local de descobrimento, o *Naval Ordnance Laboratory*, com a sua composição química, são amplamente empregadas em várias aplicações comerciais devido às suas excelentes propriedades mecânicas, um bom efeito de memória de forma e também por possuir biocompatibilidade. Para efeito de comparação, o Nitinol é capaz de recuperar deformações de até 8%, enquanto que outras ligas de SMA, como o CuZnAl e o FeNiCoTi, conseguem recuperar apenas na faixa entre 2,5% a 4% [1].

As ligas de memória de forma possuem características notáveis que possibilitam esses materiais trabalharem como atuadores, como Efeito de Memória de Forma (SME), a pseudoelasticidade e a SATWME (*Stress Assisted Two-Way Memory Effect*). Os dispositivos de SMA podem estar tanto associados a sistemas que desenvolvem pequenas forças ou deslocamentos como micro-atuadores (micro-válvulas, micro-bombas, micro-interruptores, micro-posicionadores, entre outros) quanto a sistemas que requerem grandes forças ou torques [7].

Os atuadores de SMA basicamente funcionam como conversores eletromecânicos, convertendo a energia elétrica fornecida em energia mecânica, através da energia térmica. Isso se torna possível devido ao efeito Joule. Quando comparados com atuadores mais tradicionais (elétricos, hidráulicos e pneumáticos), podemos citar algumas vantagens, como construção mecânica extremamente simples, dispensabilidade de componentes mecânicos extras relacionados à transmissão e transformação de energia, tamanhos menores, operação silenciosa e elevada razão força/massa [8,9].

Um atuador SMA é constituído por diversos elementos: o elemento SMA propriamente dito (Nitinol, etc.), uma estrutura mecânica, um elemento restaurador que atua sobre o SMA de forma que este consiga recuperar sua forma, uma unidade de controle elétrico responsável por suprir uma corrente e aquecer o sistema, e um conjunto de outros elementos cuja função é realizar o acoplamento entre o atuador e a estrutura mecânica [10].

Um elemento SMA pode ser empregado sob os mais variados formatos, como fios, chapas, membranas e molas, em inúmeras áreas de atuação. A seguir serão apresentados diversos atuadores encontrados na literatura que utilizam o potencial desses materiais inteligentes.

2.2 – Design de Atuadores

Os autores citados em [10] desenvolveram um atuador linear para acionamento de uma válvula hidráulica, esquematizada na Figura 3. Essa válvula é composta por um parafuso fechado, um eixo, uma chapa metálica, um flange e dois fios de SMA. Quando uma corrente elétrica é aplicada, os fios de SMA se aquecem e contraem, movimentando a flange que, por sua vez, está conectada a um eixo que transfere o movimento para fora do parafuso. Quando o aquecimento é interrompido, uma mola externa, não demonstrada no esquema, atua como elemento restituidor, empurrando o flange para o interior do dispositivo e, conseqüentemente, puxando o eixo do atuador no mesmo sentido.

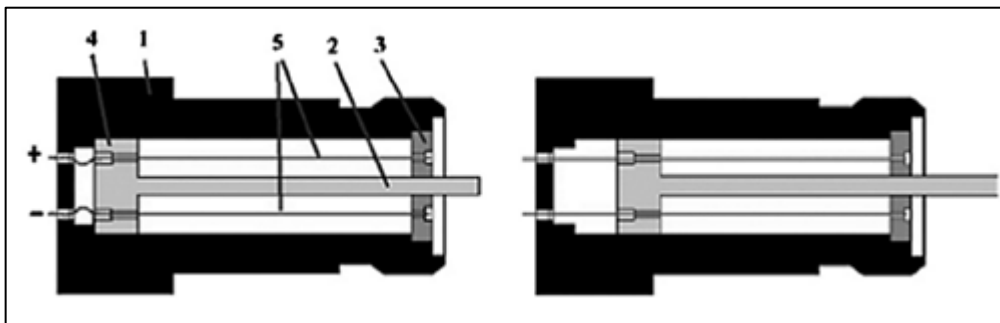


Figura 3: Atuador SMA linear composto de parafuso (1), eixo (2), placa-guia (3), flange (4) e fios SMA (5).
Fonte [10].

Testes com dois fios de Nitinol, com 201 μm de diâmetro cada, foram feitos a uma pressão hidráulica de 200,0 bar em óleo a temperatura de 24°C. Resultados experimentais demonstraram que este atuador é capaz de produzir deslocamento de 0,8 mm contra uma força de 98,0 N produzida pela mola. O tempo gasto na atuação foi de 0,4 s e o processo reverso completou-se em 3,0 segundos. A Figura 4 mostra o protótipo deste projeto [10].

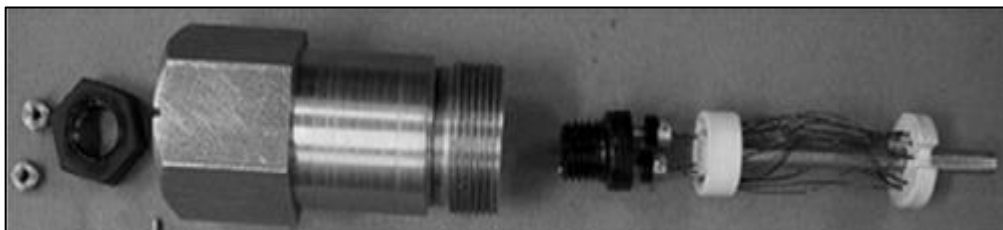


Figura 4: Protótipo do atuador proposto. Fonte [10].

Os autores em [11] propuseram uma válvula de desvio de um boiler para aquecimento de água cujo atuador é um elemento SMA. Esse boiler em questão aquece a água

através da troca de calor entre o gás de combustão e a água propriamente dita em uma câmara selada chamada de *trocador de calor primário*. A água quente serve tanto ao uso doméstico como para o aquecimento central, e é a válvula de desvio previamente mencionada que divide a água quente proveniente do trocador de calor primário para cada uma dessas finalidades distintas. A Figura 5 mostra a configuração de um boiler tanto para aquecimento quanto para uso doméstico, enquanto que a Figura 6 demonstra o funcionamento geral da válvula.

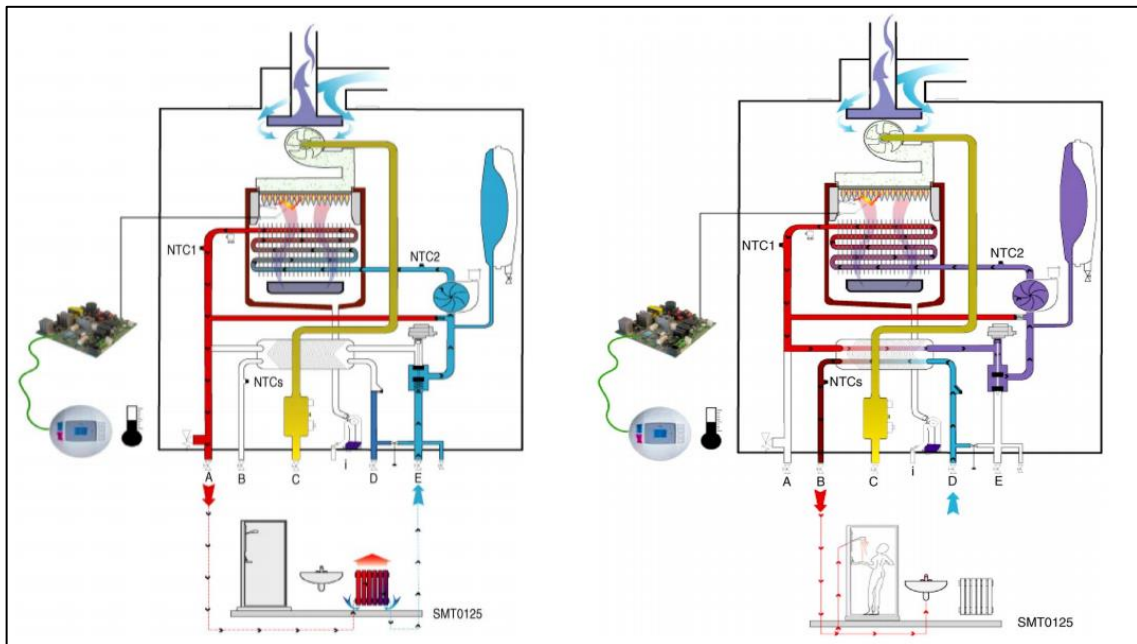


Figura 5: Esquema das configurações do boiler para aquecimento central (à esquerda) e para uso doméstico (à direita). Fonte [11].

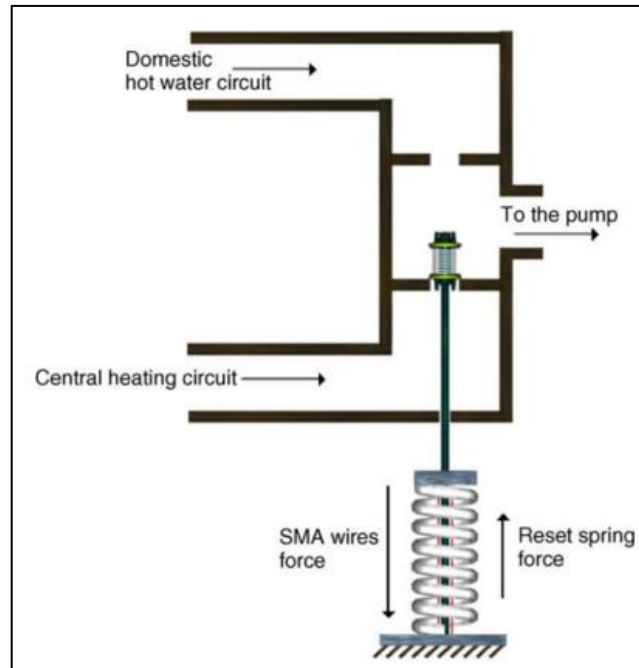


Figura 6: Esquema do funcionamento geral da válvula de desvio. Fonte [11].

A válvula de SMA propriamente dita, explícita na Figura 7, é constituída por um corpo de plástico, dentro do qual estão um eixo com obturadores destinados ao desvio do fluxo de água e o elemento atuador, este último composto por dois fios SMA e uma mola que atua como elemento restituidor. Em um detalhe interessante, os fios de SMA foram separados em duas metades mecanicamente unidas por uma chapa. Essa medida foi tomada para reduzir as dimensões da válvula sem mudar sua movimentação.

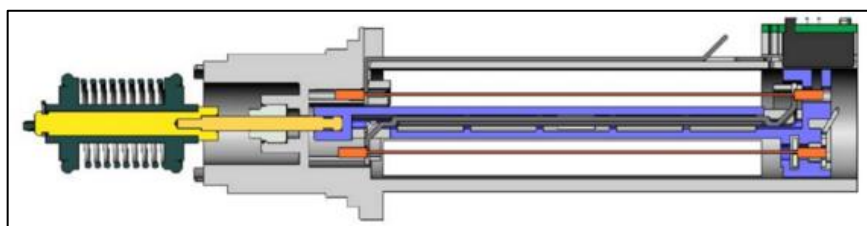


Figura 7: Vista em corte da válvula proposta. A mola restituidora não está mostrada para garantir a visibilidade dos outros componentes. Fonte [11].

O funcionamento da válvula então se baseia na abertura ou no fechamento dos circuitos de água quente doméstica e de aquecimento central, movimentos os quais são requeridos pelo usuário de acordo com suas necessidades. É a variação da força desenvolvida entre a mola restituidora e os fios de SMA que determina o movimento dos obturadores e, portanto, o fechamento de um circuito ou do outro. A Figura 8 mostra a válvula quando o circuito para a água quente doméstica está fechado. Esta posição é mantida pela mola

restituidora, que deforma os fios de SMA, movendo o obturador de forma a fechar o circuito. Quando o sistema é aquecido por efeito Joule, os fios de SMA contraem-se, exercendo uma força superior à da mola e, conseqüentemente, movendo o obturador para a posição que abre o circuito de água quente, como indicado na Figura 9. Se o usuário interromper a demanda por água quente para fins domésticos, o aquecimento dos fios de SMA cessará e eles voltarão para a posição original da Figura 8, reiniciando o processo.

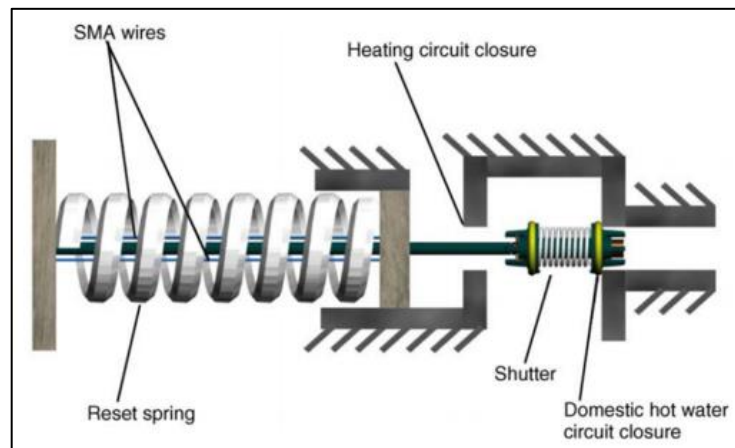


Figura 8: Diagrama da válvula quando o circuito de água quente doméstica está fechado. Fonte [11].

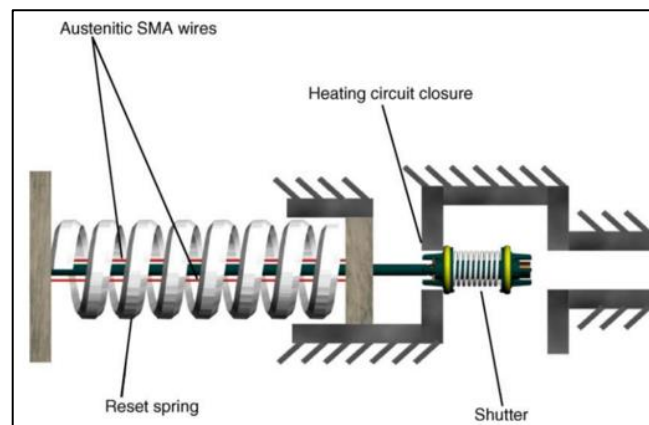


Figura 9: Diagrama da válvula quando o circuito destinado ao aquecimento central está fechado. Fonte [11].

Por fim, vários testes de desempenho foram conduzidos para verificar a funcionalidade da válvula montada em um boiler Uno Ariston 24 MFFI. Esses testes mostraram que o tempo de atuação da válvula SMA (4,35 s) é menor que o tempo de atuação de um motor elétrico (6,05 s); que a operação de funcionamento é praticamente silenciosa e que o movimento do obturador na válvula de SMA é o suficiente para abrir a passagem do fluxo de água sem gerar grandes perdas de pressão, quando comparado com uma configuração mais tradicional com motor elétrico. A Figura 10 mostra o atuador descrito montado no boiler [11].



Figura 10: Atuador montado em um boiler. Fonte [11].

Com o intuito de exemplificar o uso de atuadores SMA com formato de molas, os autores citados em [9] elaboraram uma pinça robótica, como visto na Figura 11 (a). O sistema proposto é constituído de uma parte intermediária, cujo propósito é manter a pinça na posição horizontal, e pela pinça de duas mandíbulas. Esses componentes são mostrados na Figura 11, em (b) e (c), respectivamente.

A pinça é movida por dois atuadores de SMA: um em forma de pistão, servindo como força principal quando agarrando um objeto, e o outro com formato de mola, a qual atua em oposição no ato de liberação do objeto agarrado. O sistema construído está mostrado na Figura 12 [9].

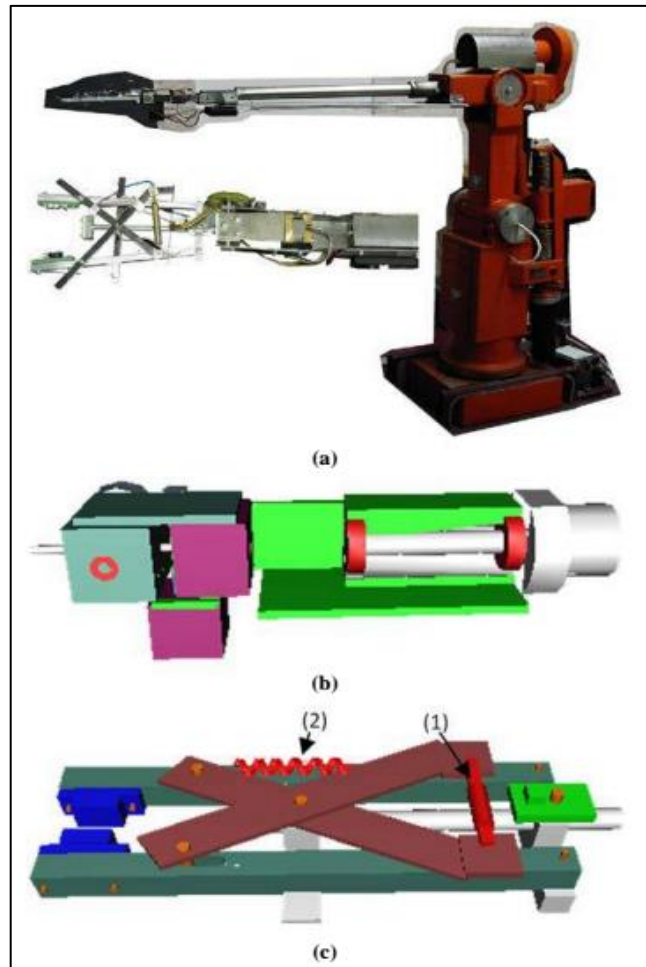


Figura 11: Pinça robótica. Detalhe: (a) Visão geral; (b) Parte intermediária; (c) pinça com elementos SMA (1-pistão, 2-mola). Fonte [9].

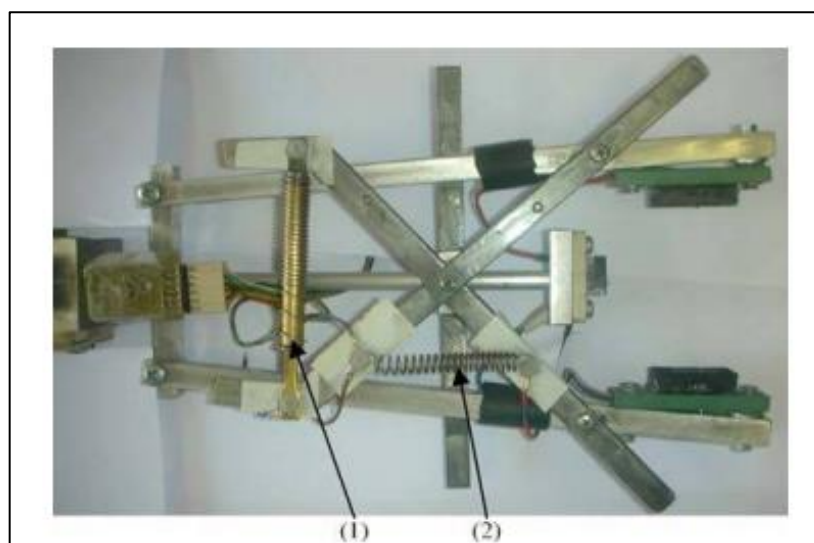


Figura 12: Protótipo do dispositivo (1-pistão de SMA, 2-mola de SMA). Fonte [9].

Há uma enorme gama de aplicações para o desenvolvimento de plataformas de micro-escoamento, tais como detecção de substâncias químicas ou patogênicas, sistemas de fornecimento de medicamentos, cultivo celular, entre outros. Uma das principais tarefas no projeto e operação dessas plataformas é controlar de maneira eficiente o escoamento em micro-canais por meio de micro-válvulas. Os autores em [12] então desenvolveram um dispositivo atuado por SMA (Figura 13) para ser usado em conjunto com dutos de silicone imersos em substrato de dimetilpolisiloxano, ou PDMS (*polydimethylsiloxane*), material de baixo custo de fabricação ideal para esse tipo de aplicação.

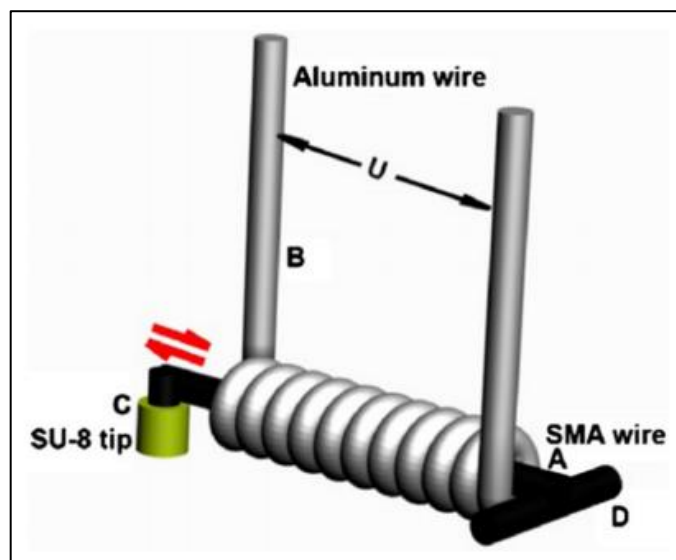


Figura 13: Rascunho do atuador. Fonte [12].

A micro-válvula sugerida consiste de um fio de SMA, representado em preto na Figura 13, envolto por uma espira de alumínio (B), a qual servirá como fonte de aquecimento para a atuação. Às extremidades do fio principal de SMA são soldados dois fios do mesmo material, indicados por C e D na Figura. A ponta C, que possui um revestimento especial que auxilia no fechamento do micro-tubo, movimenta-se quando o fio principal é atuado, enquanto que a ponta D, por ser mais pesada e perpendicular à espira de Al, funciona como elemento fixador da estrutura quando esta se encontra imersa no substrato de PDMS.

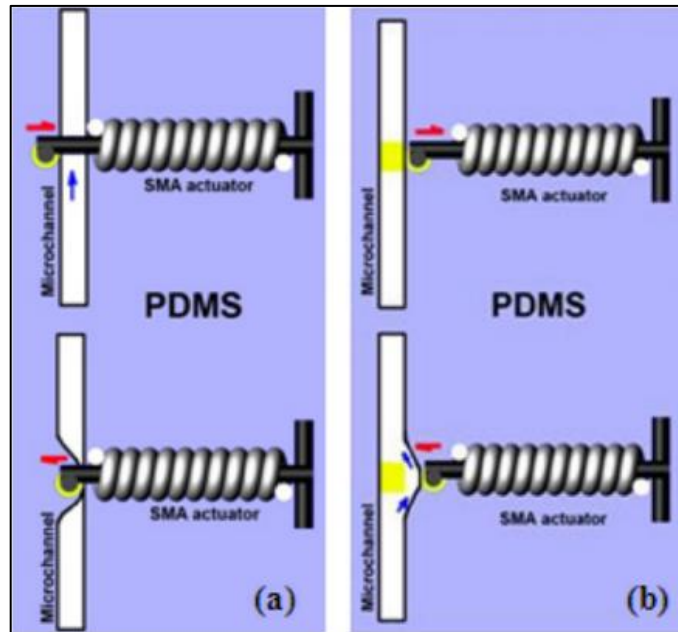


Figura 14: Vista superior da válvula (a) normalmente aberta e (b) normalmente fechada. Fonte [12].

Quando uma corrente elétrica é aplicada na espira de Al, haverá aumento na temperatura do SMA pelo efeito Joule. Quando a temperatura do conjunto ultrapassar a temperatura de transformação (70°C), o fio de SMA encolherá, aproximando as pontas C e D. Como esta última é fixa, o dispositivo acaba por fechar o micro-tubo, cumprindo seu papel como válvula. Existem ainda duas maneiras de construir a válvula: normalmente aberta ou normalmente fechada, como mostradas na Figura 14 em (a) e (b), respectivamente. No primeiro caso, a ponta C colapsa as paredes do micro-tubo quando o fio de SMA é atuado, enquanto que no segundo, um tampão é inserido no duto, bloqueando-o, e a ponta C separa a parede interna do tampão quando o fio é atuado, liberando o fluxo.

Para testar o desempenho do projeto, uma seringa é utilizada para bombear água destilada à vazão constante. A corrente elétrica empregada é de 1,8 A reduzida a 1,5 A depois da atuação de forma a evitar o superaquecimento do sistema. O tempo de resposta para a válvula normalmente aberta pode chegar a até 1,0 segundo para uma vazão de $4,0 \mu\text{L}/\text{min}$, e quanto maior for a corrente de atuação, mais rápido ainda torna-se o tempo de resposta. Entretanto, o valor da corrente a ser aplicada é limitado pela baixa dissipação de calor do PDMS, a qual também afeta a temperatura do líquido transportado [12].

Ainda nesta área, os autores citados em [13] introduziram um novo modelo de micro-válvula biestável que combina atuação em SMA e retenção magnetostática. Devido à biestabilidade, o suprimento contínuo de energia para manter a válvula aberta ou fechada não é mais necessário. Esse tipo de válvula é de considerável interesse em aplicações de controle

de fluxo, como, por exemplo, em sistemas pneumáticos portáteis de alta demanda e análises biológicas de alto rendimento. As Figuras 15 e 16 mostram a esquematização desta válvula, em vista explodida e quando montada, respectivamente. O projeto consiste em uma unidade SMA para bi atuação envolta simetricamente pelas metades do invólucro da válvula e separada espacialmente deste último por uma membrana, uma em cada metade. A unidade SMA pode ainda ser subdividida em duas micro-pontes (Figura 17) pré-tensionadas uma em relação à outra em seu centro por um cilindro magnético, onde o deslocamento dos SMAs é definido pela distância entre duas camadas magnéticas postas imediatamente acima e abaixo da unidade SMA. A força magnetostática gerada por esses componentes determina qual o estado de ativação da válvula, conforme mostrado na Figura 16 (a) e (c), respectivamente. A troca dos estados se dá através do aquecimento da micro-ponte SMA inferior, cuja força de atuação vence a força magnetostática, liberando o escoamento inferior enquanto fecha o superior ao mesmo tempo. Um tampão esférico é utilizado para facilitar o fechamento dos orifícios de entrada, proporcionando uma melhor vedação.

Essa micro-válvula teve resultados bastante positivos, considerando as pequenas dimensões e baixo consumo de energia, apresentando o mesmo desempenho entre ambas as saídas de fluxo, com escoamento de 1250,0 cm³ para o teste com gás (N₂) e 11,0 ml/min para o teste com líquidos (água), para pressões de 200,0 kPa e 100,0 kPa, respectivamente [13].

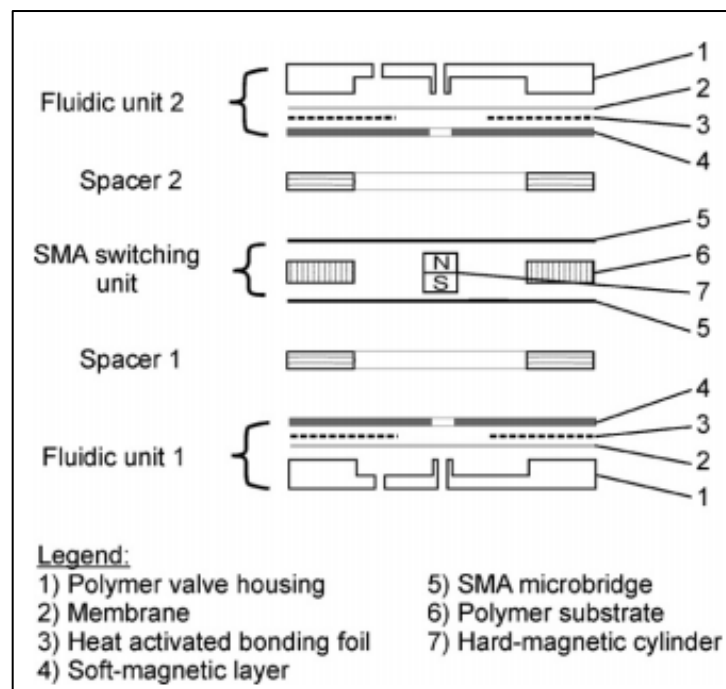


Figura 15: Visão explodida da válvula. A montagem em camadas dos componentes permite o empilhamento modular dos componentes. Fonte [13].

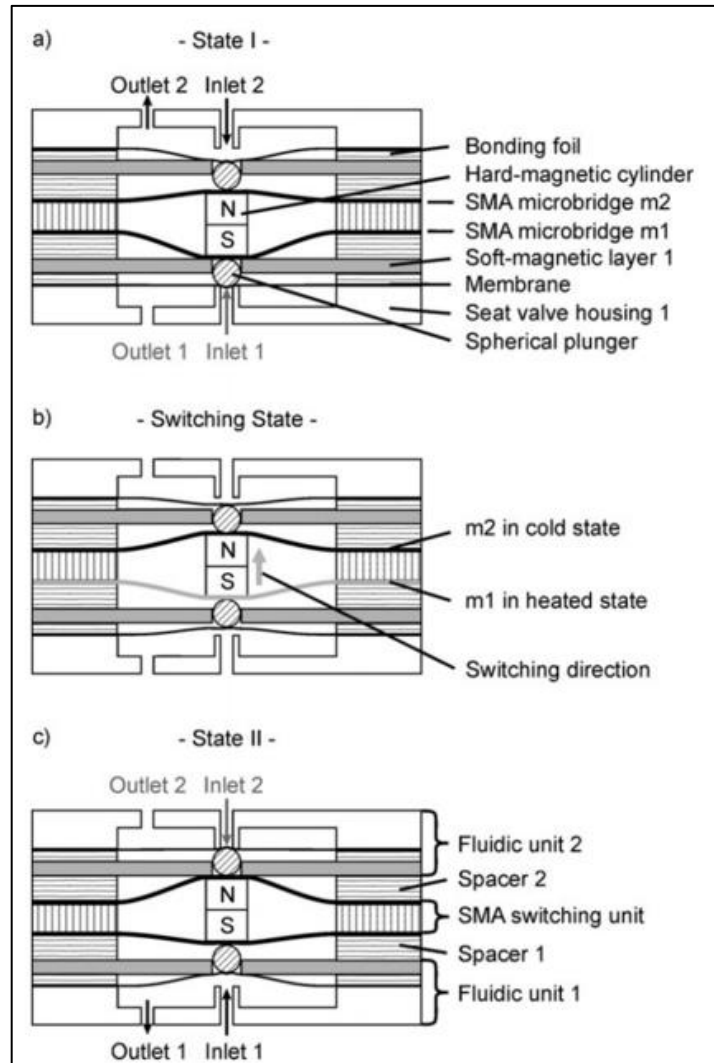


Figura 16: Vista em corte da válvula. (a) e (c) denotam os estados 1 e 2 de funcionamento, enquanto que (b) ilustra a transição entre esses estados. Fonte [13].

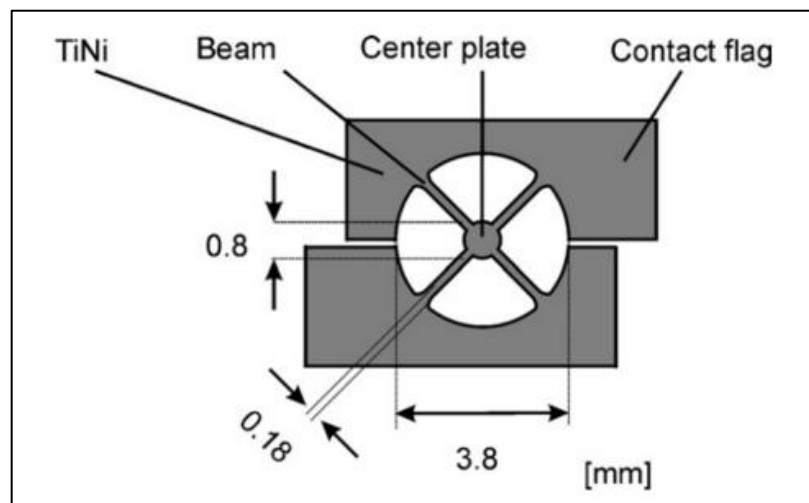


Figura 17: Vista superior do atuador SMA, com quatro vigas de SMA unidas no centro e abas salientadas para o contato elétrico. Fonte [13].

Já os autores em [14] criaram outra micro-válvula de SMA capaz de suportar grandes fluxos de gases. Tentativas prévias de construir essa válvula empregando atuadores mais tradicionais não deram resultados positivos, visto que esses materiais não eram fortes o bastante para suportar a pressão e as vibrações mecânicas provocadas pelo escoamento do gás. Portanto, mais uma vez as ligas de memória de forma apareceram como alternativa mais robusta, mais confiável e com maior custo-benefício. O princípio de funcionamento desta válvula, ilustrado na Figura 18, possui características de uma válvula de gaveta, no sentido de que um elemento restritivo move-se perpendicularmente ao sentido do fluxo, possibilitando o controle de um grande volume de fluxo. A válvula mantém-se aberta através da própria pressão gerada pelo escoamento, a qual deforma uma viga de SMA, e ela fecha quando o atuador é aquecido, pois o efeito de memória de forma consegue contrabalançar a pressão do gás. O material SMA escolhido é uma pequena chapa de NiTi laminada a frio, devido às suas excelentes propriedades e também por ser facilmente encontrada comercialmente em diversas espessuras. A Figura 19 mostra a micro-válvula em maiores detalhes, inclusive como seria seu aspecto em funcionamento.

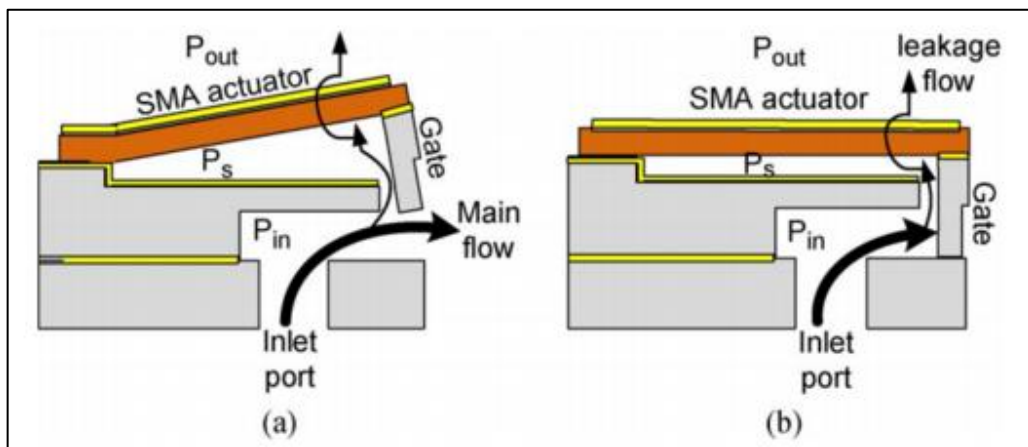


Figura 18: Princípio de operação da válvula. Em (a), a válvula está aberta. Em (b), o efeito de memória de forma faz com que a válvula feche. Fonte [14].

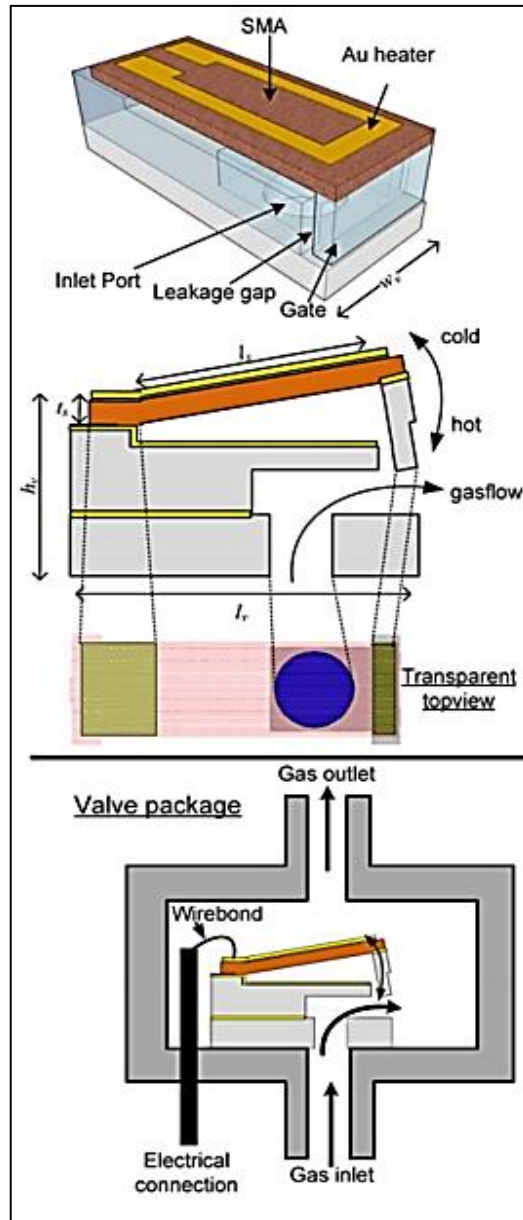


Figura 19: Ilustrações mais detalhadas do projeto, algumas dimensões-chave e um exemplo de válvula enclausurada. Modificado de [14].

Conforme dito, é a chapa de SMA que permite a atuação e o perfeito funcionamento da válvula. Com isso em mente, foi investigada qual a relação entre seu comprimento e o controle do escoamento. Comprimentos maiores permitem um maior volume de escoamento, contudo há maior risco de vazamentos, enquanto que o inverso ocorre com comprimentos menores. Apesar disso, um protótipo construído com uma área de apenas $1,0 \times 3,3 \text{ mm}^2$ consegue, com sucesso, controlar uma vazão de $3100 \text{ cm}^3/\text{min}$ submetida à pressão padrão de 70 kPa utilizando $0,35 \text{ W}$ de potência de acionamento. Essas válvulas possuem uma razão desempenho/área três vezes superior à de outras válvulas com atuadores tradicionais [14].

Os autores do trabalho referenciado em [15] projetaram, desenvolveram e testaram uma micro-válvula SMA linear fluídica com poder de detecção de fluxo a partir de materiais comerciais mais comuns, sem a necessidade de utilizar processos de fabricação especiais, como micro-usinagem. A ideia é fazer uso de um fio de Nitinol curvado, o qual sofre compressão na circunferência interna e tração na externa. Quando aquecido por corrente elétrica, a parte mais externa contrai devido à mudança de fase, restaurando o formato retilíneo do fio. A Figura 20 mostra uma ilustração de corte transversal da válvula.

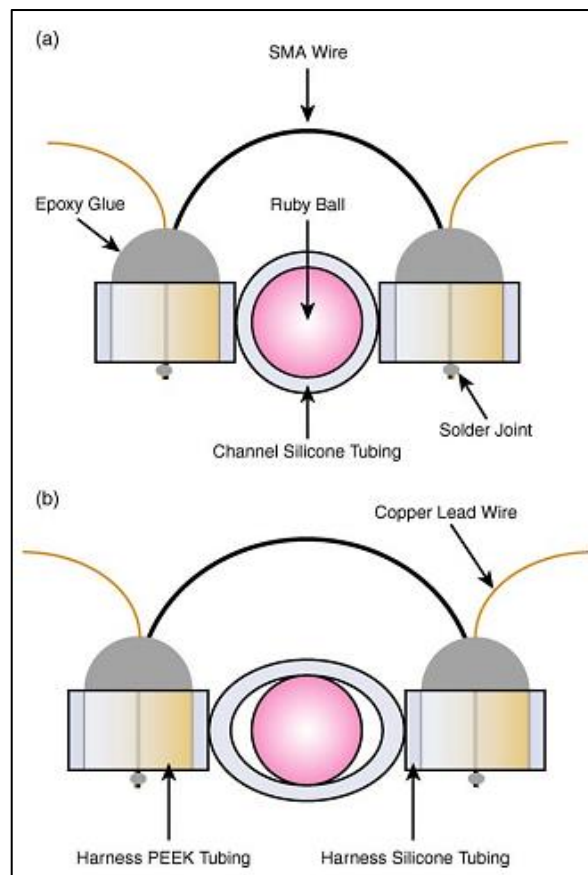


Figura 20: Válvula projetada quando está (a) fechada e quando está (b) aberta. Fonte [15].

A construção da válvula começa por um tubo de silicone (304.8 μm de diâmetro interno por 635 μm de diâmetro externo), ao qual são colados, perpendicularmente, mais dois outros tubos (635 μm de comprimento), do mesmo material. Esses tubos externos são preenchidos com poliéter-étercetona, ou PEEK (*polyetheretherketone*), que funciona como um isolante térmico entre o fluido e o fio de Nitinol, o qual se encontra arqueado 711.2 μm sobre o tubo principal. Além disso, fios de cobre fixados com solda passam através do PEEK e fazem contato com as extremidades do fio de Nitinol, como mostrado na Figura 20. Por fim,

é inserida no tubo principal uma pequena esfera de rubi sintético (397 μm de diâmetro) posicionada exatamente entre os tubos perpendiculares.

A Figura 21 (a) mostra o estado não atuado da válvula, onde o fio SMA está abaixo da temperatura de transformação. Quando ele é aquecido por efeito Joule, o fio atinge a temperatura de transformação e começa a exercer uma força sobre o sistema, tentando recuperar seu formato retilíneo original. Essa força deforma o tubo de silicone ao redor da esfera sintética de forma a permitir a passagem do fluido, como mostra a Figura 21 (b). Cessando o fornecimento de energia e, portanto, de aquecimento, o Nitinol esfria novamente e o sistema consegue retornar ao estado da Figura 21 (a) através do viés elástico do tubo principal de silicone.

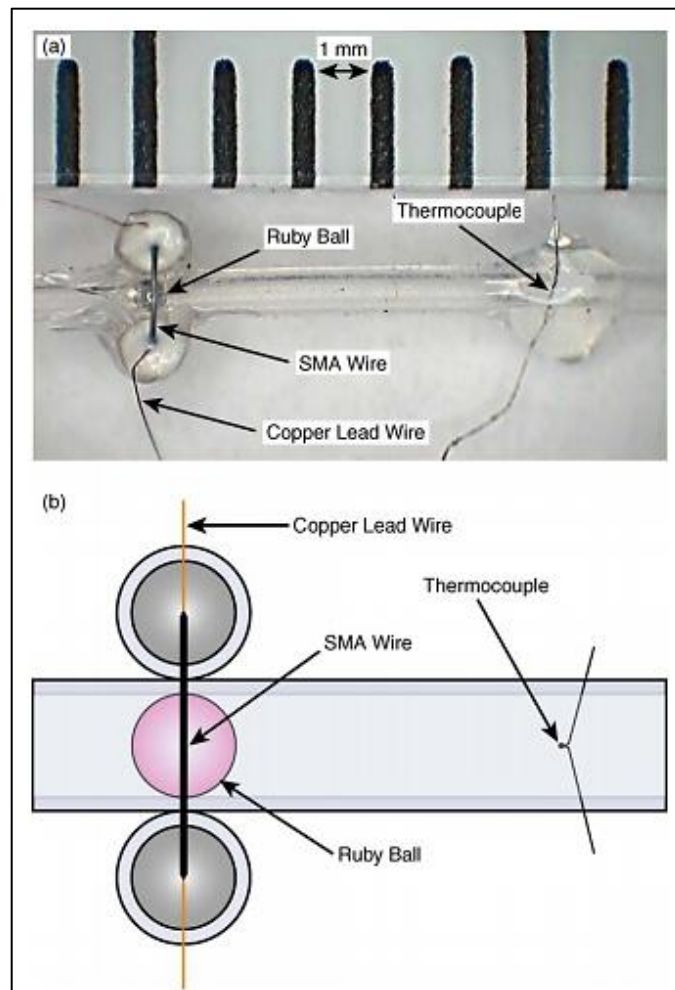


Figura 21: Vista superior do protótipo da micro-válvula. (a) fotografia, (b) ilustração. Fonte [15].

Como mencionado anteriormente, esse projeto é também capaz de realizar detecção de fluxos. Essa característica é alcançada pela inclusão de um termopar a uma distância de 5,0 mm do Nitinol, no sentido do fluxo. Desta maneira, quando a válvula é atuada, um pulso

transiente térmico é injetado no escoamento, sendo o fluxo determinado pela derivada da temperatura desse pulso. Foi observado que o quanto maior a inclinação da derivada for, mais veloz será o escoamento do fluido.

Vários testes experimentais foram conduzidos e foi descoberto que a força mínima para abrir a válvula é da ordem de 40 mN, porém são necessários 70 mN para que a válvula não atue como um restritor de fluxo. Foi estimado que um fio de Nitinol de 76,2 μm é capaz de produzir essa força quando o mesmo se encontra em sua temperatura de transição, 70°C. O teste de tempo de resposta indica que para a válvula não restringir o escoamento, a energia fornecida tem que ser maiores que 213 mW, potência para qual o tempo de atuação é de 2,5 s. Contudo, foi determinado que uma atuação ideal, na qual a válvula abre completamente, sem restringir o fluxo, deve ser feita com 213 mW durante 4,0 s, seguida por um tempo de resfriamento de 10 s. Por fim, para o teste de sensoriamento de escoamento, foi descoberto que o erro entre o fluxo real e o medido é de aproximadamente $\pm 6\%$ [15].

A construção de dispositivos SMA pode ser relativamente simples, como mostram os autores em [16], que desenvolveram uma micro-bomba utilizando apenas uma tira de NiTi. O objetivo deles é a simplificação dos mecanismos micro-fluídicos atuais. É importante mencionar que os próprios tubos ou canais, normalmente feitos de materiais flexíveis, geram a força restituidora.

Como já mencionado, o componente principal desse dispositivo é uma fina chapa de NiTi (5,6 mm por 7,8 mm) com quatro furos retangulares (0,4 mm por 5,2 mm), conforme aponta a Figura 22 (A e B). Um tubo plástico elástico, com diâmetro interno de 1,3 mm e espessura de 0,2 mm, é inserido por entre os furos da chapa SMA. Esse tubo tem que ser macio o bastante para poder colapsar sob a força exercida pelo NiTi, provocada pela mudança de fase, e deve apresentar um retorno elástico para recuperar o formato original do mesmo. Por fim, um pequeno plug de silicone (0,5 mm de diâmetro) é inserido no tubo com o propósito de monitorar a movimentação do fluido.

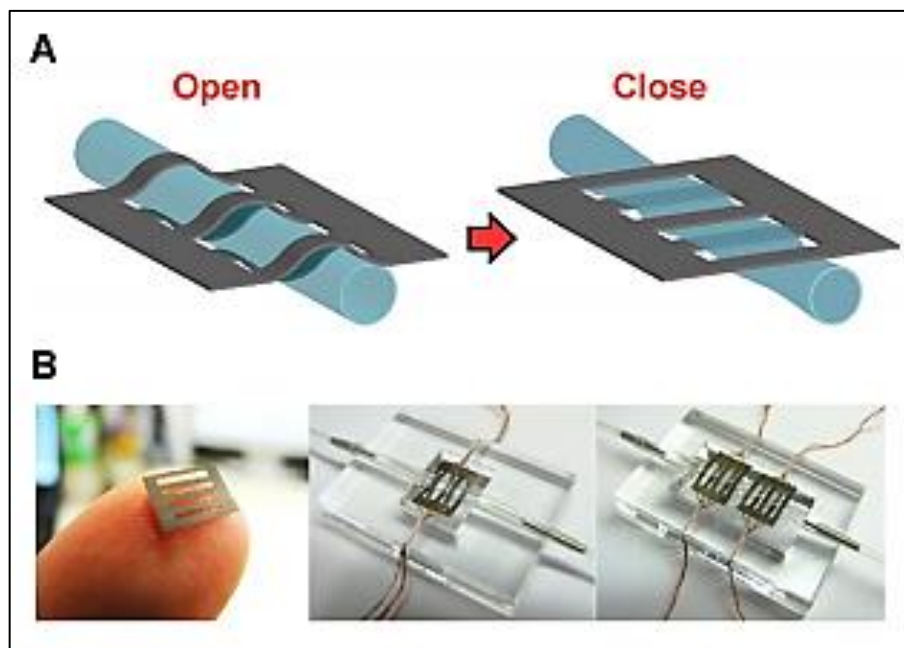


Figura 22: (A) Esquema demonstrativo do funcionamento do atuador. (B) Fotografia das bombas. À esquerda, um comparativo de tamanho. Ao centro, uma única bomba fixada em um suporte de acrílico. À direita, uma série de bombas para movimentos peristálticos. Modificado de [16].

Há dois modos de operação deste dispositivo, ambos demonstrados na Figura 23. No primeiro modo (Figura 23 A), apenas uma chapa SMA é utilizada e o tubo é fechado em uma das extremidades. Desta forma, quando a chapa é aquecida, o tubo colapsa devido ao efeito de memória de forma certo volume de fluido é empurrado para frente. Em contrapartida, quando a chapa esfriar, o tubo retoma seu formato original devido à sua própria elasticidade, fazendo com que o fluido retorne. O deslocamento de fluido deste modo de operação é relativamente pequeno, contudo é possível contornar esse problema adicionando mais chapas SMA ao sistema, como mostra a Figura 23 B. Neste segundo modo de operação, é possível criar movimentos peristálticos, onde uma das chapas funciona como válvula, impedindo o refluxo, enquanto que a outra empurra o fluido para frente.

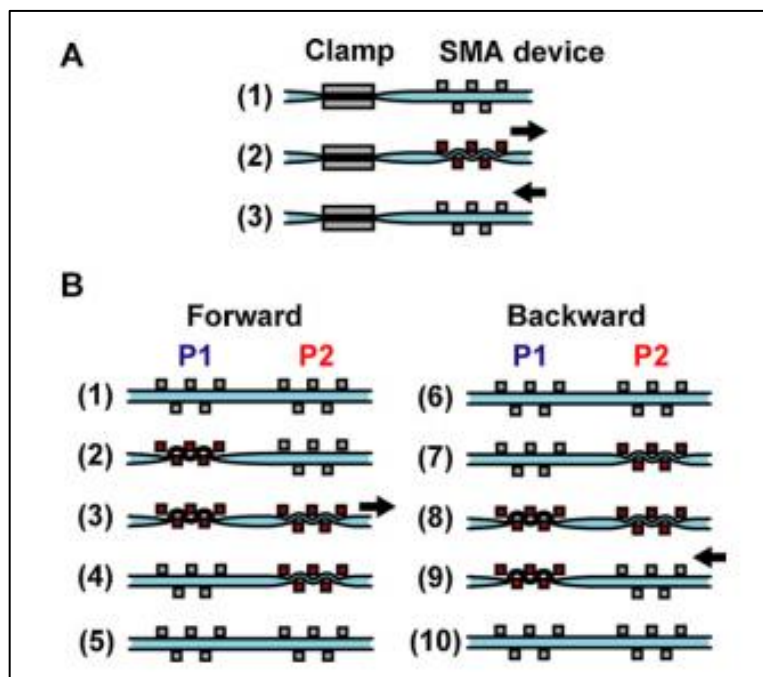


Figura 23: Modos de funcionamento da micro-bomba, com o transporte do fluido indicado pelas setas. Em (A), o funcionamento de uma única bomba. Em (B), o movimento peristáltico tanto para frente quanto para trás.

Fonte [16].

Testes experimentais mostraram que uma bomba equipada com apenas uma chapa produz pequenos e limitados deslocamentos de líquido, além de demorar mais a retornar à posição inicial. Como solução desses problemas foi adotada a utilização de diversas chapas (Figura 23 B), provocando o movimento peristáltico. Neste modo de operação, foi descoberto que é mais vantajoso aquecer as chapas de NiTi por meio de pulsos de energia (1,6 W por 5 s; 3,2 W por 2,5 s e 8,0 W por 1,0 s) ao invés de um fornecimento contínuo, que tem como efeito colateral o aquecimento dos arredores imediatos do atuador. Outro problema observado é a grande dependência das taxas de aquecimento e resfriamento da capacidade calorífica dos materiais ao redor ou em contato com a chapa SMA, visto que o tempo de resposta é lento devido a pouca dissipação de calor logo que a energia é desligada. Contudo, há várias opções para acelerar a dissipação térmica, como por exemplo, a redução do tamanho do dispositivo [16].

Ainda nesta área de atuação, temos o trabalho referenciado em [17], cujos autores propuseram outro projeto de micro-bomba para sistemas fluídicos em micro-escala, tendo em mente manter um design simples e baixo consumo energético. O princípio básico de funcionamento é a variação da seção transversal de um tubo flexível por meio de fios de SMA enrolados ao seu redor, cujo efeito de memória de forma cria uma variação na pressão interna do tubo. O fio de SMA é atuado ciclicamente de forma a desenvolver um escoamento unidirecional, sendo o calor necessário para o efeito de memória de forma ocorrer provido por

uma fonte externa de energia elétrica. O fluido é bombeado através da contração dos fios de SMA e através do deslocamento de fluido provocado pela atuação. O número de unidades utilizadas depende de qual fluido será bombeado e o número de espiras é selecionado com base da espessura do tubo escolhido. A Figura 24 (b) mostra um esquema da estrutura proposta, com um tubo de silicone, material bastante flexível capaz de suportar altas temperaturas, especialmente neste caso onde há uma intensa concentração de temperatura em uma pequena área do tubo; os fios de SMA, que para este caso foram escolhidos fios de Nitinol; e uma base, cujas funções são incrementar a rigidez do sistema, fixar os outros componentes nas suas devidas posições e servir como ponto de contato para o suprimento de energia. A Figura 24 (c) mostra como fica o sistema quando o fio de Nitinol encontra-se no estado atuado.

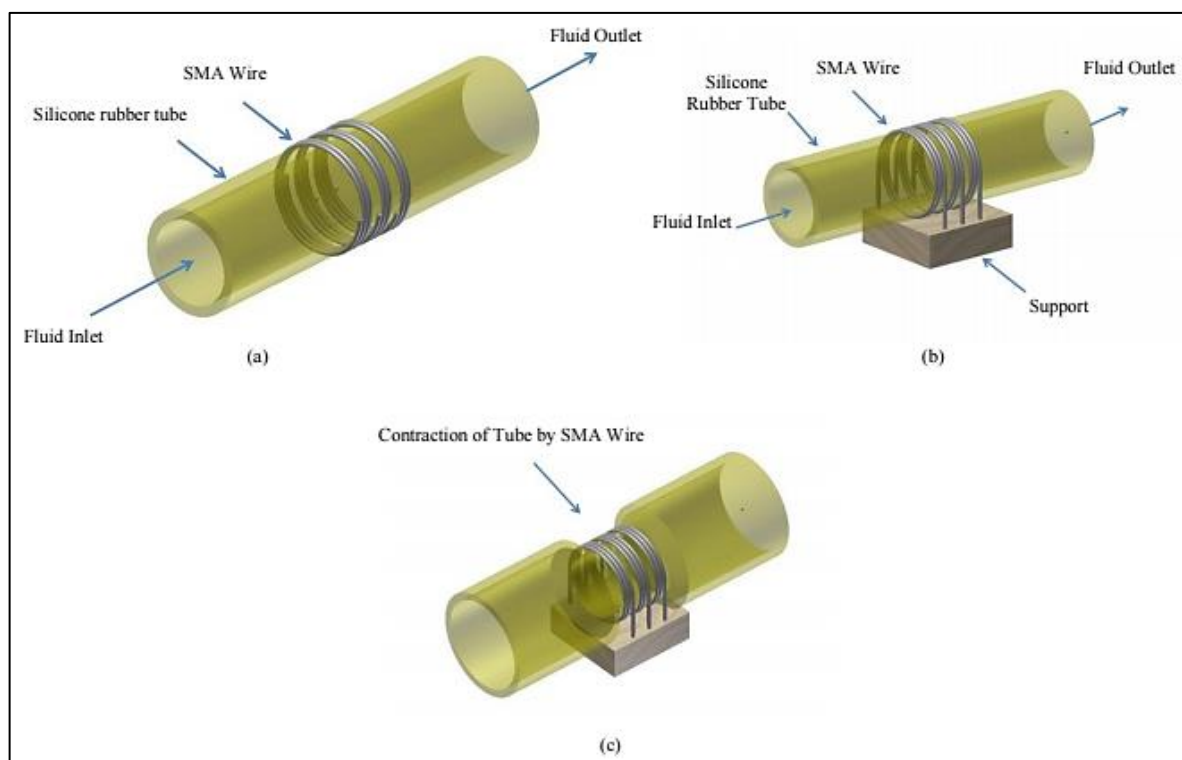


Figura 24: (a) Esquema do projeto inicialmente concebido. (b) Projeto modificado. (c) Aspecto do fio de SMA atuando sobre o tubo. Fonte [17].

Análises experimentais foram conduzidas para a construção de um protótipo (Figura 25) e verificação dos parâmetros de atuação. O valor de corrente para atingir a temperatura de transformação é 1.1658 A, a uma potência de 19,5 mW. Com isso, o fio de Nitinol consegue reduzir o diâmetro externo do tubo de 5,0 mm para 4,2 mm, totalizando uma redução volumétrica de $1,02 \times 10^{-8} \text{ m}^3$ [17].

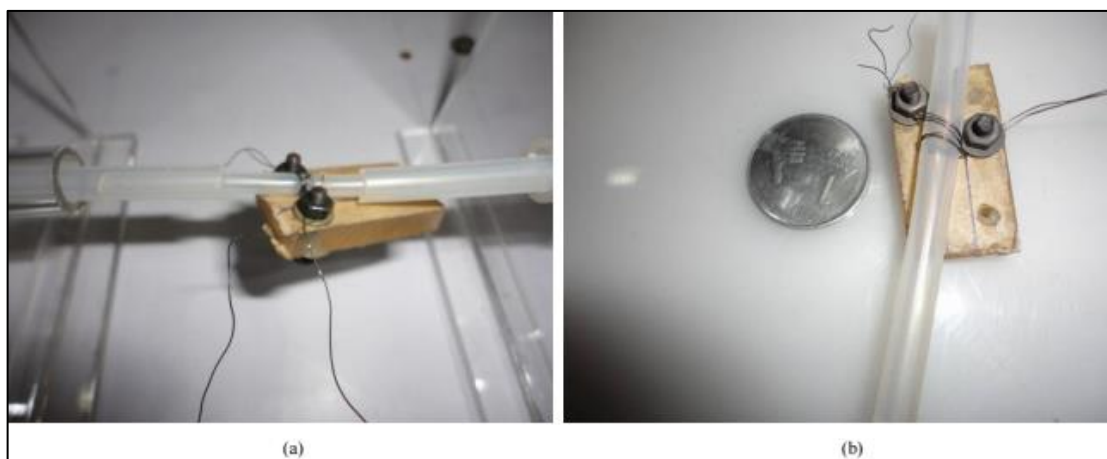


Figura 25: (a) Montagem do protótipo. (b) Comparação do tamanho com uma moeda. Fonte [17].

Apesar de este trabalho estar focado na atuação aplicada em válvulas, vale destacar o emprego das SMAs em outros campos. O autor referenciado em [18], por exemplo, desenvolveu um atuador que funciona como um músculo artificial para a área da robótica, com o intuito de substituir atuadores pneumáticos, os quais requerem diversos equipamentos periféricos, tornando o sistema todo muito grande e pesado. Portanto, foi proposto um atuador de pequenas dimensões, mais leve e mais flexível, à base de fios SMA com formato de bobina. Dois tipos de atuadores foram fabricados, um com corpo cilíndrico (tipo A) e o outro com corpo no formato de foles (tipo B), como mostrados respectivamente na Figura 26 (a) e (b). Ambos os tipos de atuadores são compostos por fios de SMA bobinados, um pistão feito de resina, uma guia SMA, uma tampa, um estojo-guia de silicone, uma mola helicoidal e uma haste feita ou de SMA ou de aço rápido. As bobinas de SMA são presas entre os pistões e a guia SMA e são inseridas junto com a mola no estojo. Elas são aquecidas novamente por meio do efeito Joule, contraindo 3-4% com a mudança de fase. Quando o elemento SMA aquece, ele contrai até o comprimento original, puxando consigo a haste.

Em relação ao desempenho de atuação desses dispositivos, ambos os tipos produziram grande deslocamento nos primeiros 5 segundos de aquecimento a 294 K. Logo após, contudo, o incremento é menor. Também foi descoberto que o atuador tipo A sofre com o atrito interno entre o pistão e as paredes internas do estojo, especialmente quando dobrado a mais de 40°. Também foi investigada a relação da força de atuação com o dobramento sofrido pelos atuadores. O tipo A cessa de produzir força quando dobrado além de 70°, e há quedas consideráveis entre 30° e 40°. Entretanto, os resultados do tipo B mostraram que sua força diminui gradativamente com a angulação. Os testes concluem que, apesar de ser possível mover o atuador quando seu centro é dobrado entre 0° e 90°, o deslocamento e a força caem à medida que angulação aumenta. A razão deste fenômeno é a deformação do estojo-guia [18].

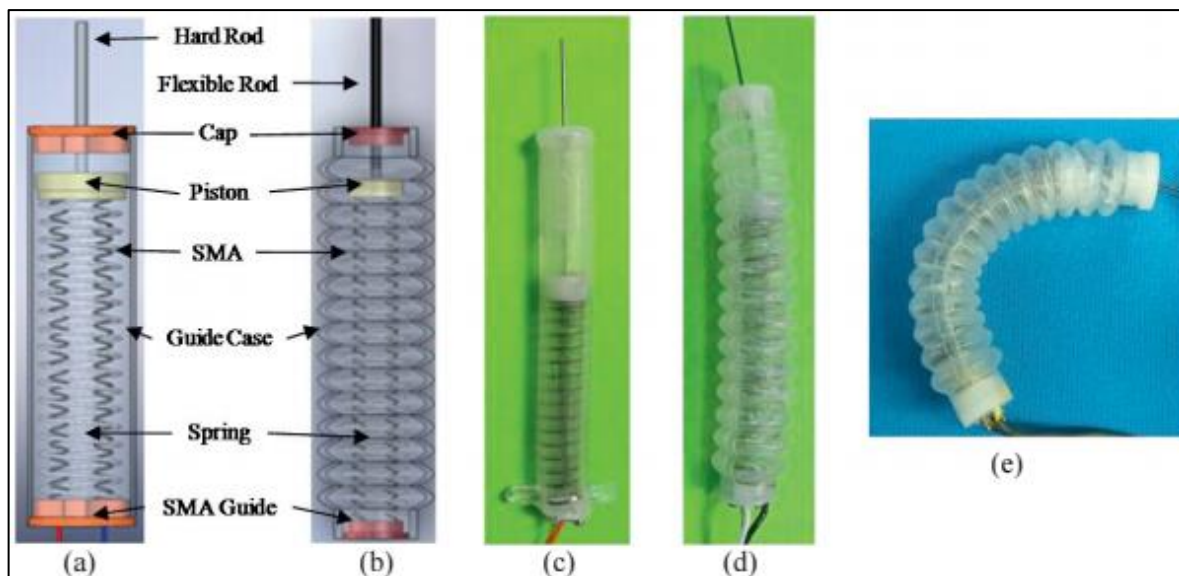


Figura 26: Estrutura do atuador tipo A (a), tipo B (b). Em (c) e (d) temos fotografias dos atuadores tipo A e B, respectivamente. Em (e) é demonstrada o dobramento do atuador. Fonte [18].

Voltando ao foco do estudo deste trabalho, citamos a contribuição dos autores em [19], que buscaram desenvolver uma micro-válvula para aplicações em temperaturas elevadas usando um fino filme de TiNiPd como elemento SMA. Esse material foi escolhido por causa da presença do paládio, que consegue elevar consideravelmente as temperaturas de transformação de fase do material inteligente. Micro-válvulas mais tradicionais de NiTi apresentam tais temperaturas mais próximas da temperatura ambiente, o que limita seu dinamismo e faixa de operação. O micro-atuador de TiNiPd consiste em um arranjo circular de três pontes, com comprimento e largura de 2,0 mm e 0,11 mm respectivamente, como mostra a Figura 27. O formato lateral dessas pontes destina-se à obtenção de um perfil de tensões homogêneo para a aplicação de uma carga no centro do atuador. Para garantir que as mudanças de fase aconteçam com aquecimento moderado, conseqüentemente otimizando o uso do efeito de memória de forma, é necessário um gradiente de temperatura controlado e homogêneo. Com esse propósito, o atuador TiNiPd é montado em um dissipador de calor de Cu.

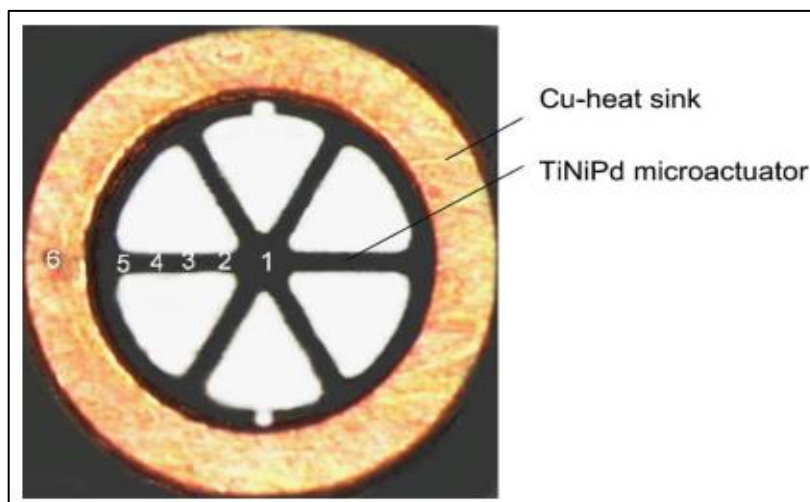


Figura 27: Atuador TiNiPd montado em um dissipador de calor de Cu. Fonte [19].

Além do atuador de SMA e do dissipador, o projeto da micro-válvula inclui uma tampa, uma membrana de poliimida (*polyimide*), um espaçador e uma camada de isolante térmico. Esse isolamento é importante para evitar que o calor necessário para acionar o atuador aqueça o fluido transportado, o que prejudicaria o funcionamento da válvula. Um esquema em vista explodida pode ser visto na Figura 28. Quando o dispositivo não está aquecido, a variação de pressão entre a entrada e saída do escoamento provoca uma deflexão na membrana e no atuador, sendo este o estado “aberto” da válvula. Assim que uma corrente elétrica é aplicada, o atuador passará a exercer uma força que então controla o escoamento e a variação de pressão entre a entrada e saída. A pressão máxima para fechar completamente a válvula pode ser ajustada pela espessura do espaçador.

Um protótipo (Figura 29) foi construído e testado em uma faixa entre a temperatura ambiente e 120°C, com diferencial de pressão fixo em torno de 70 kPa. Os resultados mostraram ciclos completos de atuação até a temperatura máxima. A válvula é capaz de controlar uma variação máxima de pressão e fluxo de gás de 70 kPa e 20 cm³, respectivamente. A potência requerida para fechar a válvula varia inversamente com a temperatura de operação, podendo assumir valores entre 80 mW até 260 mW [19].

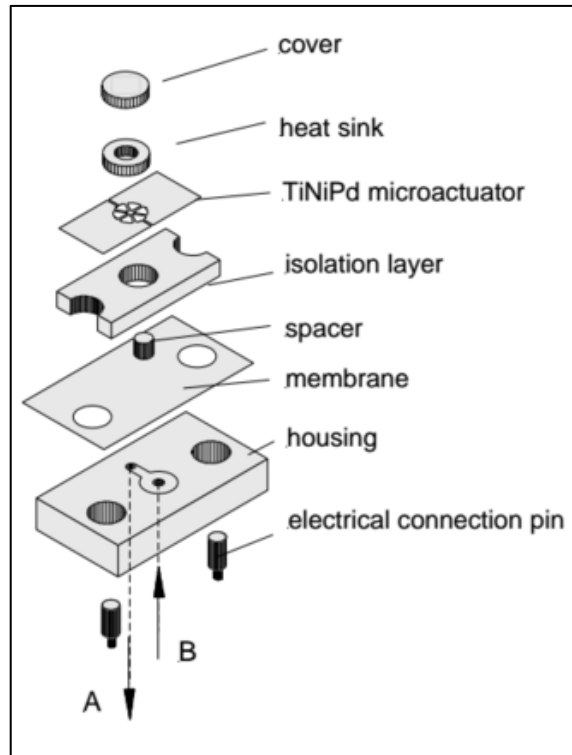


Figura 28: Vista explodida da micro-válvula atuada pelo TiNiPd. Fonte [19].

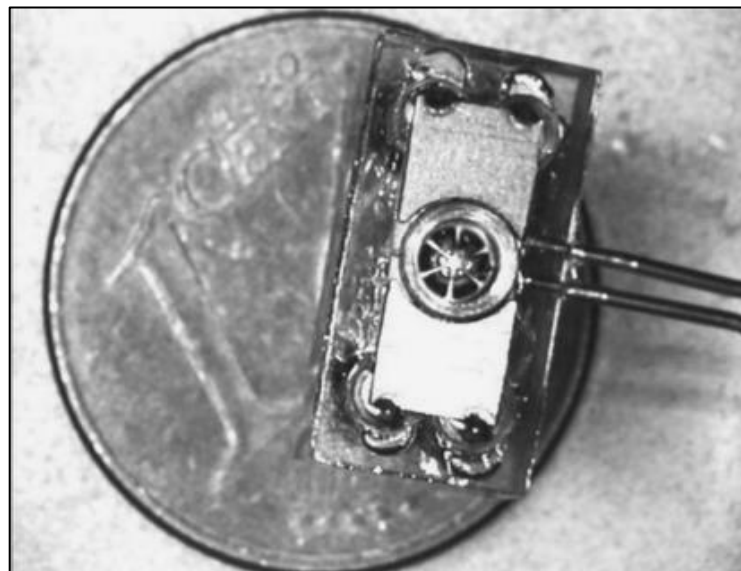


Figura 29: Protótipo da micro-válvula em comparação de tamanho com uma moeda. Fonte [19].

Os autores em [20] usaram uma membrana de NiTi para desenvolver um atuador compacto que moverá uma bomba, a qual gera grandes forças em alta velocidade. O acionamento do atuador vem através do deslocamento do próprio líquido, e depende da velocidade deste último. O escoamento também provoca convecção forçada na membrana de SMA, o que ajuda no processo de resfriamento. A Figura 30 mostra o dispositivo, que

consiste em duas válvulas de retenção unidas à entrada e à saída da bomba. A bomba em si tem formato cúbico, com atuadores de NiTi em quatro faces, sendo que o líquido que entra na câmara da bomba é dividido em quatro cavidades, cada uma contendo uma membrana. A Figura 32 mostra em detalhes o atuador montado em uma das faces da bomba.

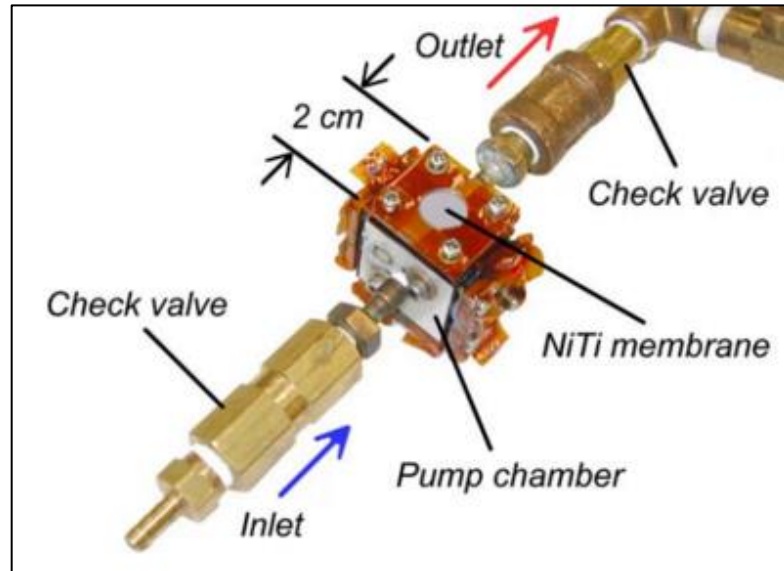


Figura 30: Foto da bomba de NiTi. Fonte [20].

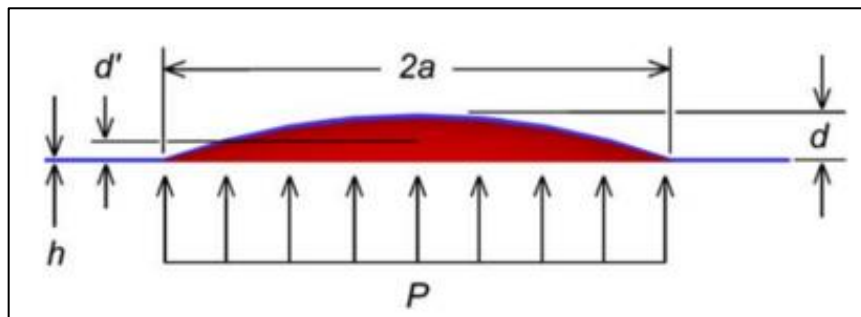


Figura 31: A membrana de NiTi sob influência da pressão P . O diâmetro é indicado por $2a$ e as deflexões por d e d' . Fonte [20].

É possível notar que quando a membrana está presa entre a placa frontal e o *O-ring*, há um espaço formado entre ela e o corpo da câmara da bomba. A presença de uma pressão gerada pelo fluido na entrada e na saída do atuador faz com que a membrana assumo o formato de uma calota esférica, como exemplificado na Figura 31. O aquecimento do SMA, por meio do efeito Joule, provoca uma transformação de fase que, por sua vez, reduz a deflexão da membrana de d para d' . Com isso, há uma variação no volume líquido sob a calota esférica correspondente ao deslocamento de fluido provocado pela membrana durante o bombeamento. O efeito Joule mencionado anteriormente também aquece o fluido em contato com a membrana, que é forçado para fora da cavidade quando a deflexão aumenta. Assim que

esta retorna para d , o fluido frio entra pelo furo de entrada da cavidade e ajuda no resfriamento da membrana. Os resultados experimentais dessa bomba mostram que o carregamento de saída ideal é 98 N, e a força de bloqueio é de 198 N. A velocidade de atuação máxima desenvolvida, 5,85 mm/s, foi obtida enquanto a bomba operava a 100 Hz [20].

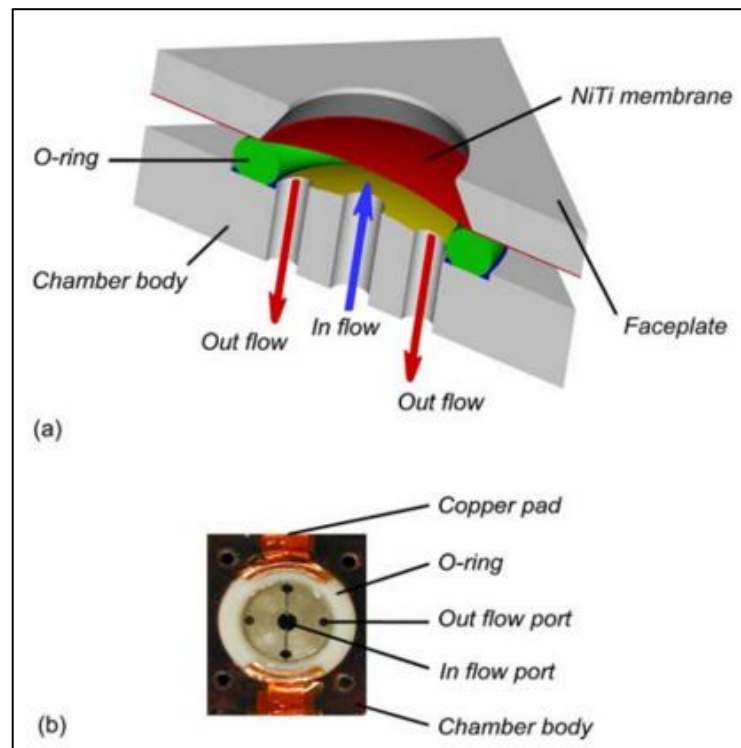


Figura 32: (a) Vista da seção transversal da válvula. (b) Vista superior da face do atuador de NiTi. Fonte [20].

É importante ressaltar que, apesar dos vários estudos experimentais de desenvolvimento de dispositivos inéditos citados acima, já existem e estão disponíveis comercialmente válvulas acionadas por atuadores de SMA, inclusive algumas delas destinadas ao uso doméstico. A fabricante citada em [21] é uma das empresas especializadas nesses dispositivos. Entre seus produtos, destacam-se a válvula de mistura (Figura 33), onde uma mola de SMA controla a razão de água quente e fria, prevenindo mudanças súbitas na temperatura da água; a válvula *anti-scald*, que, ao ser acoplada em um boiler, impede que a temperatura da água aquecida exceda um patamar determinado; e a válvula de controle de fluxo (Figura 34), também possuindo uma mola SMA como elemento atuador [21].

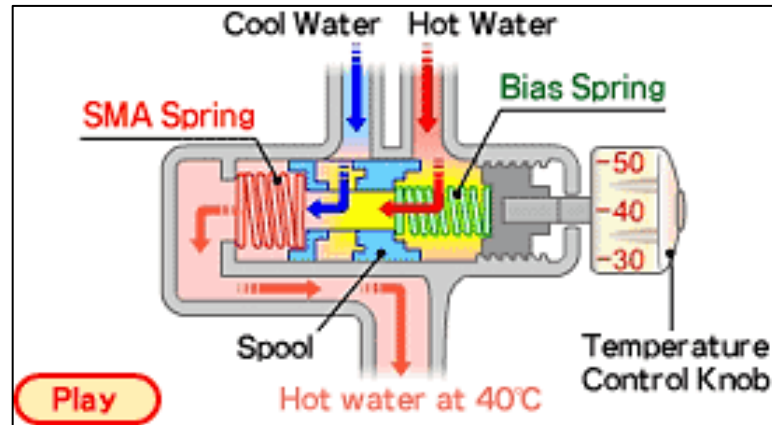


Figura 33: Esquema representativo da válvula misturadora, empregando uma mola de SMA e outra de aço. Fonte [21].



Figura 34: Válvula de controle de fluxo. Fonte [21].

Outro trabalho bastante relevante no estudo da atuação de SMAs foi publicado pelos autores citados em [6], o qual consiste em um protótipo experimental para a avaliação da influência da taxa de aquecimento no desempenho de um atuador sob dois aspectos principais: a força-deslocamento e a energia de deformação. Além disso, outro aspecto investigado é a eficiência do dispositivo sob o ponto de vista de energia aplicada ao sistema, medida a partir das curvas de força-deslocamento ou tensão-deformação. Os resultados das análises deste estudo buscam mostrar as tendências de comportamento termomecânico das ligas de memória de forma em relação à influência da taxa de aquecimento. A Figura 35 mostra um esquema do protótipo experimental, onde um fio de Nitinol (54,8% Ni e 45,2% Ti) com 1,71 mm de diâmetro e 10,0 cm de comprimento é preso a uma célula de carga em uma das extremidades, enquanto que a outra é mantida fixa. Esta célula de carga é conectada a uma mola helicoidal de aço que é responsável por atuar como força restauradora ao elemento de SMA. É possível variar a tensão inicial do sistema, o que permite a realização de vários testes em vários níveis de tensões submetidas.

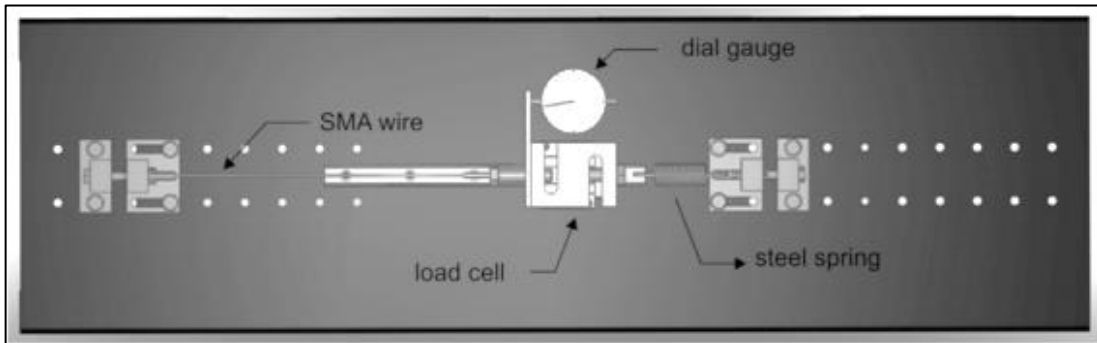


Figura 35: Esquema do protótipo para a análise experimental de fios de SMA. Fonte [6].

O fio de SMA é primeiramente carregado, de forma a já estar deformado à temperatura ambiente. O objetivo disto é garantir que o fio esteja em sua fase martensítica no início do teste. Subsequentemente, o fio é aquecido por meio de uma corrente elétrica até atingir a temperatura de transformação de fase. Neste ponto, o material encontra-se em seu estado atuado, quando a martensita transforma-se em austenita, e o fio recupera seu formato original, gerando deslocamento. O resfriamento é feito por convecção natural, podendo gerar tanto M^t quanto M^d , dependendo do nível de tensão ao qual o fio é submetido, conforme ilustrado na Figura 36.

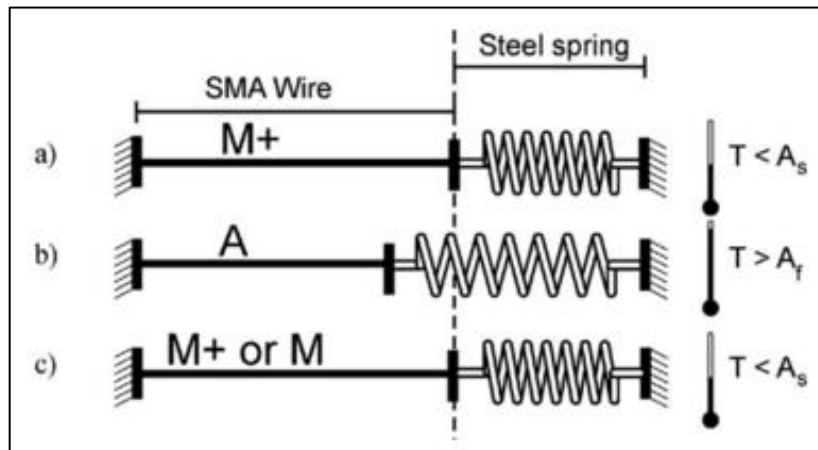


Figura 36: Figura esquemática do teste experimental. Fonte [6].

Uma sequência de testes foi realizada, o que enfatiza a importância de considerar a taxa de aquecimento do projeto de um atuador SMA. Geralmente, taxas em torno de 65 °C/min maximizam o deslocamento do atuador, apesar de haver um sacrifício na força exercida. Entretanto, para taxas mais altas, superiores a 100°C/min, foi observado um incremento no valor da força, com uma significativa redução no deslocamento do atuador. A análise energética demonstrou que taxas de aquecimento maiores resultam em menor

consumo de energia e melhor desempenho. Por fim, a análise de eficiência mostrou um ganho de 5,7% na mesma taxa que maximiza a deformação, sendo esse valor dependente do produto entre o deslocamento e a força do atuador, a qual é proporcional à energia de deformação [6].

Por fim, o trabalho dos autores em [22] procurou investigar o efeito de memória de forma em molas helicoidais de NiTi, visto que há relativa ausência deste tema na literatura. Os autores procuraram estabelecer qual a influência dos ciclos de trabalho nas molas de NiTi. Um protótipo contendo uma mola de SMA e outra mola harmônica de aço foi projetado e construído com o fim de verificar a viabilidade do projeto. No atuador proposto, assim como nos ciclos termomecânicos, a mola de SMA é aquecida por efeito Joule através da corrente elétrica que passa por um fio. O propósito da mola de aço é de empurrar a mola de SMA durante o processo de resfriamento e retorná-la à condição inicial na fase martensítica, deixando-a pronta para uma nova ativação.

A partir de arames de Nitinol comerciais, dois deles com diâmetros respectivos de 0,4 e 0,5 mm e $A_f = 65^\circ\text{C}$ e mais outro com diâmetro de 0,6 mm e $A_f = 95^\circ\text{C}$, as molas foram construídas e depois analisadas. AS temperaturas de mudança de fase foram confirmadas por análises térmicas em ensaios DSC. A construção das molas é relativamente simples: os fios são enrolados e presos ao redor de parafusos comerciais, e em seguida passam por tratamento térmico a 500°C durante 15 minutos e depois resfriados rapidamente com água, de modo a gravar o estado alongado. A Figura 37 mostra como a caracterização termomecânica das molas foi feita. Basicamente a mola é montada em uma guia de cerâmica e submetida à carga de um peso, o qual a deforma. O aquecimento provocado pelo efeito Joule faz com que a mola assuma a posição alongada (fase austenítica) partindo da posição comprimida (fase martensítica). Para reduzir ao máximo o efeito do passo helicoidal e a deformação excessiva da mola quando submetida a carregamentos, os autores decidiram que as molas estariam completamente comprimidas no estado martensítico. Desta forma o comprimento durante a fase martensítica coincide com a diferença entre o comprimento máximo alcançado, durante o estado austenítico, e o deslocamento. Por fim, as molas de aço que servirão como elementos restituidores foram fabricadas em laboratório. Estas possuem espessura, diâmetro e número de espiras diferentes das molas de SMA de forma a cobrir uma maior amplitude de constantes elásticas, variando de 101 até 500 N/m. O sistema todo é aquecido por uma fonte, que produz um ciclo de trabalho de 36 segundos: seis de ativação (aquecimento por efeito Joule) e trinta de circuito aberto (resfriamento natural). A tensão elétrica escolhida está na faixa de 2,5 a 3,0 V, o que já é o suficiente para garantir as transformações de fase.

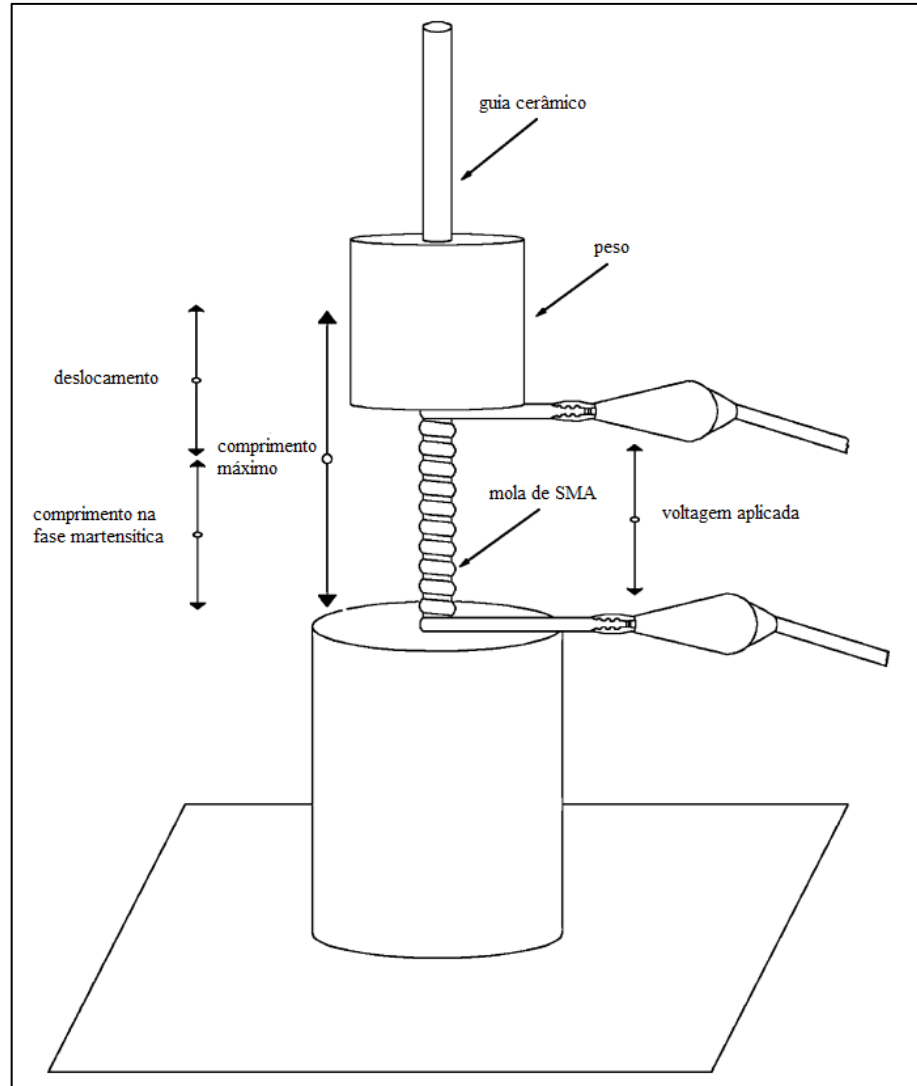


Figura 37: Esquema da caracterização termomecânica das molas de SMA. Adaptado de [22].

Os resultados experimentais termomecânicos sugerem que quanto maior for a carga suportada pelas molas, menor será o deslocamento, ou seja, cargas mais pesadas resultam em comprimentos máximos menores. Já em relação aos testes efetuados em ciclos com carregamento constante, foi observado que há uma degradação do desempenho da mola, isto é, são alcançados menores comprimentos máximos sob as mesmas cargas aplicadas. Contudo, nos testes realizados com ciclos submetidos a cargas variáveis, apesar de ainda existir perda no comprimento alcançado, ela é menor em ciclos mais elevados, com a estabilização do comportamento da mola em ciclos de trabalho mais elevados. A partir destes resultados, um atuador linear (Figura 38) foi montado, com o objetivo de ter a movimentação do elemento ativo (a mola de SMA) coincidir com a movimentação do atuador. Esse projeto permite atingir uma ampla faixa de movimentação através da combinação das molas de aço e de

Nitinol fabricadas. Como exemplo, com a mola feita do arame com diâmetro de 0,4 mm foi possível alcançar uma faixa de atuação entre 0,26 e 0,72 cm [22].

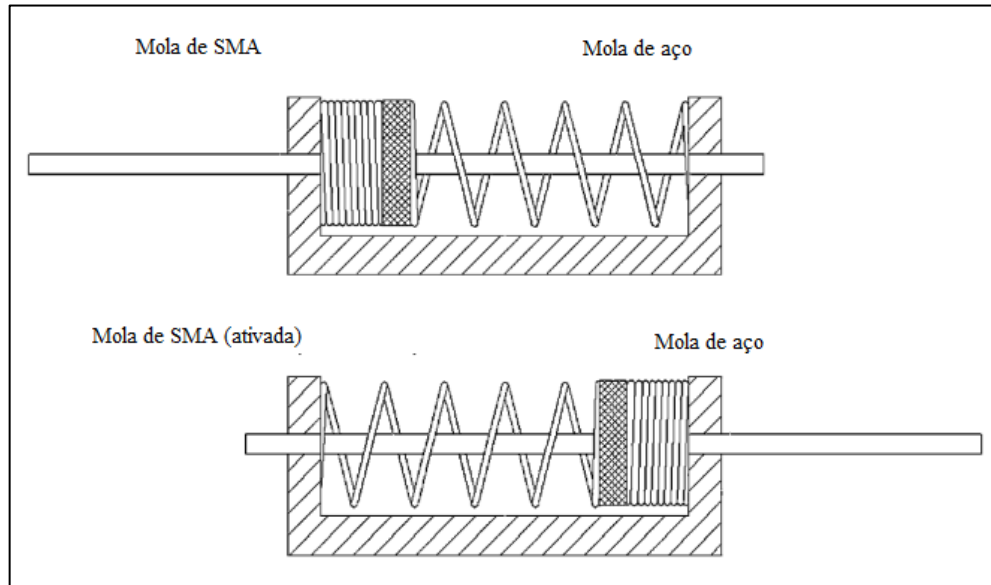


Figura 38: Esquema do atuador proposto, com as molas de SMA e de aço. Adaptado de [22].

Capítulo 3

Fundamentação Teórica

3.1 – Ligas de Memória de Forma

As ligas de memória de forma, ou SMAs, do inglês *Shape Memory Alloys*, são materiais que apresentam a característica única de recuperar seu formato original, eliminando qualquer deformação residual, quando estes sofrem um estímulo externo, seja este um incremento na temperatura ou a aplicação de alguma carga. Esses estímulos induzem mudanças de fase no material, sendo uma dessas fases a martensita, e a outra, austenita. Outra característica dessas ligas é que elas são capazes de absorver ou dissipar energia mecânica ao passar por carregamentos cíclicos [1]. Podemos observar dois fenômenos termomecânicos nas SMAs: o efeito de memória de forma, abreviado como SME (do inglês *Shape Memory Effect*), e a pseudoelasticidade.

Atualmente, as ligas de SMA são bastante utilizadas como atuadores e atenuadores de vibrações, sendo encontradas sob a forma de fios, molas, chapas, barras, entre outros [23]. Dentre os tipos de SMAs, destacam-se as ligas de Níquel-Titânio (NiTi), cujo nome comercial é Nitinol, e as que contém Cobre, como o CuZnAl e o CuAlNi. O autor referenciado em [24] apresentou em uma tabela algumas propriedades típicas gerais dessas ligas, conforme mostrado na Tabela 1. O Nitinol em especial é amplamente empregado em vários campos na indústria e na medicina devido suas excelentes propriedades mecânicas, um bom efeito de memória de forma e por ser biocompatível. Estudos apontam que a adição de um terceiro elemento de liga, como o Co ou Fe, causa uma redução dramática na temperatura de transformação de fase das SMAs [1].

Tabela 1: Propriedades gerais típicas das ligas de NiTi, CuZnAl e CuAlNi. Fonte [24].

Propriedade	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Calor específico (J/kg°C)	450 – 620	390 – 400	373 – 574
Condutividade térmica a 20°C (W/mK)	8,6 – 18	84 – 120	30 – 75
Densidade (kg/m ³)	6400 – 6500	7540 – 8000	7100 – 7200
Calor Latente (kJ/kg)	19 – 32	7 – 9	7 – 9
Resistência elétrica (10 ⁻⁶ Ω × m)	0,5 – 1,1	0,07 – 0,12	0,1 – 0,14
Coefficiente de expansão térmica (10 ⁻⁶ /K)	6,6 – 11	17	17
Recuperação máxima de tensão (MPa)	500 – 900	400 – 700	300 – 600
Tensão normal de trabalho (MPa)	100 – 130	40	70
Nº de ciclos térmicos	> 10 ⁵	> 10 ⁴	> 5×10 ³
Módulo de Young (GPa)	28 – 83	70 – 100	80 – 100
Temperatura de transformação da memória de forma (°C)	-200 – 200	-200 – 150	-200 – 200
Tamanho do grão (µm)	1 – 100	50 – 150	25 – 100
Temperatura de sobreaquecimento (°C)	400	150	300

3.2 – Transformações de Fase em Ligas de Memória de Forma

As SMA apresentam duas fases metalográficas, cada uma com estrutura cristalina e propriedades distintas. A fase de alta temperatura é a austenita (*A*), normalmente cúbica, e a de baixa temperatura chama-se martensita (*M*), que pode ser ortorrômbica, tetragonal ou monoclinica. A fase martensítica ainda pode assumir duas variações, as quais dependem da orientação da estrutura cristalina: a variante maclada (*M^t*) e a não-maclada (*M^d*). O que permite o fenômeno de memória de forma nestas ligas é a transformação de fase reversível entre as duas fases. Essa transformação não ocorre através da difusão de átomos, e sim pela reorganização deles na rede cristalina.

Portanto, supondo que o material esfrie em um estado livre de tensões, ele passa da austenita para a martensita maclada. Essa transformação é denominada direta, com a temperatura de início da transformação assinalada por *M_s* e seu término por *M_f*. A transformação dita reversa ocorre quando o material passa da fase martensítica para a

austenítica, via aquecimento. Similarmente, A_s denota a temperatura de início da formação de austenita enquanto que A_f indica a temperatura de término da formação da austenita, conforme explicitado na Figura 39.

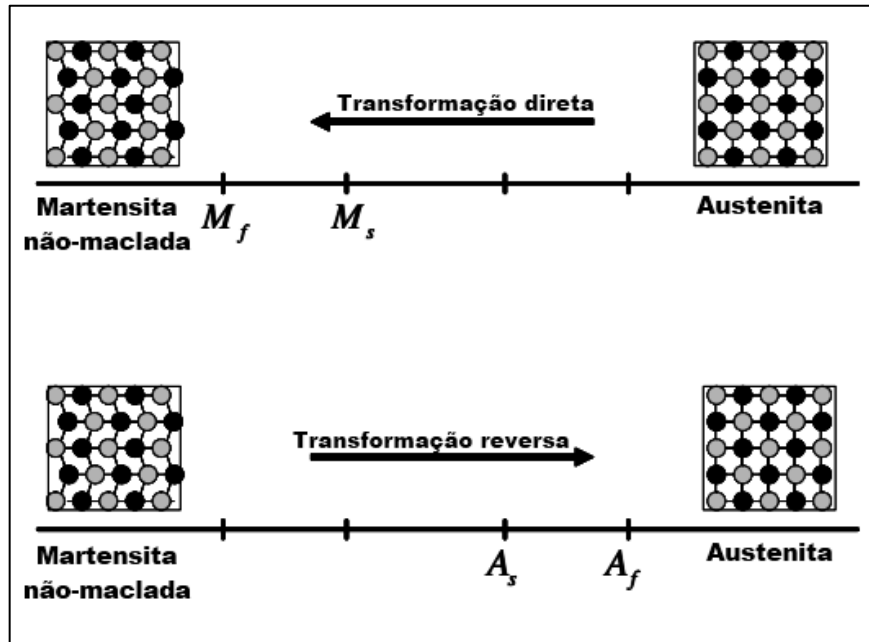


Figura 39: Transformações de fase em uma liga de memória de forma. Adaptado de [1].

Se há uma aplicação de carga mecânica na fase de baixa temperatura (martensita maclada) é possível reordenar a estrutura cristalina de modo que se obtenha martensita não-maclada, o que por sua vez implica em uma mudança de forma macroscópica. Um aquecimento posterior do material a uma temperatura igual ou superior a A_f resultará na formação de austenita (transformação reversa) e na recuperação do formato original da liga. Por fim, se o material resfriar a uma temperatura inferior a M_f (transformação direta), obteremos novamente a martensita maclada, sem mudança de forma associada.

Nota-se que é necessária uma tensão mínima, denominada tensão inicial (σ_s), para começar o processo de transformação da M^t para a M^d . Através de cargas suficientemente altas, toda a martensita torna-se não maclada, e a tensão associada a essa carga é denominada tensão final (σ_f) (Figura 40). Ainda é possível fazer a caracterização da transformação de fase induzida por carregamentos mecânicos em função das próprias fases através de quatro tensões críticas: σ_s^{AM} (início da transformação austenita \rightarrow martensita), σ_f^{AM} (final da transformação austenita \rightarrow martensita), σ_s^{MA} (início da transformação martensita \rightarrow austenita) e σ_f^{MA} (final da transformação martensita \rightarrow austenita). Para um estado livre de tensões, a austenita

apresenta-se mais estável em temperatura elevada, sendo suas tensões críticas maiores, enquanto que a martensita estabiliza-se em baixas temperaturas, tendo tensões críticas menores [23].

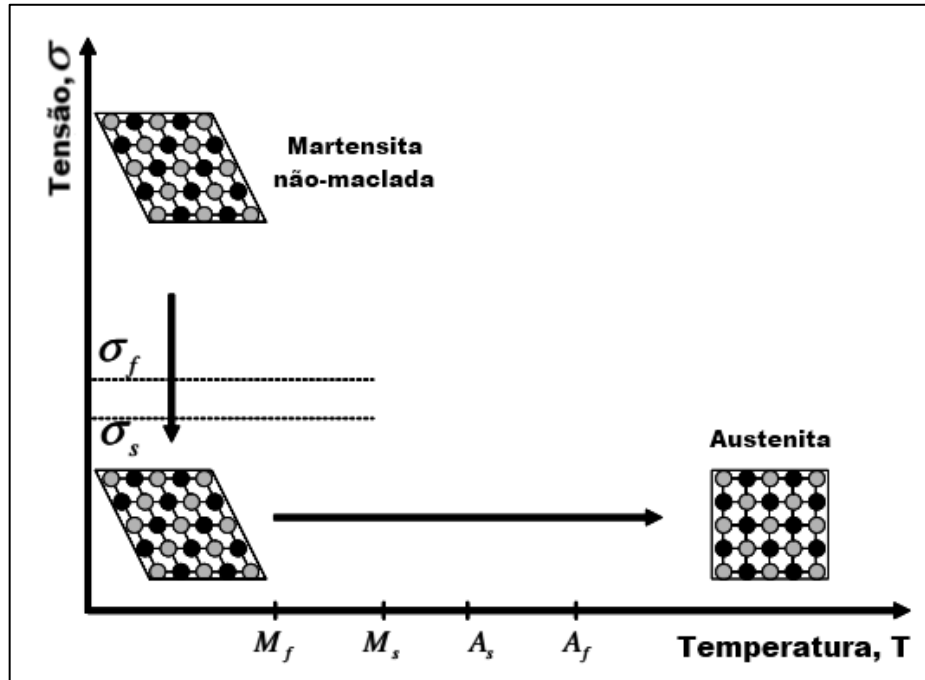


Figura 40: Esquema do efeito de memória de forma sujeito à tensão. Adaptado de [1].

3.3 – Efeito de Memória de Forma

Uma SMA exibe o efeito de memória de forma (SME) quando ela sofre uma deformação em temperatura inferior a M_f , enquanto encontra-se na fase martensítica maclada e sem nenhuma tensão atuante. Na Figura 41, que representa um gráfico do SME relacionando tensão, deformação e temperatura, essa etapa é representada pela curva a partir do ponto B. À medida que a tensão e a deformação aumentam, a transformação da M^t para a M^d ocorre, processo que termina no ponto C do gráfico. Quando o carregamento é aliviado, nota-se que perdura uma deformação residual, indicada pelo ponto D. Essa deformação pode ser recuperada através do aquecimento até uma temperatura superior a A_f (trecho E-A), quando o material passa por mudança de fase, transformando-se em A e, conseqüentemente, recuperando seu formato macroscópico original. Finalmente, basta resfriar o material até obter-se M^t (reta A-B) novamente para reiniciar o ciclo.

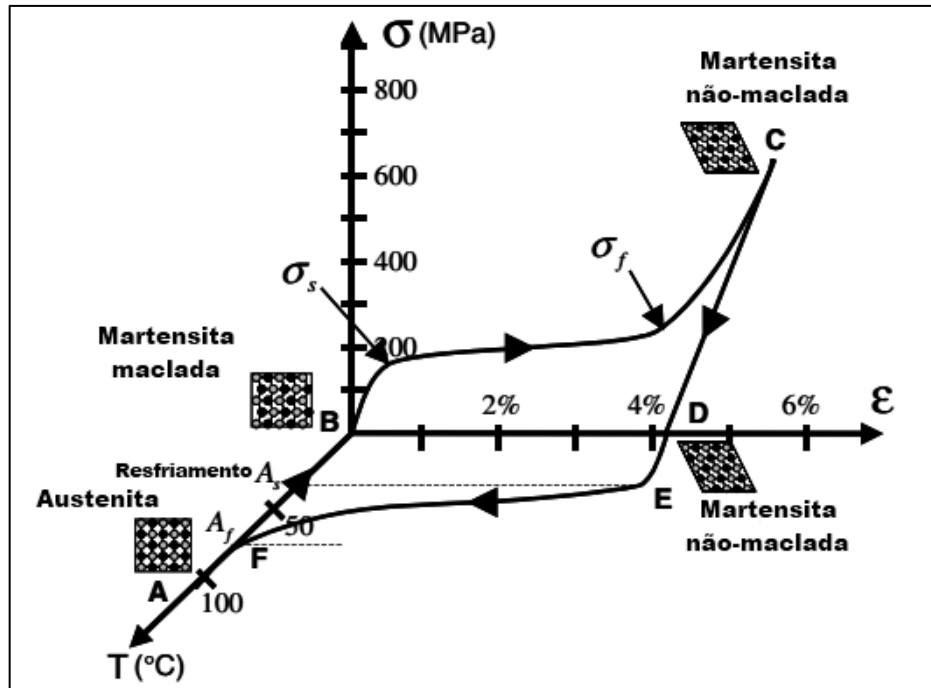


Figura 41: Tensão/deformação em SMA NiTi. Adaptado de [1].

3.4 – Pseudoelasticidade

A pseudoelasticidade é um fenômeno associado às transformações de fase que ocorrem por meio da aplicação de uma carga suficientemente alta no material enquanto o mesmo está na fase austenítica e em temperatura constante. Desta maneira, é possível obter martensita não-maclada diretamente da austenita. Se o material está exposto a uma temperatura superior a A_f , ele é capaz de recuperar seu formato original ao ser descarregado para A [1].

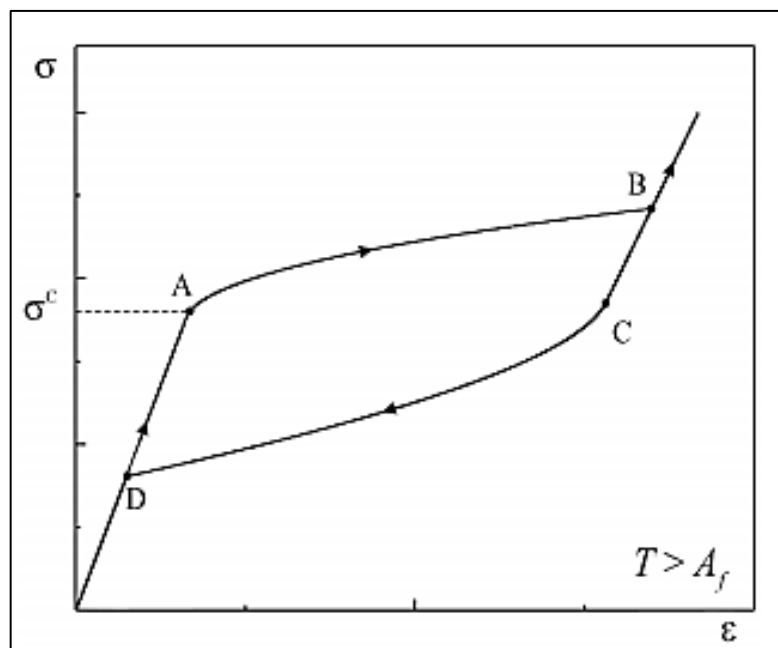


Figura 42: Gráfico do comportamento pseudoelástico. Fonte [25].

A Figura acima mostra o gráfico “tensão-deformação”, onde o trecho A-B representa o início e o fim da transformação $A \rightarrow M^d$ e o trecho C-D representa a transformação $M^d \rightarrow A$. A aplicação de uma carga induz uma reorientação da estrutura cristalina, de forma que a austenita resulte em martensita não-maclada. Com o descarregamento, a transformação reversa ocorre, obtendo-se A novamente.

A área interna do gráfico da Figura 42, chamada de laço de histerese, representa a energia dissipada pelo sistema em um ciclo de carga-descarga. Conseqüentemente, essa característica de dissipação energética torna as SMAs pseudoelásticas bastante úteis como atenuadoras de vibrações mecânicas [26].

3.5 – Efeito de Memória de Forma Reversível

Em alguns casos, as ligas de memória de forma conseguem passar por mudanças de forma quando expostas a carregamentos térmicos cíclicos, mesmo quando não há nenhuma tensão atuando previamente. Isso permite que uma SMA adote formatos diferentes para dois patamares distintos de temperatura. Esse comportamento é denominado efeito de memória de forma reversível, ou em duas vias, expressão vinda do inglês *Two-Way Memory Shape Effect* (TWSME). A Figura 43 (1) ilustra esse comportamento.

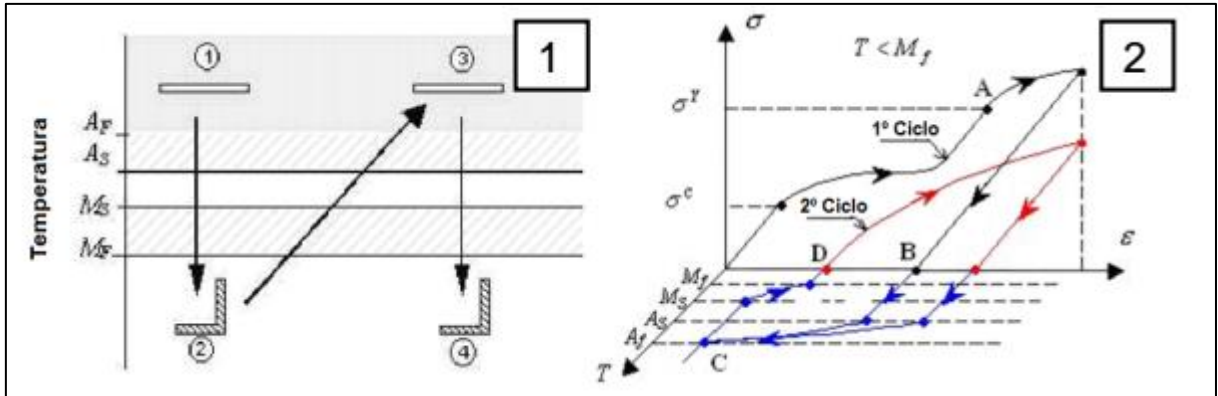


Figura 43: O efeito de memória de forma reversível. Fonte [25].

Mesmo não sendo um efeito intrínseco às SMAs, o TWSME pode ser observado quando essas ligas são submetidas a vários ciclos termomecânicos, com repetitivos carregamentos e descarregamentos sob um determinado valor de tensão constante, onde se percebe a estabilização da resposta histerésica do material e do acúmulo de deformação plástica. Quando isso ocorre, dizemos que a liga passou por um treinamento [1,26]. Na curva de tensão-deformação-temperatura da Figura 43 (2) é possível ver o incremento da deformação residual do primeiro para o segundo carregamento [25].

Capítulo 4

Projeto da válvula inteligente

4.1 – Válvula de travamento

O projeto da válvula inteligente proposta é baseado em um conjunto de cinco componentes: a luva (Figura 45), que tem a função de restringir movimentos horizontais das molas de SMA e fixar-se ao travamento; o travamento (Figura 46), que é fixado à luva e também às molas de SMA; e o tampão (Figura 47), utilizado para bloquear a passagem do líquido aquecido que estiver com temperatura maior do que a aceitável pelo sistema e as molas de SMA (Figura 48). A Figura 44 mostra uma visão geral desses componentes, enquanto que os desenhos técnicos estão presentes no Apêndice A. O número de molas necessário para o projeto depende da força hidrostática que precisaria ser vencida. Sendo assim, este projeto empregará quatro molas, mesmo número utilizado no aparato experimental, o qual será comentado em detalhes no Capítulo 5.

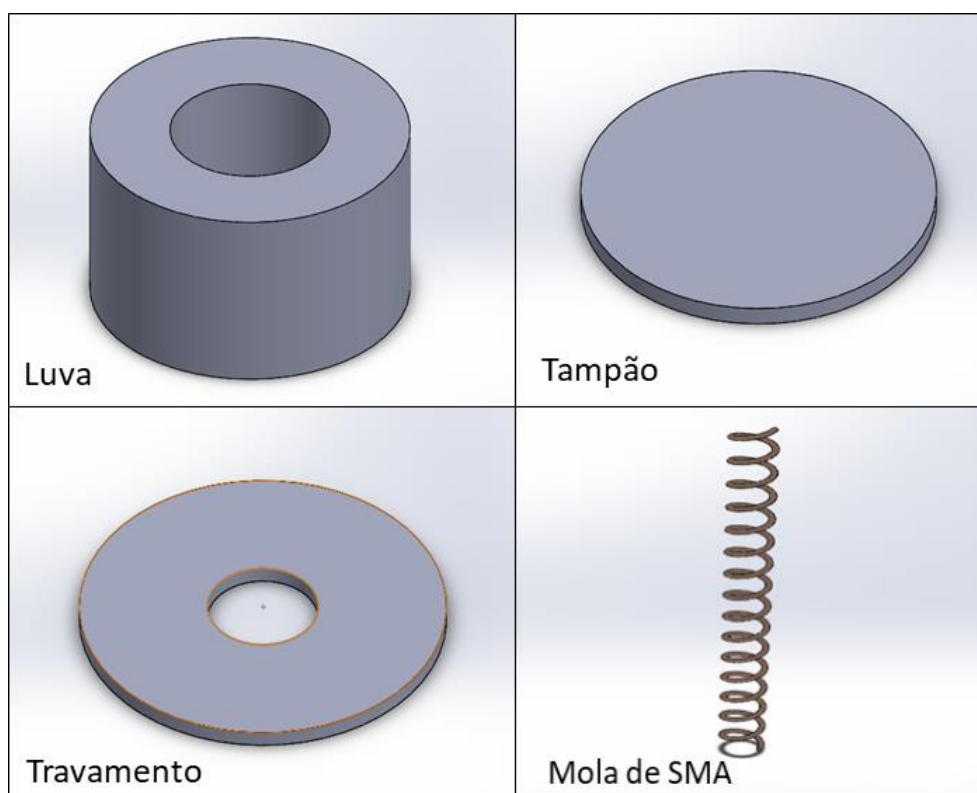


Figura 44: Os componentes da válvula. Fonte própria.

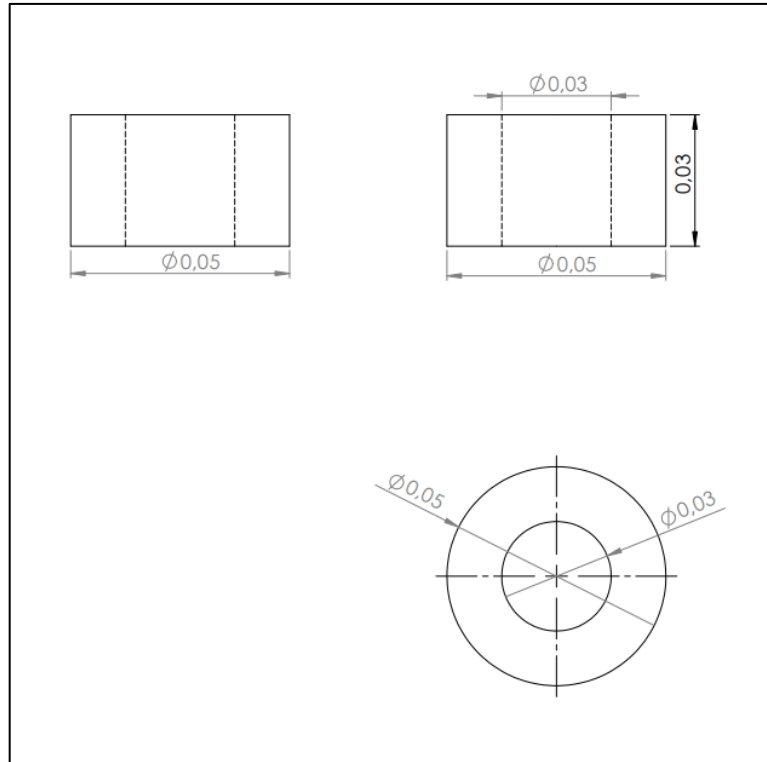


Figura 45: Desenho da luva. Fonte própria.

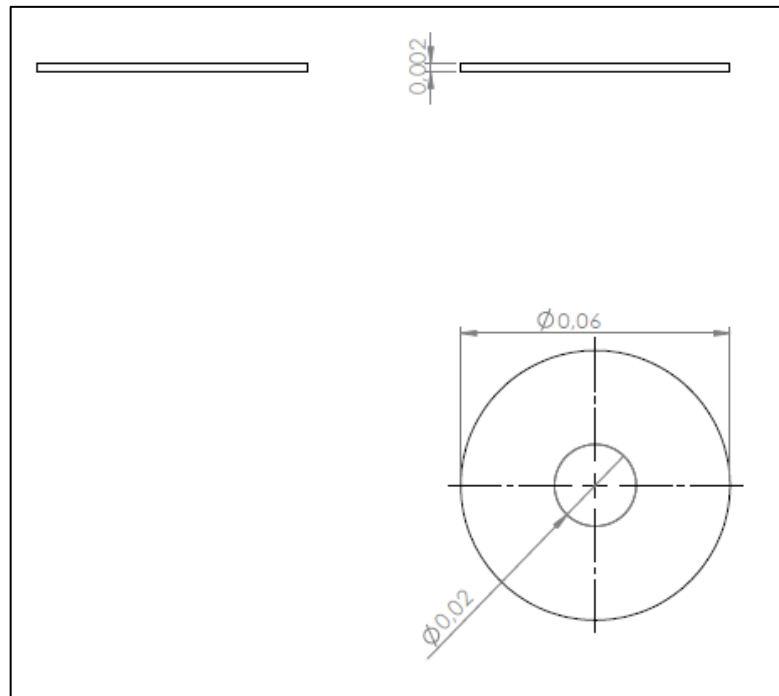


Figura 46: Desenho do travamento. Fonte própria.

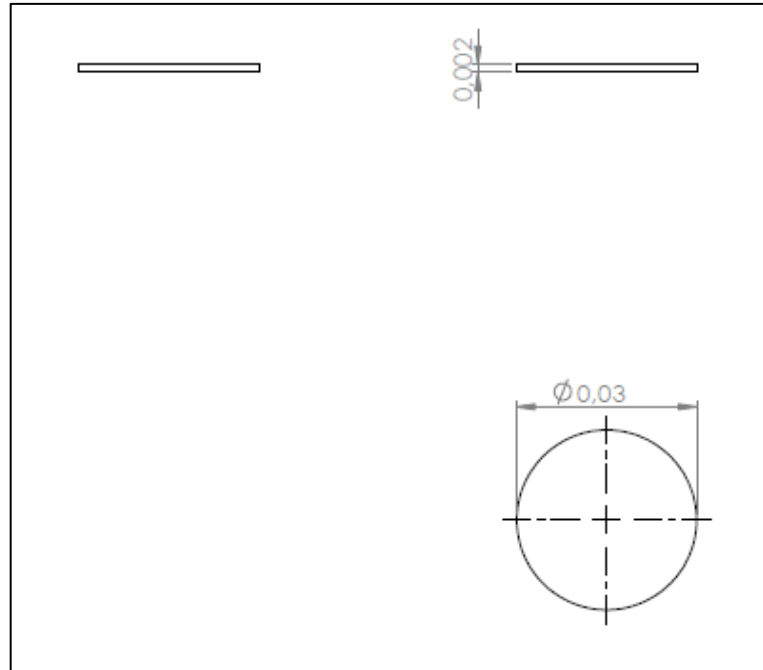


Figura 47: Desenho do tampão. Fonte própria.

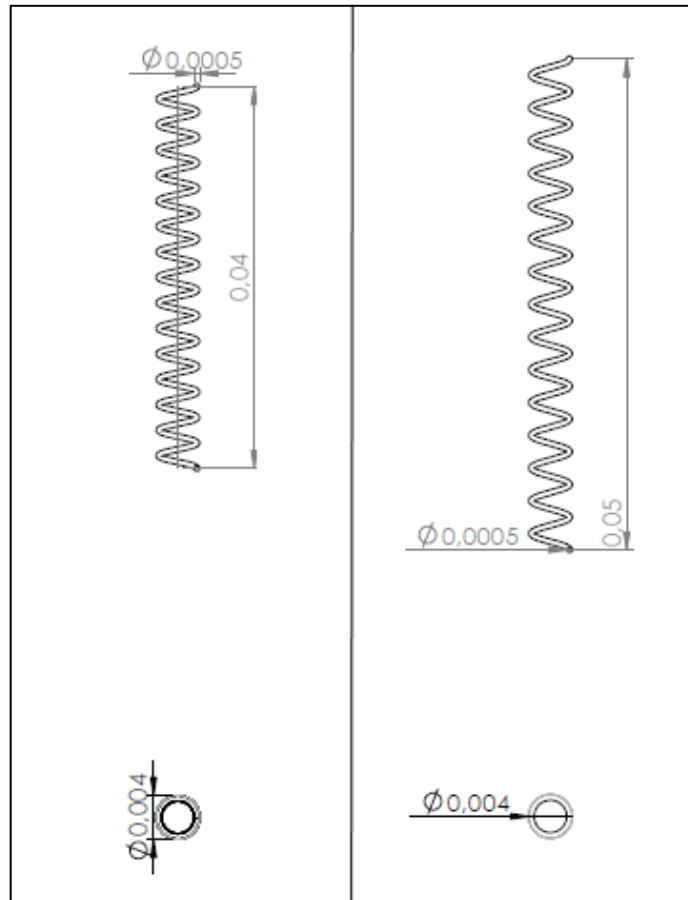


Figura 48: Desenho das molas de aço (à esquerda) e de SMA (à direita). Fonte própria.

4.2 – Carga hidrostática

A partir da preposição de que a válvula inteligente seja instalada no encanamento de uma residência e próxima ao aquecedor a gás, conforme mostra a esquematização da Figura 49, é necessário determinar a força exercida pela coluna d'água no dispositivo proposto para desta forma verificar se o mesmo consegue suportá-lo na configuração projetada. Primeiramente serão feitos os cálculos considerando apenas uma coluna d'água estática e em seguida será feita a análise dinâmica.

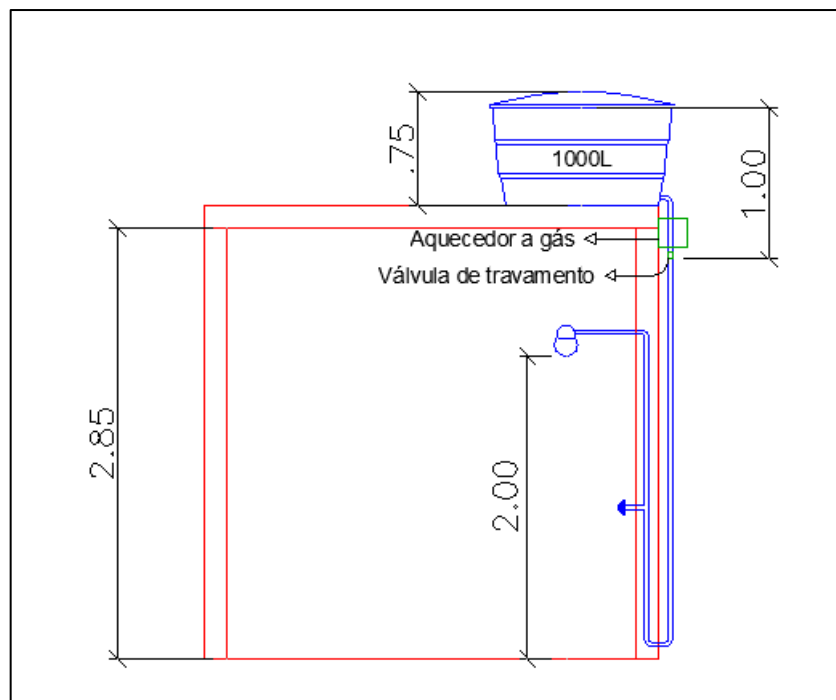


Figura 49: Esquema de instalação da válvula inteligente. Fonte própria.

4.2.1 – Cálculo da pressão hidrostática

Considerando uma tubulação com diâmetro padrão de 2,5 cm, que a densidade da água seja de 1000 Kg/m³ e levando em conta as dimensões estipuladas na Figura 49:

$$\rho = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$h = 1,0 \text{ m}$$

$$D_{tub} = 0,025 \text{ m}$$

$$P_h = \rho \cdot g \cdot h = 9810 \text{ Pa}$$

Portanto há uma pressão hidrostática de 9,81 kPa na tubulação atuando sobre a válvula.

4.2.2 – Cálculo da força hidrostática na tubulação

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = 4,9087 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$F_h = P_h \times S = 4,8155 \text{ N}$$

Com essa força hidrostática é possível ter uma ideia do quanto a válvula e as molas de SMA terão que suportar durante o seu funcionamento.

4.2.3 – Análise dinâmica

Esta análise, baseada na válvula em funcionamento, com escoamento de água na tubulação, será feita a partir da Equação de Bernoulli (Equação 1), na qual se considera que o ponto mais alto do sistema é representado pelo índice 1:

$$P_1 + \frac{\rho \cdot v_1^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{\rho \cdot v_2^2}{2} + \rho \cdot g \cdot h_2 \quad (1)$$

Mais algumas considerações incluem:

$$P_1 = P_2$$

$$h_1 = h$$

$$v_1 = 0$$

$$\rho \cdot g \cdot h_2 = 0$$

Com isto, vem que:

$$\rho \cdot g \cdot h_1 = \frac{\rho \cdot v_2^2}{2}$$

$$v_2 = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_1} = \sqrt{19,62} = 4,43 \text{ m/s}$$

$$v_2 = 4,43 \text{ m/s}$$

A força da coluna d'água também pode ser escrita como o produto da vazão mássica (dada em Kg/s) pela variação de velocidade, como pode ser visto na Equação 2:

$$F = \dot{m} \cdot \Delta v \quad (2)$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 = v_2$$

Ainda é possível escrever a vazão mássica como o produto da vazão (em m³/s) pela densidade (Equação 3):

$$\dot{m} = \rho \cdot Q \quad (3)$$

E a própria vazão é resultado do produto da velocidade pela área transversal (Equação 4):

$$Q = v \cdot S \quad (4)$$

Assim, substituindo a Equação 4 na 3 e a 3 na 2, obteremos a relação descrita na Equação 5:

$$F = \rho \cdot v_2^2 \cdot S \quad (5)$$

Realizando a devida substituição dos valores, é obtida a força da coluna d'água:

$$F = 9,63 N$$

Esses valores de força exercida serão comparados com os resultados obtidos nos testes experimentais cujo objetivo é verificar a capacidade de carregamento das molas que atuarão a válvula. Esses resultados são discutidos no Capítulo 6.

4.3 – Funcionamento da válvula inteligente

Antes da montagem das molas de SMA, martensíticas a temperatura ambiente, na válvula, as mesmas são pré-deformadas garantindo a reorientação total para M^d . Conforme mostrado na Figura 48, temos a válvula na sua posição normalmente “aberta”, permitindo a passagem do fluido. Assim que a temperatura deste último atinge A_s , as molas de SMA começam a sofrer transformação de fase para A , reduzindo seu comprimento, tracionando o tampão e o travamento, promovendo dessa forma o fechamento da válvula enquanto a temperatura do fluido estiver em torno de A_f (Figura 49). A válvula abrirá novamente quando a temperatura do fluido reduzir até M_s , quando se inicia a transformação de volta para a fase martensítica menos rígida. O mecanismo de retorno cabe à tensão assistida constante decorrente da força hidrostática do fluido. Neste ponto, essa força supera a das molas de SMA, o que faz com que o travamento retorne à posição original e permita o escoamento do fluido novamente.

Enquanto as molas de SMA são comprimidas, é importante que a força hidrostática seja menor que a força de tração das molas de SMA. O travamento pode ter um diâmetro maior em caso de aplicações industriais para furação estrutural, visando ser acoplado entre dois flanges.

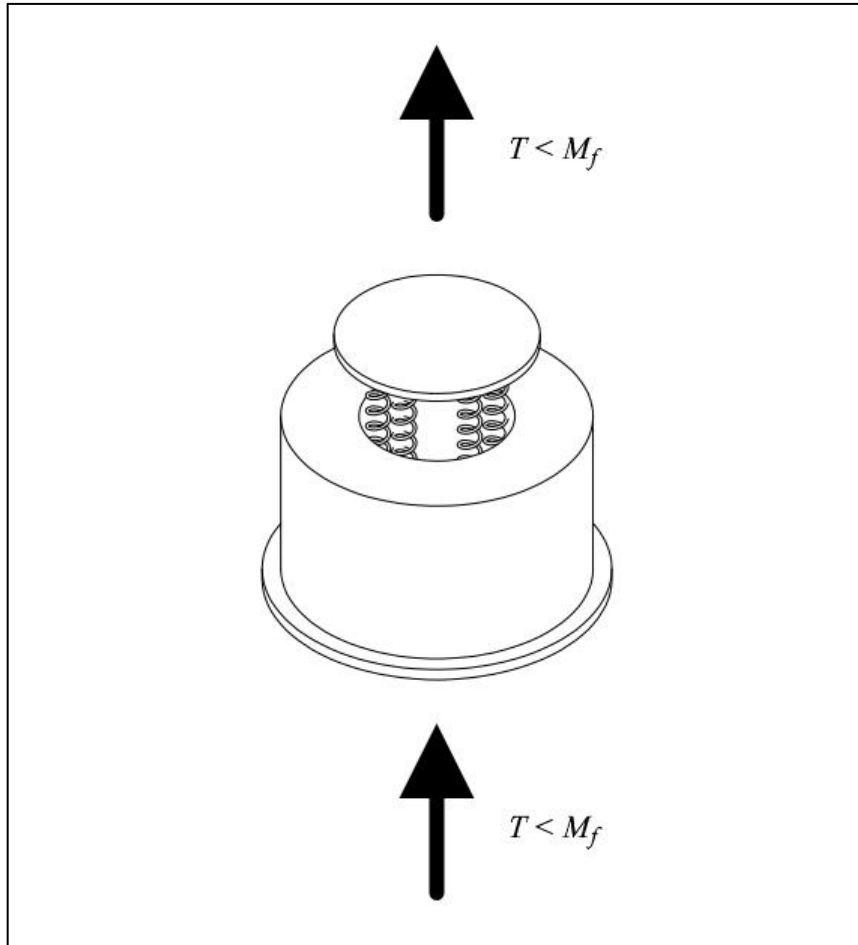


Figura 50: Desenho da válvula na configuração "aberta". A seta representa o sentido do fluxo. Fonte própria.

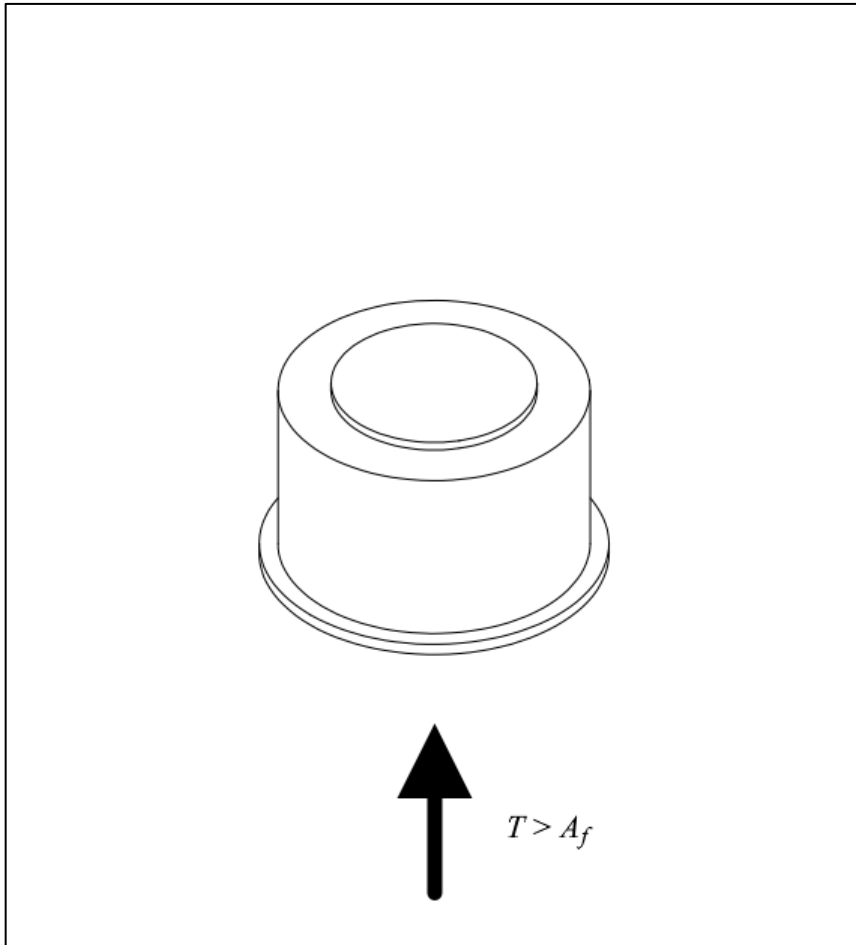


Figura 51: Desenho da válvula na configuração "fechada". A seta indica o sentido do fluxo. Fonte própria.

Capítulo 5

Metodologia Experimental

5.1 – Fio SMA utilizado

O material escolhido para esse projeto é um fio FLEXINOL® Actuator Wire, do fabricante DYNALLOY, Inc. O site do fabricante assegura que, para tensões de até 172 MPa, o emprego desses fios como atuadores é segura. Contudo, é válido observar que, dependendo das condições específicas de um projeto, tensões maiores ou menores poderão ser utilizadas. Também do próprio site foi extraída uma tabela (Tabela 2) contendo algumas especificações do fio escolhido, além do gráfico “Temperatura versus Deformação”, mostrado na Figura 50. O gráfico nos informa que a temperatura de iniciação da fase austenítica varia de 70°C a 90°C, sob a carga mecânica constante de 172 MPa. O carretel contendo o fio SMA utilizado é mostrado na Figura 51 [28].

Tabela 2: Especificações do fio SMA FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte [28].

Liga	Níquel-Titânio
Diâmetro (mm)	0,51
Força nominal (kgf)	3,560
Resistividade elétrica ($\mu\Omega \times \text{cm}$)	Martensita: 80,0
	Austenita: 100,0
Força do resfriamento (kgf)	1,424
Corrente para 1 segundo de contração (mA)	4000,0
Densidade (g/cm^3)	6,45
Calor específico ($\text{cal}/\text{g} \times ^\circ\text{C}$)	0,2
Calor latente de transformação (cal/g)	5,78
Condutividade térmica ($\text{W}/\text{cm} \times ^\circ\text{C}$)	0,18
Coeficiente de expansão térmica ($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	Martensita: 6,60
	Austenita: 11,0
Coeficiente de Poisson	0,33

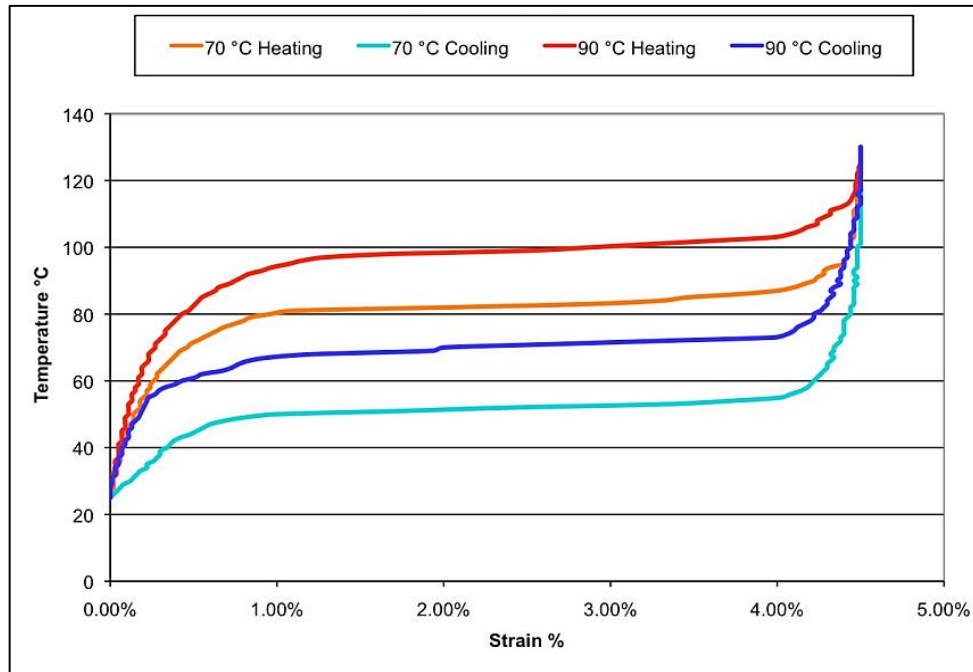


Figura 52: Gráfico Temperatura versus Deformação sob carga mecânica constante de 172 MPa. Fonte [28].



Figura 53: Rolo do fio SMA FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte própria.

É de fundamental importância seguir cuidadosamente as especificações e orientações recomendadas pelo fabricante, com ênfase na temperatura, já que esta é diretamente ligada com a densidade de corrente submetida ao fio, para que o material seja utilizado de maneira correta, sem desperdícios e perda das suas propriedades termomecânicas.

Na próxima seção será discutida a caracterização deste fio através de um ensaio de tração e de uma análise térmica em um calorímetro diferencial de varredura (DSC).

5.2 – Caracterização do fio de SMA

5.2.1 – Ensaio de tração

O autor citado em [29] realizou um teste de tração deste mesmo fio, com o objetivo de encontrar a tensão última de ruptura do material (σ_{ult}), em seu trabalho no desenvolvimento de uma prótese atuada por elementos de SMA. A Figura 52 mostra o ensaio, com o fio preso em um bloco de resina epóxi, cuja função é fixar o fio nas garras do instrumento de ensaio e evitar qualquer tipo de deslizamento que venha a arruinar os resultados [29].

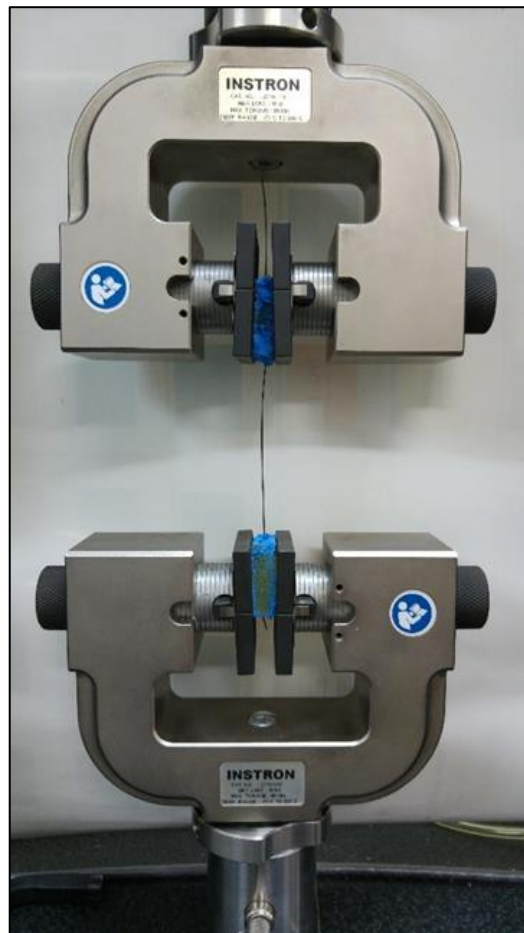


Figura 54: Ensaio de tração do fio FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte [29].

5.2.2 – Análise térmica (DSC)

A análise térmica feita no DSC teve o objetivo de determinar as temperaturas de mudança de fase A_s , A_f , M_s , e M_f do fio de NiTi em estado puro, sem passar por conformação ou tratamento térmico. Esse equipamento mede a variação no fluxo de energia térmica entre a amostra, esta submetida a uma variação programada e controlada de temperatura, e uma referência, podendo ser em função da temperatura ou do tempo. As transformações de fase das SMAs podem absorver ou liberar calor, dependendo do sentido de transição. A direta é exotérmica, o que gera um vale no gráfico, enquanto que a reversa é endotérmica, que por sua vez gera um pico. As temperaturas de interesse então são traçadas a partir do ponto de encontro das retas tangentes entre esses picos e vales e o restante da curva de aquecimento ou resfriamento.

Uma amostra do fio extraído diretamente do rolo e cortado minuciosamente de forma a minimizar os impactos do corte nas propriedades termomecânicas. Essa amostra, juntamente com outra amostra cortada da mola confeccionada, foi levada ao laboratório do Centro de Mecânica Não-Linear da COPPE/POLI (Mecanon) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Lá a amostra foi pesada em uma balança de precisão e posta em um cadinho especial própria do aparelho, o Netzsch DSC 200 F3 (Figura 53). Os parâmetros desse ensaio estão na Tabela 3. A amostra do fio passou por três ciclos completos de aquecimento e resfriamento, contudo apenas os valores obtidos no ciclo intermediário foram considerados.



Figura 55: Aparelho Netzsch DSC 200 F3 utilizado na análise térmica. Fonte própria.

Tabela 3: Parâmetros do ensaio DSC do fio de NiTi. Fonte própria.

Parâmetro	Valor
Massa da amostra (mg)	9,80
Massa do cadinho (mg)	39,4
Faixa de temperaturas (°C)	-20 – 140
Taxa de aquecimento/resfriamento (K/min)	10,0

5.3 – Confeção das molas helicoidais de SMA

Conforme mencionado, a construção da válvula envolve a participação de molas helicoidais, confeccionadas manualmente a partir do fio FLEXINOL® Actuator Wire enrolado firmemente em torno de um parafuso sem fim e preso nas extremidades com porcas, conforme visto na Figura 54 abaixo. Em seguida, os parafusos com os fios enrolados passaram por uma têmpera a 540°C, sendo resfriados à água após passarem 30 minutos no forno (Figura 55). Essa temperatura de tratamento térmico foi escolhida com base em outros projetos que também utilizam um valor semelhante [22]. Depois da têmpera, as porcas são removidas para a retirada das molas. Visto que o fio disponível tem diâmetro bastante fino, de 0,51 mm, o diâmetro da espiral fica limitado pelo seu índice C , dado pela Equação 6, o qual normalmente varia de 6 a 12 [30]. Por isso o parafuso escolhido para enrolar as molas foi um fuso tipo M4, já que outro de diâmetro maior poderia gerar molas pouco rígidas.

$$C = \frac{D}{d} \quad (6)$$

**Figura 56:** Foto das molas enroladas nos fusos antes de irem para o forno. Fonte própria.



Figura 57: Forno utilizado no tratamento térmico das molas. Fonte própria.

Depois de serem removidas do fuso, algumas molas foram cortadas pela metade. Ao invés de várias molas serem enroladas individualmente no fuso, optou-se por enrolar uma mola grande e depois dividi-la em outras de comprimento menor. Isso foi feito como uma medida para aproveitar melhor o comprimento útil do fuso. Conforme já comentado, o corte brusco modifica as propriedades do fio, portanto as espiras mais externas foram descartadas. As Figuras 56 e 57 mostram as molas fabricadas, e na Tabela 4 estão as suas respectivas medidas.



Figura 58: Foto das molas construídas. Fonte própria.

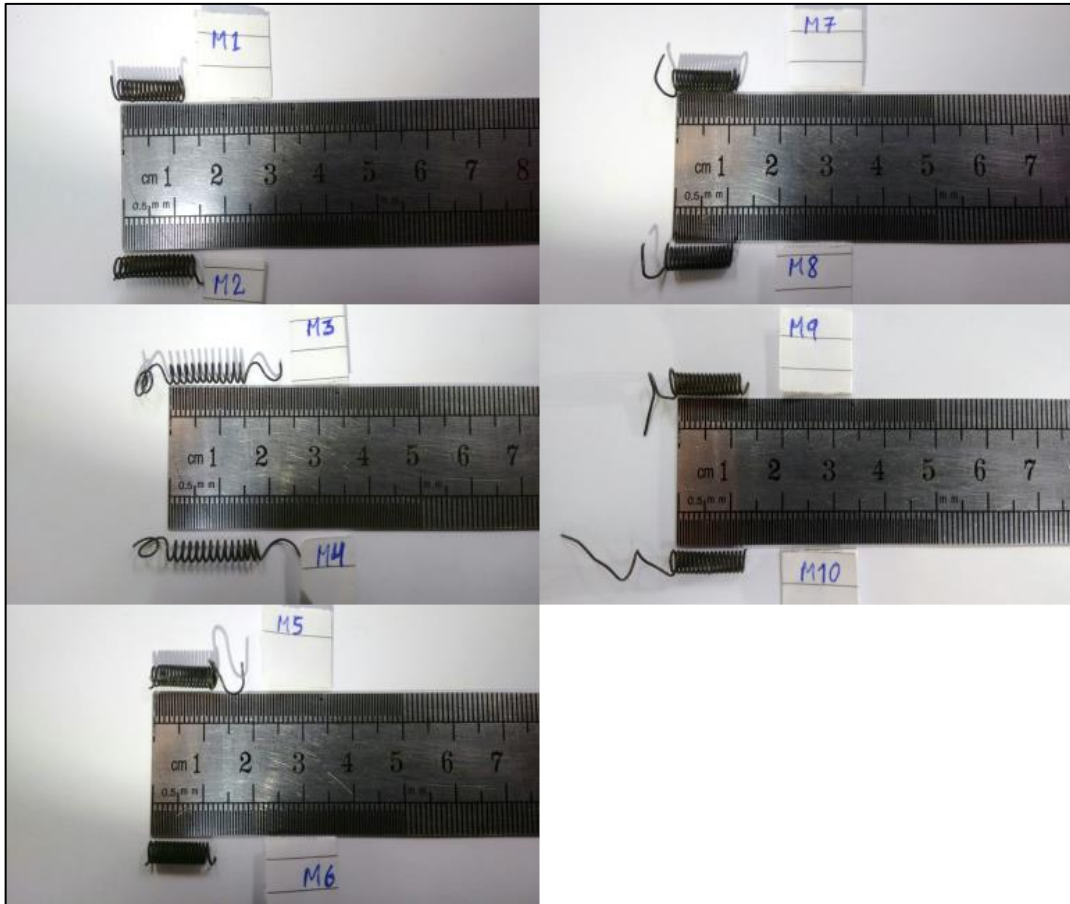


Figura 59: Foto das molas de SMA com comparação de tamanho. Fonte própria.

Tabela 4: Medidas das molas confeccionadas. Fonte própria.

Mola	Diâmetro da espiral (mm)	Comprimento total (mm)	Comprimento útil (mm)	Nº de espiras úteis	Índice
M1	4,42	12,12	10,60	13	8,67
M2	4,50	14,02	12,94	14	8,82
M3	4,58	20,00	13,42	12	8,98
M4	4,46	17,50	15,88	13	8,74
M5	4,42	12,00	10,28	16	8,67
M6	4,40	10,50	9,76	14	8,63
M7	4,50	11,00	9,90	16	8,82
M8	4,40	11,50	10,16	15	8,63
M9	4,34	12,50	10,86	15	8,51
M10	4,34	13,00	12,32	15	8,51

5.4 – Caracterização das molas de SMA

5.4.1 – Ensaio de tração

Para a realização do ensaio de tração, uma das molas, a M4, foi selecionada. O objetivo desse ensaio é determinar a curva da força por deslocamento da mola escolhida. Conforme mencionado, a mola M4 foi presa ao aparelho por meio de grampos especiais e foi submetida a um pré-carregamento de 0,50 N. A Figura 58 mostra uma visão geral do ensaio realizado. O comprimento inicial da mola pré-tensionada foi medido, 15,0 mm (Figura 59, à esquerda) e a máquina foi programada para estendê-la 5,0 cm em dois ciclos, a uma taxa de 0,5 mm/min (Figura 59, à direita).



Figura 60: Ensaio de tração da mola M4. Fonte própria.

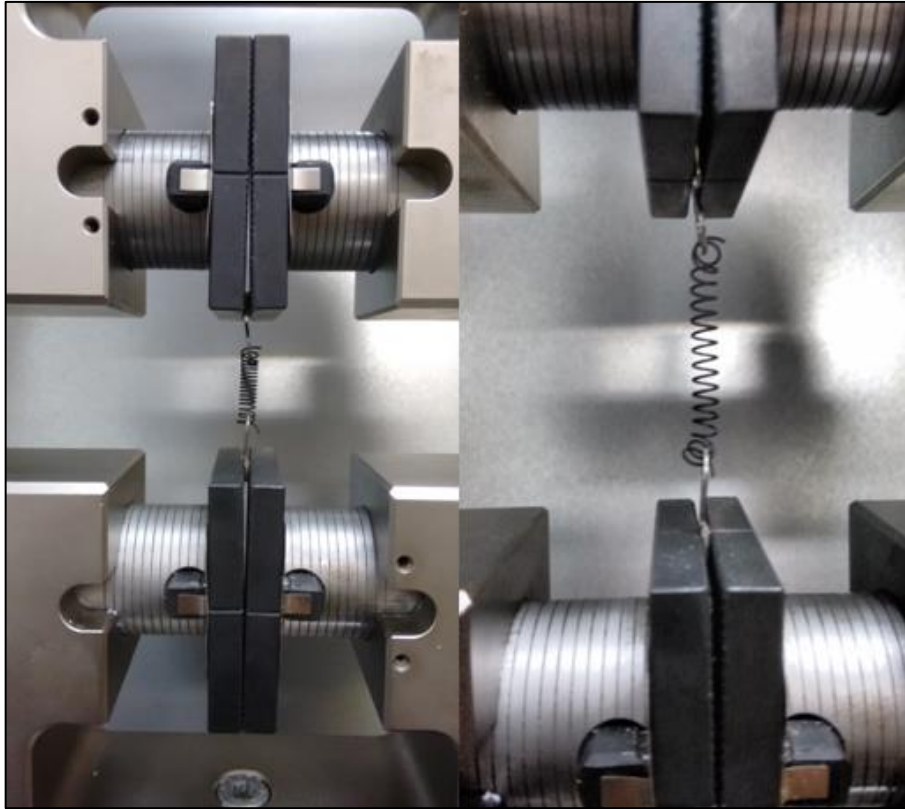


Figura 61: Detalhe do ensaio. Fonte própria.

5.4.2 – Análise térmica (DSC)

De forma similar ao ensaio feito com o fio de SMA, uma amostra da espira da mola M6 foi cortada, aparada, pesada e colocada no aparelho para a análise. Os parâmetros relevantes do ensaio efetuado estão explicitados na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5: Parâmetros do ensaio DSC da mola M6. Fonte própria.

Parâmetro	Valor
Massa da amostra (mg)	11,0
Massa do cadinho (mg)	39,9
Faixa de temperaturas (°C)	-20 – 140
Taxa de aquecimento/resfriamento (K/min)	10,0

5.5 – Teste com carregamento constante

Com o intuito de verificar a quantidade de carga que as molas de SMA são capazes de suportar, seu desempenho mediante ciclos de aquecimento e resfriamento e o deslocamento sofrido durante a atuação, foi proposto e construído um aparato guiado no qual as molas são sujeitas a testes submetidos a carregamento constante, provocado por pesos padrão de massas distintas, os quais simulam a força hidrostática do fluido que escoar pelo encanamento. Inicialmente esses testes contemplavam todas as dez molas construídas de uma só vez, contudo, devido a preocupações sobre o espaço ocupado e como gerar aquecimento uniforme em todas as molas ao mesmo tempo, foi decidido diminuir o número de espécimes para quatro. A figura 60 mostra o conceito do aparato. O aquecimento, como de costume, é proveniente de uma fonte elétrica. As molas são fixadas, em paralelo, no suporte através de linhas de pesca (na Figura 60 em verde), um material resistente, isolante térmico e elétrico e o mais próximo possível de um fio inextensível.

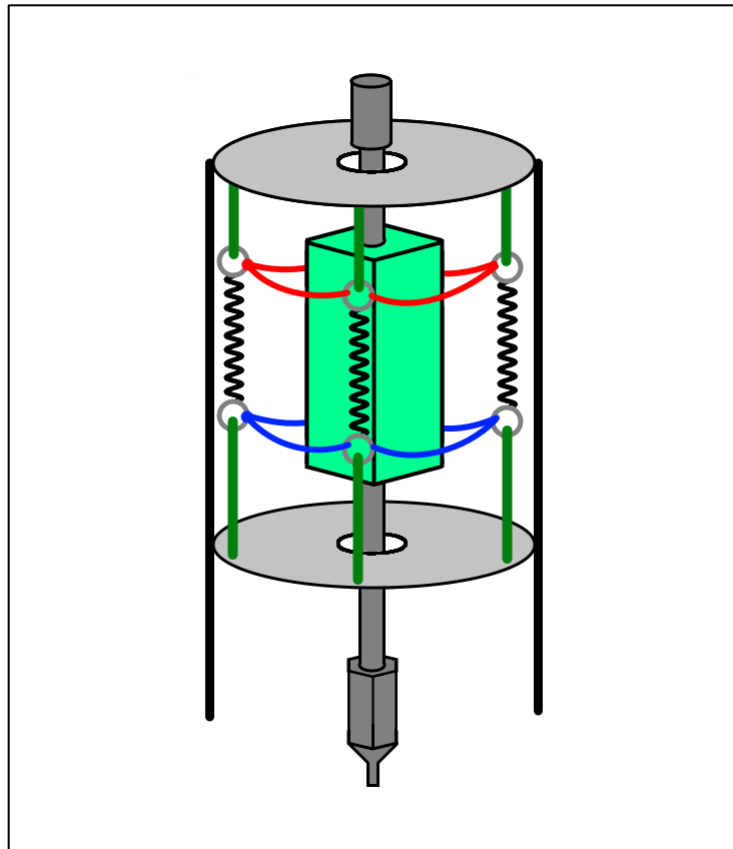


Figura 62: Desenho conceitual do aparato. Fonte própria.

O deslocamento da atuação é medido por um transdutor de posição GEFRAN, modelo PY2-F-25-S (Figura 61) acoplado ao suporte, e a corrente elétrica por um amperímetro, ambos ligados ao aquisitor de dados Spider 8, da fabricante HMB (Figura 62).



Figura 63: Transdutor de posição GEFRAN modelo PY2-F-25-S. Fonte própria.



Figura 64: Aquisitor de dados Spider 8. Fonte própria.

5.5.1 – Montagem do aparato experimental

A primeira etapa da construção do aparato foi o corte de dois discos de alumínio, de aproximadamente 7,0 cm de diâmetro, conforme mostra a Figura 63. Em seguida foram feitos vários furos nas chapas para que as linhas de pesca pudessem ser amarradas firmemente e também para a passagem das guias de alumínio, as quais garantem que os discos permaneçam paralelos e alinhados em relação um ao outro. Outro papel importante dessas linhas é o de suportar o peso das massas que serão utilizadas nos testes. Para tal feito, algumas delas serão amarradas no disco inferior como uma rede.

No meio desta estrutura, passando pelo furo central, encontra-se o transdutor de deslocamento GEFTRAN, cujo eixo de certa forma também se comporta como uma guia. Na maioria dos testes de aquisição de dados, o corpo do transdutor é fixo enquanto que é o eixo que se desloca. Curiosamente, nos testes que foram realizados no aparato experimental, foi observado o comportamento oposto, ou seja, é o corpo do GEFTRAN que se movimenta, gerando a aquisição do deslocamento. A justificativa para esse modo de uso é o posicionamento vertical do transdutor, considerado o mais conveniente para o ensaio a ser feito, já que não foi encontrado um modo satisfatório de montá-lo com o eixo móvel. Além do mais, o próprio corpo do instrumento é grande demais para que ele passe pelo furo central, o que elimina qualquer risco de quedas acidentais ou que o disco inferior ultrapasse o limite imposto pelo eixo do transdutor.

Posteriormente, a estrutura básica do aparato (os discos, as guias e o GEFTRAN) foi fixada pela parte superior em um bloco de madeira que por sua vez foi fixado numa estante através de parafusos e porcas, de forma mais firme e estável possível, a fim de minimizar qualquer erro de leitura na aquisição de dados que venha a ser causado por vibrações indesejadas.

Por fim, as molas de SMA foram montadas no sistema por meio de olhais presos às extremidades. Esses olhais também servem como ponto de contato elétrico, conforme mostra a Figura 64. Os fios elétricos unem as molas e os olhais em paralelo, de forma a reduzir a quantidade de fios utilizada pelo experimento e a corrente elétrica necessária para o acionamento do sistema. Por fim, o conjunto representado pela Figura 64 é amarrado nos discos de alumínio através das linhas de pesca, conforme mostram as Figuras 65 e 66.

Com o aparato pronto, o transdutor GEFTRAN e o amperímetro foram ligados ao Spider 8, sendo este último também ligado aos terminais elétricos das molas. O aquisitor, por

sua vez, está conectado a um programa de aquisição de dados. Uma fonte elétrica controlada remotamente por computador, conforme mencionado, é responsável pelo aquecimento das quatro molas utilizadas.



Figura 65: Discos de alumínio cortados. Fonte própria.

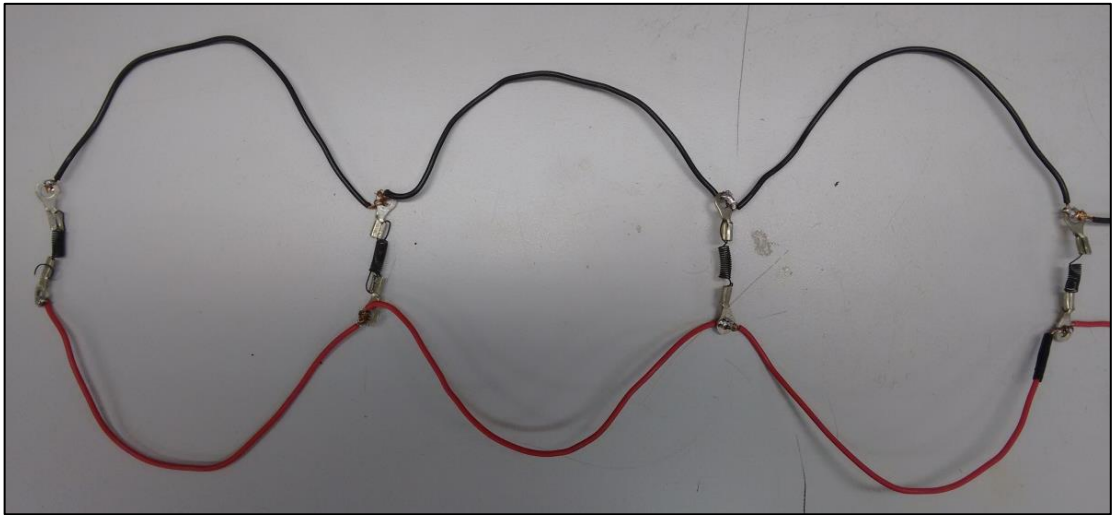


Figura 66: As molas de SMA devidamente fixadas aos olhais e conectadas entre si pela fiação em paralelo.

Fonte própria.

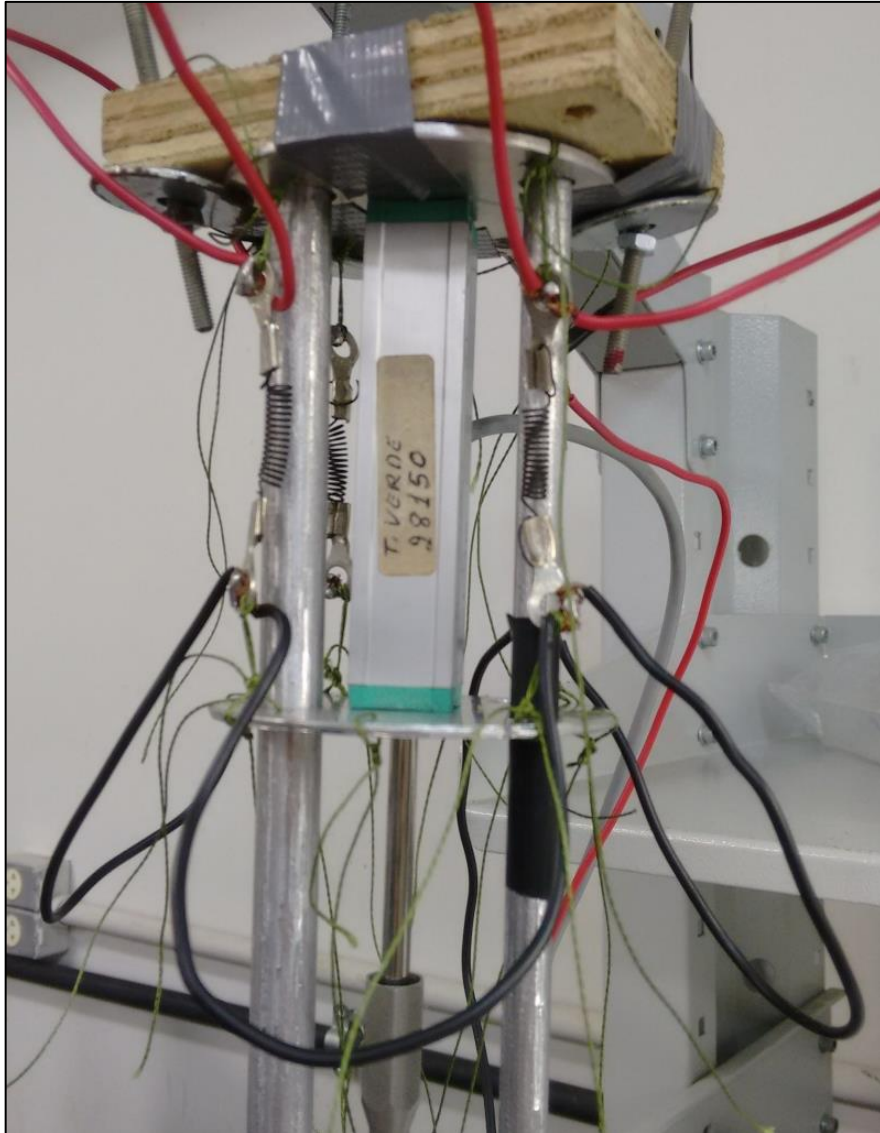


Figura 67: Foto do aparato experimental pronto. Fonte própria.

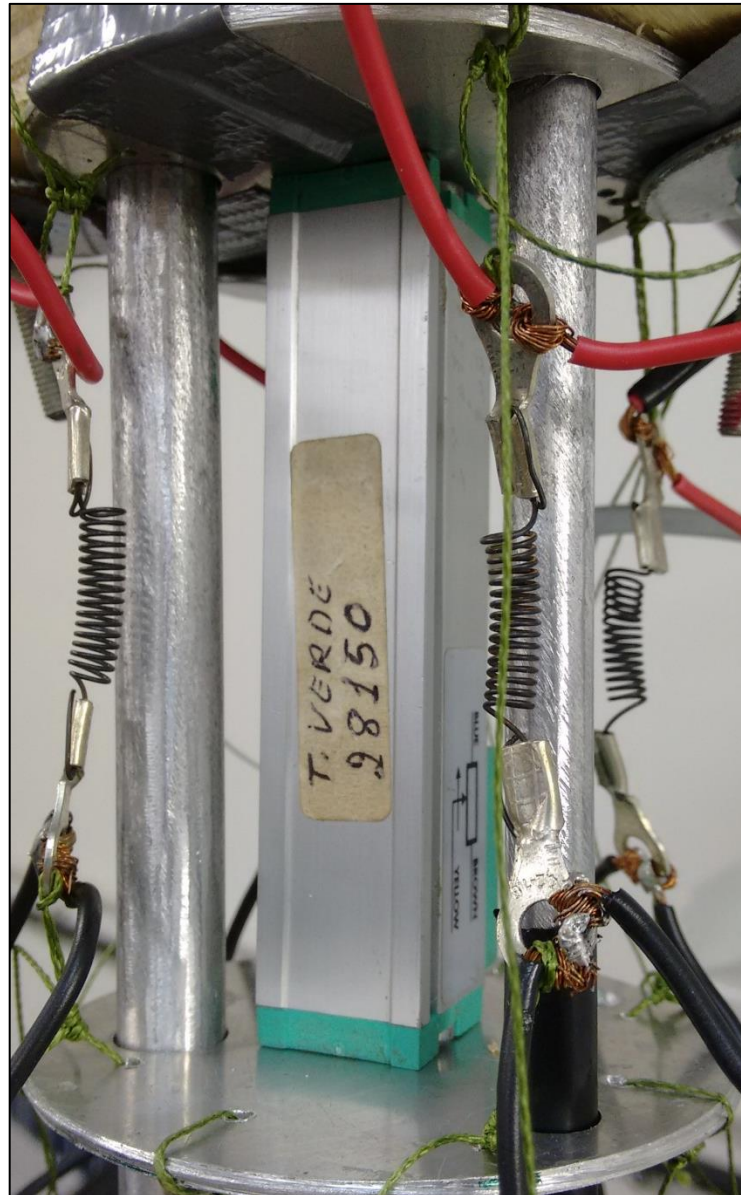


Figura 68: Detalhe do aparato experimental, focado nas molas e no GEFRAN. Fonte própria.

5.5.2 – Procedimento experimental

Primeiramente, com o sistema em repouso e em temperatura ambiente, com as molas de SMA portando microestrutura martensítica, é colocado um peso de medida padrão (100, 300 ou 500 gramas) na rede de linhas de pesca, puxando consigo o disco inferior, o que provoca a deformação nas molas, e a movimentação do transdutor para baixo, por ação da gravidade. Esse estado simula a válvula na posição “aberta”, onde as molas deformadas permitem a passagem do fluido. Logo a seguir, a fonte é ligada e inicia-se o processo de aquecimento durante o intervalo de tempo estipulado na Tabela 6, no qual se espera que o

efeito de memória de forma ocorra e as molas recuperem a deformação sofrida, suspendendo consigo o peso de massa padrão. Isto simula a válvula sendo ativada, onde se espera que a temperatura do suposto fluido ultrapasse A_f e que a força exercida pelas molas atuadas consiga suportar a carga hidrostática. Após o tempo destinado ao aquecimento terminar, a fonte é desligada e o peso atrelado ao suporte faz com que as molas expandam novamente, retornando ao cenário anterior ao aquecimento, fechando o primeiro dos seis ciclos de variação térmica.

Terminada essa primeira etapa, o teste reinicia-se mais uma vez com o mesmo peso do procedimento anterior, mas desta vez com a faixa de corrente mais alta, de forma a provocar um aquecimento mais intenso nas molas de SMA. Finalmente, após completar todos os ciclos de atuação, o peso é trocado, as molas são aquecidas livres de carga para assim eliminar qualquer deformação residual e uma nova bateria de testes começa. A Tabela 6 resume os parâmetros iniciais de cada uma dessas baterias experimentais.

Durante todos os ciclos térmicos realizados é também feita a aquisição do deslocamento sofrido e da corrente elétrica atuante no sistema. Para tanto, o transdutor foi calibrado de tal maneira que a origem corresponde ao momento que o seu corpo toca no disco superior do suporte, conforme visto na Figura 65, e adota valores crescentes à medida que o transdutor desce em direção ao solo. O programa de aquisição de dados guarda os pontos relativos à posição do sistema em tempo real, assim como o quanto de corrente elétrica passa por ele.

Tabela 6: Parâmetros das baterias experimentais. Fonte própria.

Peso (g)	Corrente total (A)	Corrente por mola (A)	Nº de ciclos térmicos	Aquecimento (s)	Resfriamento (s)
100,0	6,0	1,5	6	90,0	120,0
	8,0	2,0	6	90,0	120,0
	10,0	2,5	6	90,0	120,0
300,0	6,0	1,5	6	90,0	120,0
	8,0	2,0	6	90,0	120,0
	10,0	2,5	6	90,0	120,0
500,0	6,0	1,5	6	90,0	120,0
	8,0	2,0	6	90,0	120,0
	10,0	2,5	6	90,0	120,0

Capítulo 6

Resultados Experimentais

6.1 – Ensaio de tração

6.1.1 – Fio FLEXINOL® Actuator Wire

De acordo com [29], a σ_{ult} do fio chegou a aproximadamente 720 MPa, conforme visualizado no gráfico da Figura 67 abaixo. É possível distinguir a zona de transição entre a M^t e a M^d entre as seções quase lineares do gráfico, as quais caracterizam os regimes elásticos do material. Infelizmente, o fio rompeu-se antes que houvesse qualquer deformação plástica evidente [29].

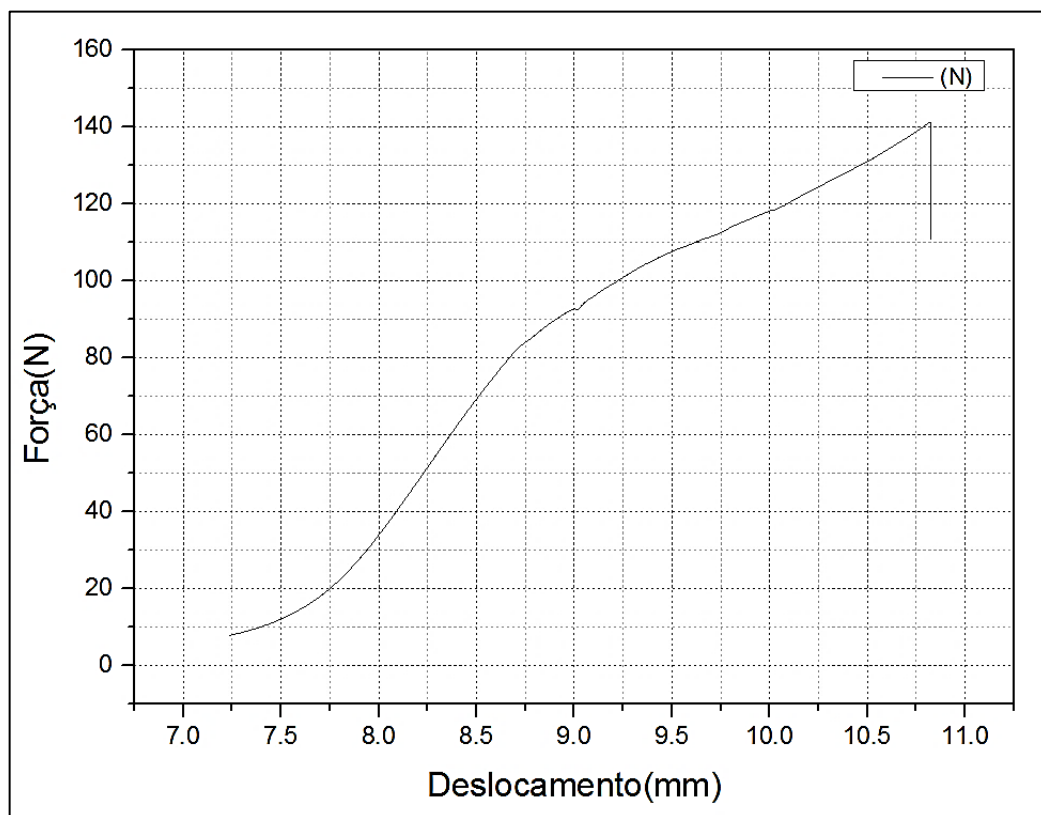


Figura 69: Gráfico Força versus Deslocamento do ensaio de tração do fio de SMA. Fonte [29].

6.1.2 – Mola M4 de SMA

O ensaio de tração da mola M4 gerou um resultado esperado, com a curva do gráfico “Carregamento × Deslocamento” da Figura 61 apresentando duas regiões nitidamente retilíneas e praticamente paralelas entre si, indicando assim um comportamento em regime elástico, de modo similar ao ensaio anterior, com a faixa de transição entre M^t e M^d aproximadamente entre 2,0 e 3,0 N.

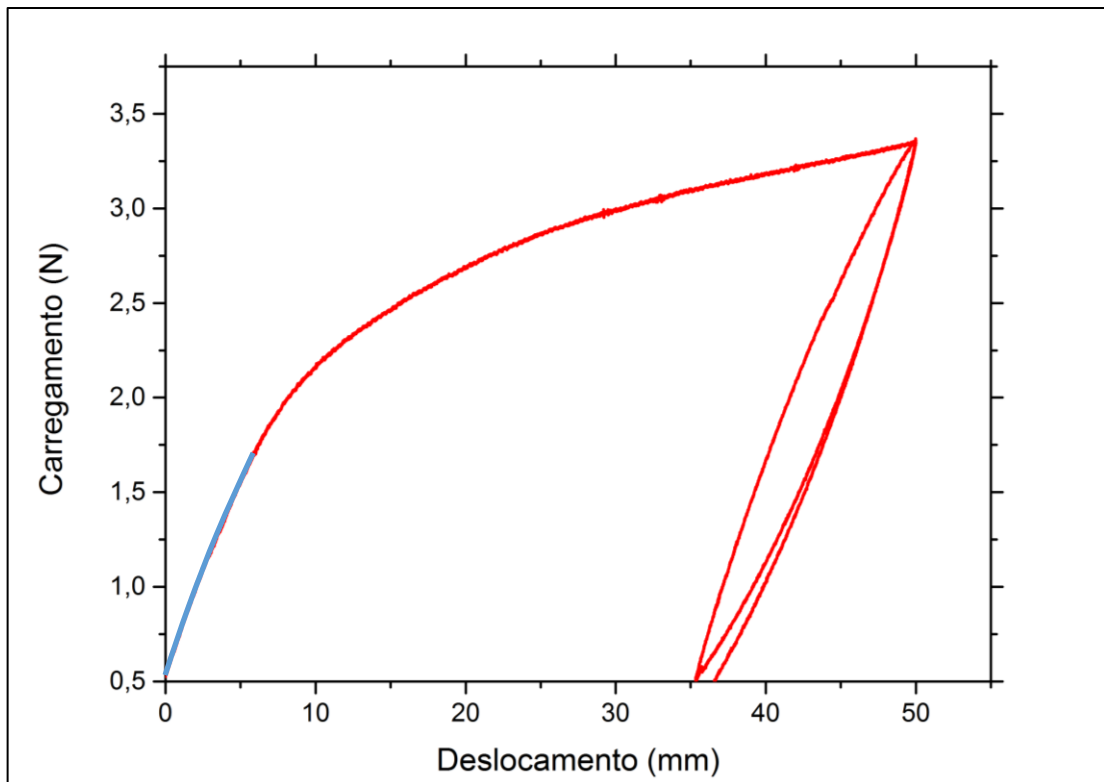


Figura 70: Gráfico Carregamento x Deslocamento da mola M6. Fonte própria.

A constante elástica da mola enquanto ela está na fase martensítica é determinada a partir da inclinação da reta tangente à parte da curva correspondente às regiões de comportamento linear. Com o auxílio do software de análise gráfica OriginPro, foi encontrado um valor de 195,93 N/m extraído da região destacada em azul na Figura 68. Para determinar a rigidez da mola na fase austenítica, seria necessário realizar o ensaio de tração em uma máquina que permita o controle de temperatura do ensaio.

6.2 – Análise térmica (DSC)

6.2.1 – Do fio FLEXINOL® Actuator Wire

O resultado da análise do DSC apresentou uma anomalia na curva de resfriamento, e, infelizmente, não foi possível determinar com exatidão as temperaturas M_s e M_f . De início suspeitou-se de que a massa da amostra estaria menor do que o recomendado, contudo a realização de um novo ensaio, cujo gráfico está representado na Figura 69, apresentou a mesma anomalia. Apesar disso, a curva de aquecimento gerou os resultados esperados com sucesso, conforme visto a seguir.

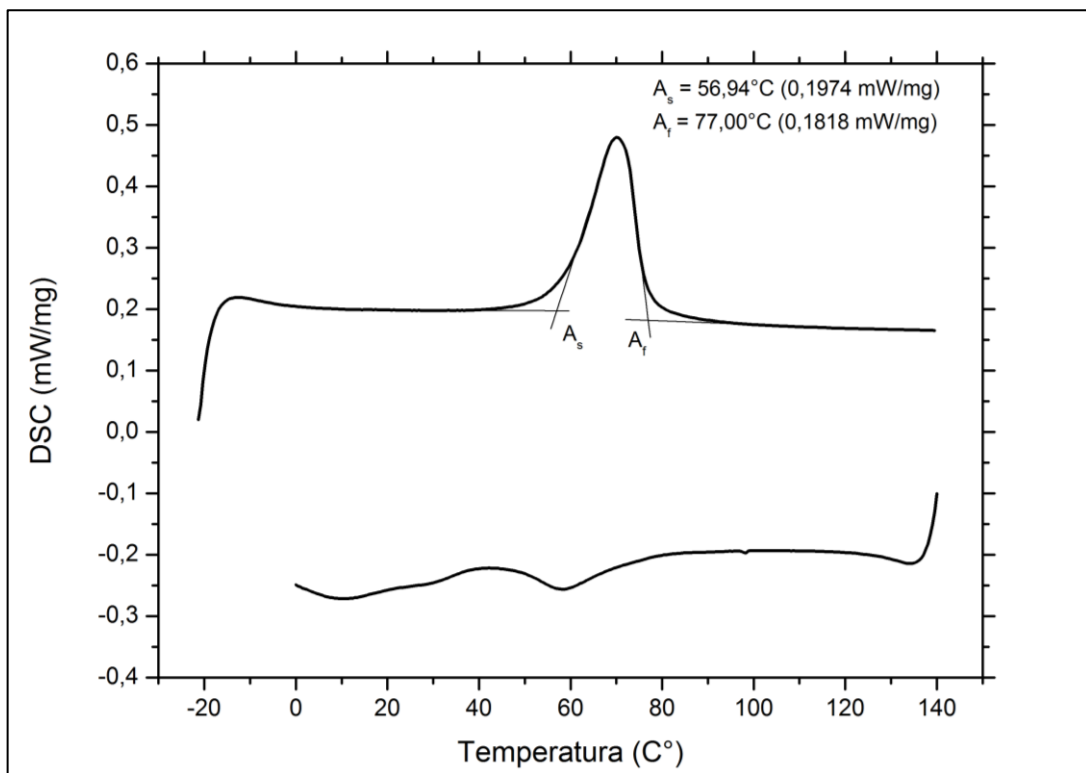


Figura 71: Gráfico do DSC do fio FLEXINOL® Actuator Wire. Fonte própria.

6.2.2 – Da Mola M6

Ao contrário do fio, o ensaio da mola M6 foi bastante satisfatório, com todas as temperaturas devidamente determinadas, conforme visto no gráfico contido na Figura 70. Percebe-se um aumento claro na temperatura de início e término da transição para *A* em relação ao ensaio do fio, possivelmente provocado pelo tratamento térmico efetuado durante o processo de fabricação das molas.

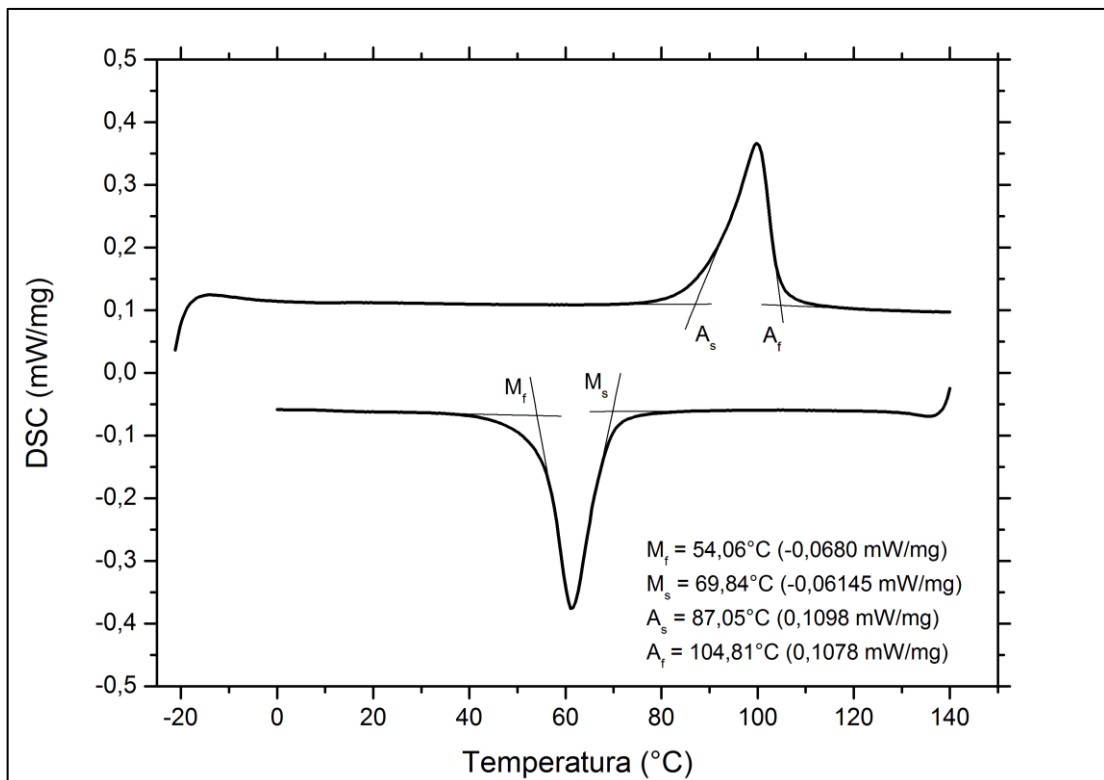


Figura 72: Gráfico DSC da mola M6. Fonte própria.

6.3 – Testes com carregamento constante

6.3.1 – Teste com massa de 100,0 g e 1,5 A por mola

O gráfico representado pela Figura 71 mostra o resultado obtido na primeira bateria de testes efetuados, com a massa de 100,0 g e corrente total de 6,0 A, o que nos dá 1,5 A por cada uma das quatro molas, visto que o sistema está conectado em paralelo. Nota-se pelo gráfico que a quantidade de carga elétrica por mola efetivamente alcançada é um pouco inferior a 1,0 A, mesmo que a fonte indicasse exatamente 6,0 A, sendo a mais provável razão desse fenômeno as perdas energéticas do sistema.

Em relação à curva de posição, o segundo, terceiro e quarto ciclos apresentam-se bastante estáveis, entretanto a partir do quinto ciclo é possível ver que a recuperação de forma não consegue mais estabilizar-se muito bem, conforme demonstram os vales acentuados visíveis nas marcas em torno de 1000 e 1200 segundos.

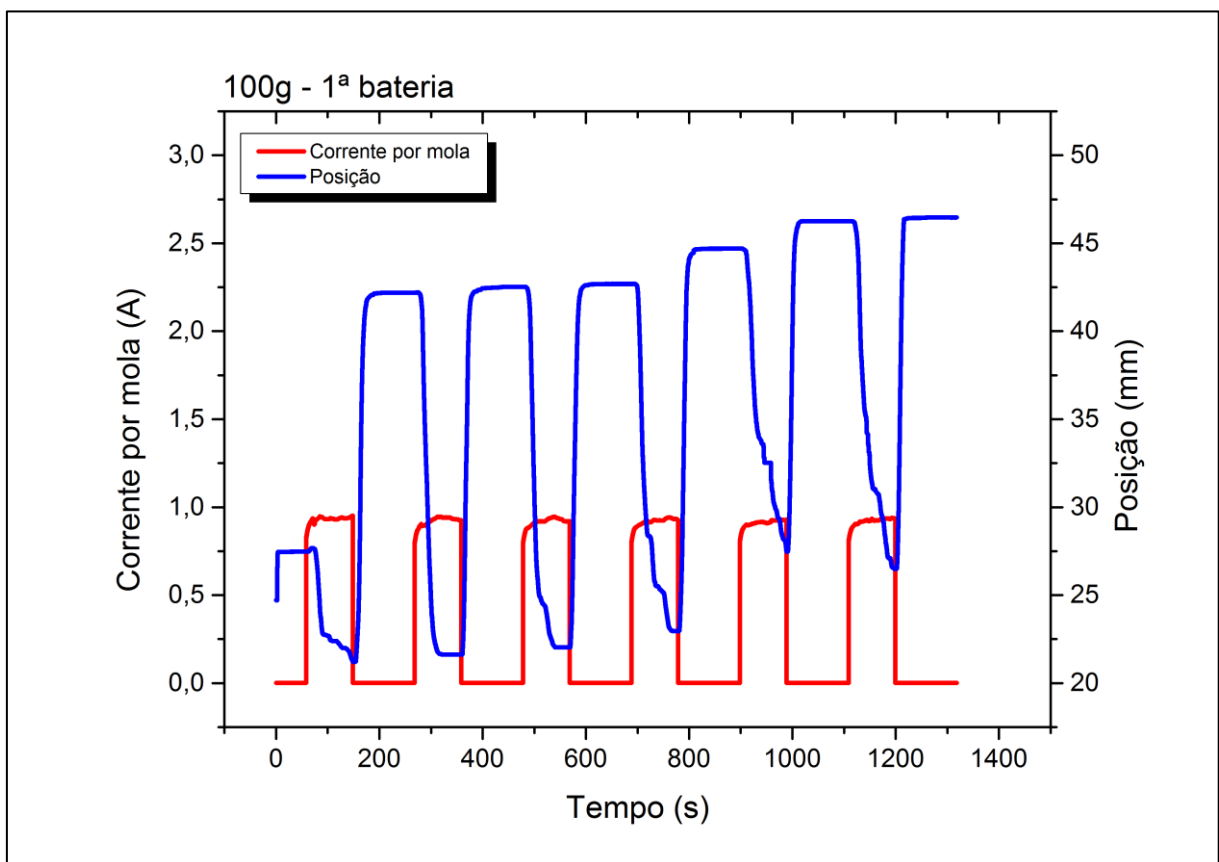


Figura 73: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.

6.3.2 – Teste com massa de 100,0 g e 2,0 A por mola

Diferentemente do teste anterior, os resultados obtidos aqui mostraram ser bastante regulares, com todos os ciclos térmicos comportando-se de maneira similar. O efeito de memória de forma pôde completar-se de maneira total, conforme apontam os picos (molas matensíticas em baixa temperatura) e vales (molas austeníticas em alta temperatura) estáveis da curva de posição da Figura 72. O deslocamento de atuação então é simplesmente a diferença entre o valor dos picos e dos vales da curva de posição. Contudo, novamente a curva de corrente representa uma quantidade considerável de perdas, visto que os valores alcançados são menores do que o previsto.

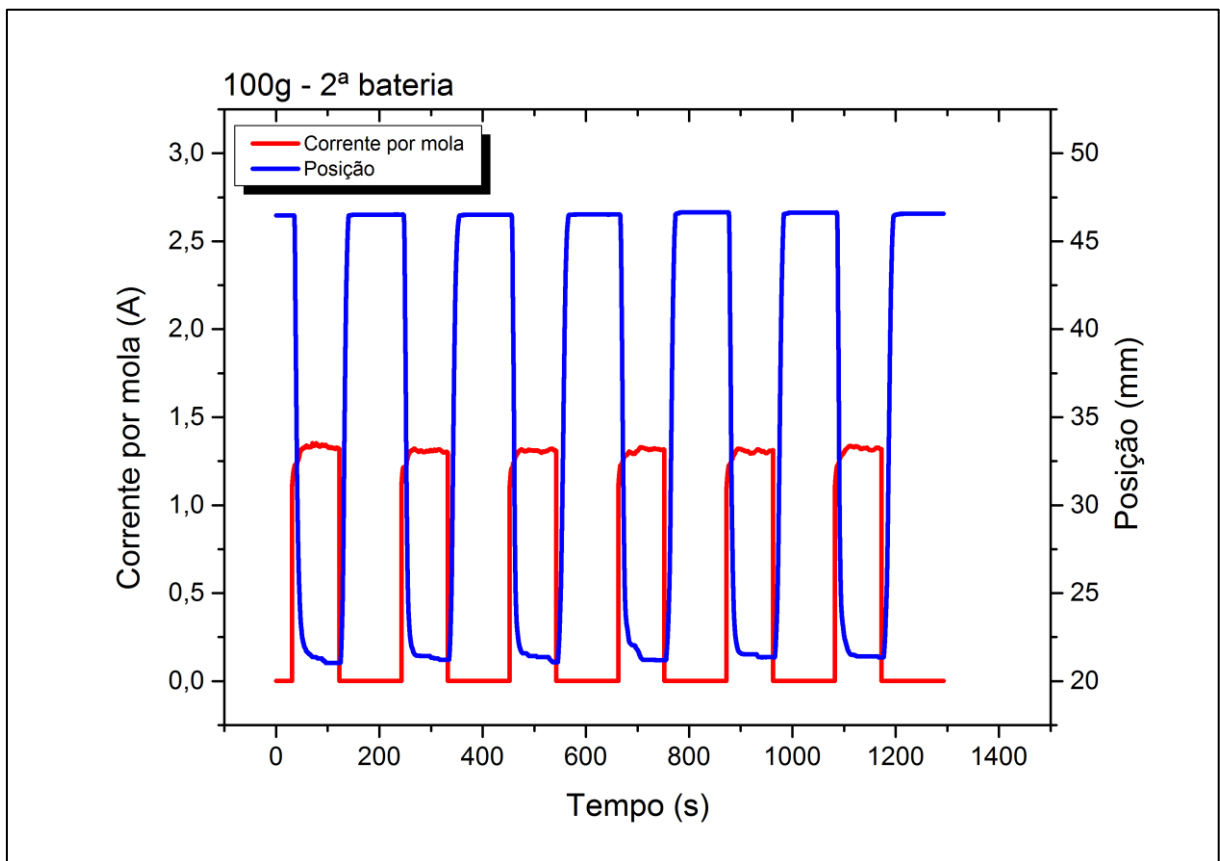


Figura 74: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.

6.3.3 – Teste com massa de 100,0 g e 2,5 A por mola

Assim como no procedimento anterior, esse teste apresentou uma regularidade bem satisfatória, como aponta a Figura 73. Esse experimento encerra a primeira bateria de testes e a participação da massa de 100 g.

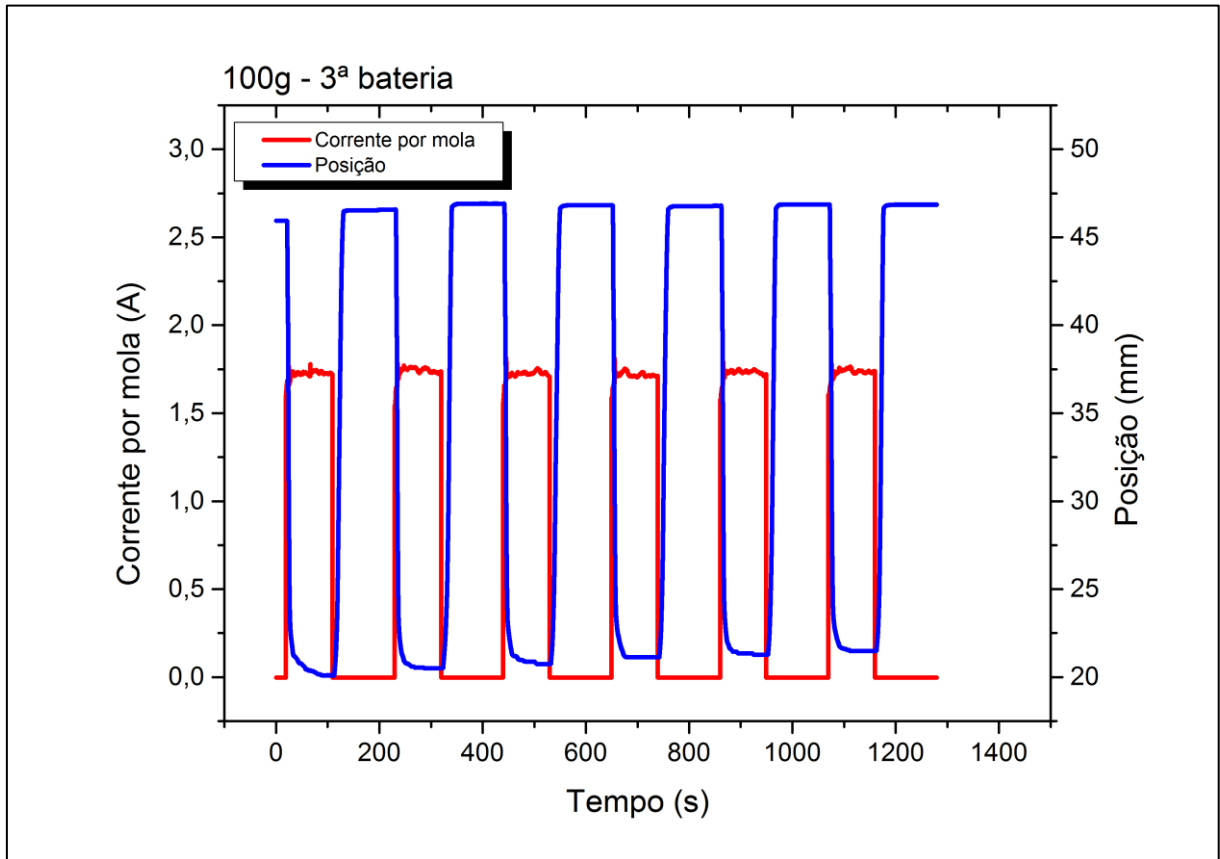


Figura 75: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 100 g. Fonte própria.

6.3.4 – Teste com massa de 300,0 g e 1,5 A por mola

Os resultados correspondentes ao primeiro teste com a massa de 300 g estão expostos na Figura 74, na qual se observa que a corrente de 6,0 A (teoricamente 1,5 A passando em cada mola, mas na prática um valor um pouco menor) não é o suficiente para uma recuperação plena de forma. À medida que os ciclos passam, a recuperação fica cada vez menor, por volta de 2,0 mm durante os ciclos finais. Uma possível razão disto é que o baixo aporte térmico gerado por essa faixa de corrente faz com que a tensão gerada pelo peso da massa padrão seja quase superior à tensão necessária para a transformação de fase.

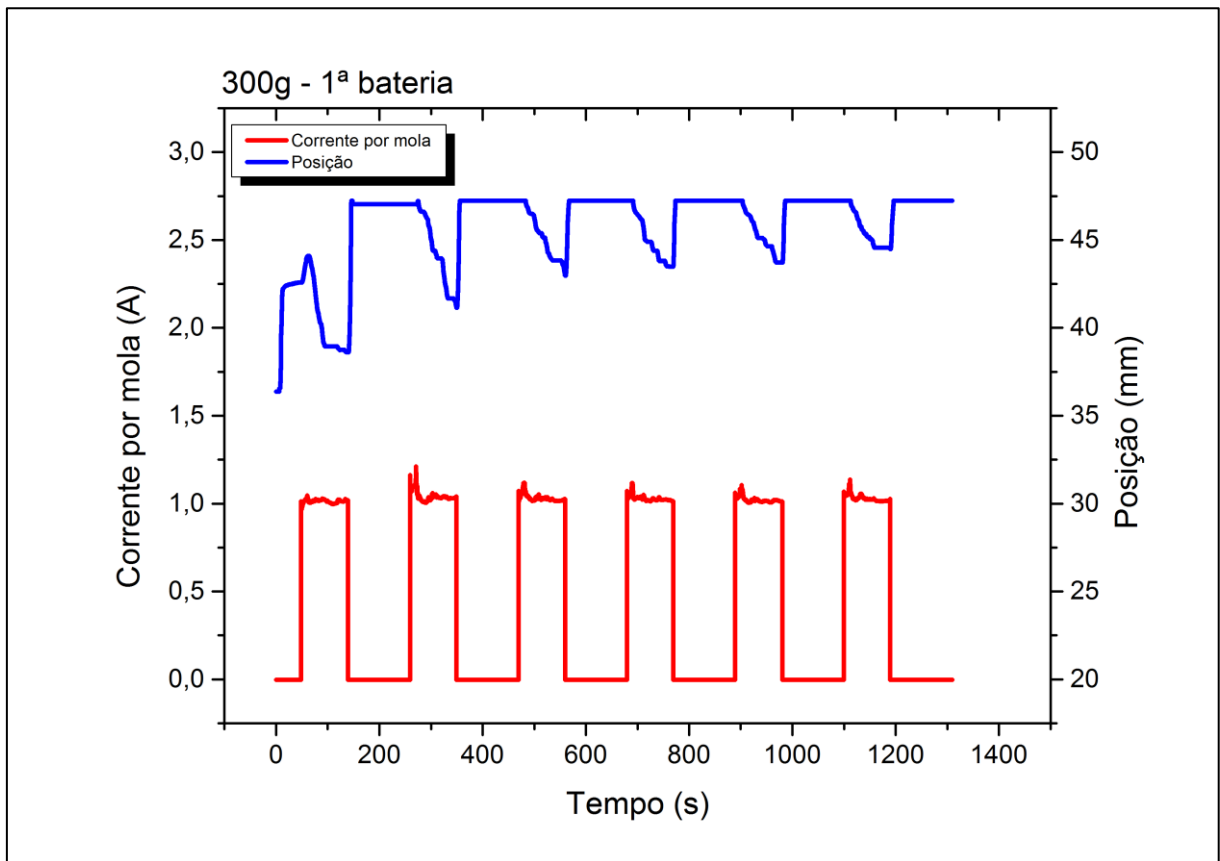


Figura 76: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.

6.3.5 – Teste com massa de 300,0 g e 2,0 A por mola

Neste teste, nota-se uma visível melhora de desempenho quando comparado ao caso anterior, conforme mostra a Figura 75. Há uma anomalia na curva de posição localizada um pouco antes da marca de 900 segundos cuja causa é provavelmente alguma vibração exterior ao sistema.

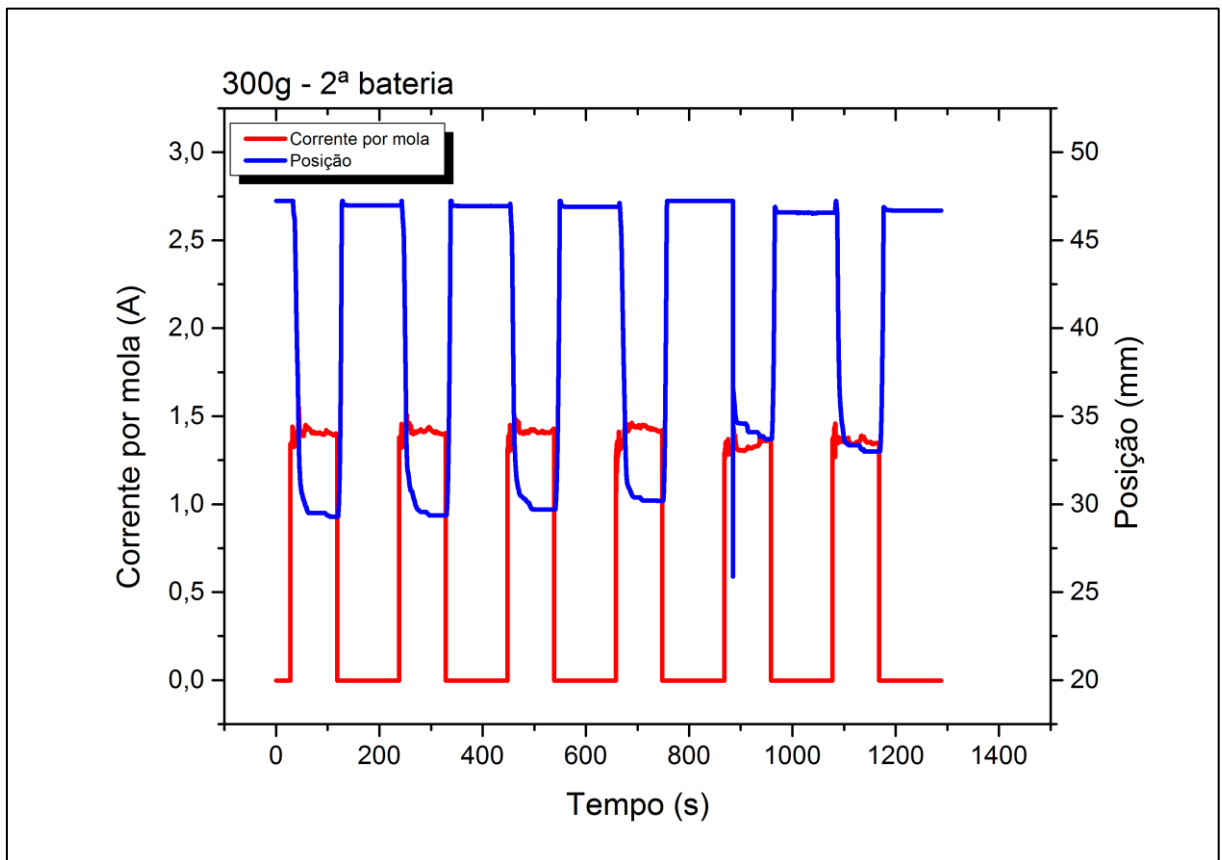


Figura 77: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.

6.3.6 – Teste com massa de 300,0 g e 2,5 A por mola

A Figura 76 mostra o resultado do último teste da bateria de 300 g e, felizmente, observamos uma grande regularidade entre os ciclos térmicos, o que não aconteceu tão bem assim nos procedimentos anteriores. Também se percebe que a recuperação de forma total diminuiu um pouco, em torno de 1,0 cm em relação à bateria de 100 g, naturalmente devido ao uso de uma massa maior.

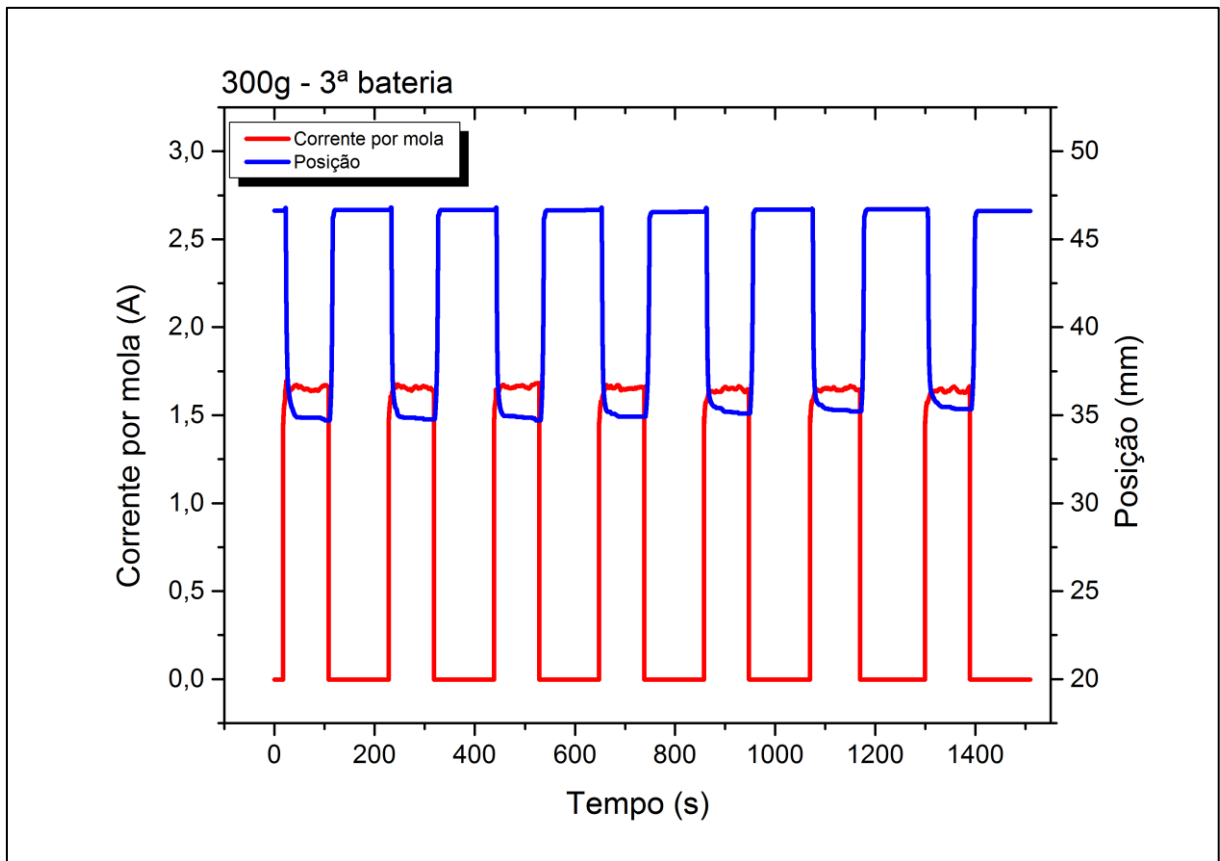


Figura 78: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 300 g. Fonte própria.

6.3.7 – Teste com massa de 500,0 g e 1,5 A por mola

O primeiro teste com 500 g e 6,0 A de corrente total obteve o pior desempenho entre todos os outros, visto que o aquecimento gerado certamente foi insuficiente para as molas de SMA vencerem o peso exercido pela massa acoplada. Nota-se pela Figura 77 que a curva de posições tem uma amplitude de menos de 1,0 mm, ou seja, o transdutor GEFTRAN praticamente não se mexeu.

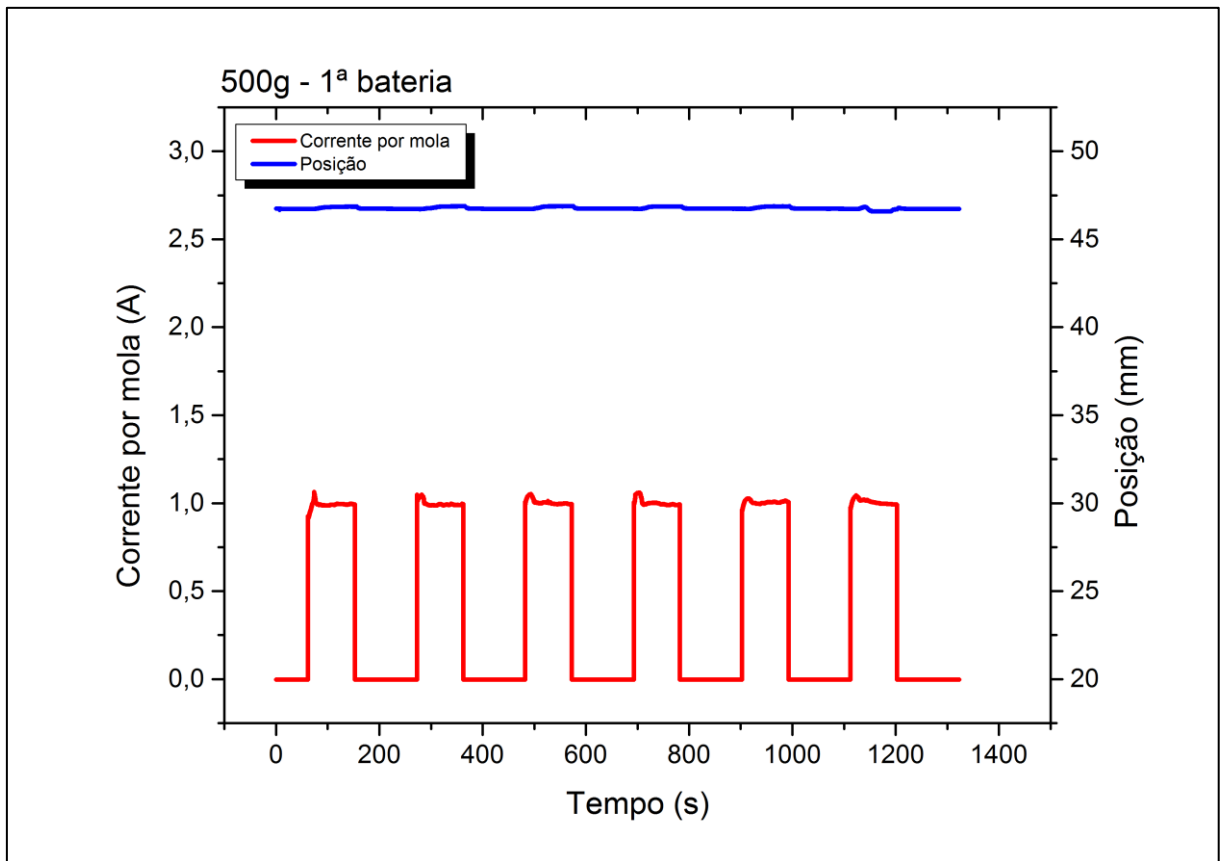


Figura 79: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 1ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.

6.3.8 – Teste com massa de 500,0 g e 2,0 A por mola

A Figura 78 mostra que o aquecimento mais intenso gerado por uma corrente elétrica maior faz com que a força proveniente da recuperação de forma da liga SMA consiga enfim vencer o peso da massa de 500 g, apesar dessa recuperação diminuir um pouco conforme os ciclos térmicos avançam.

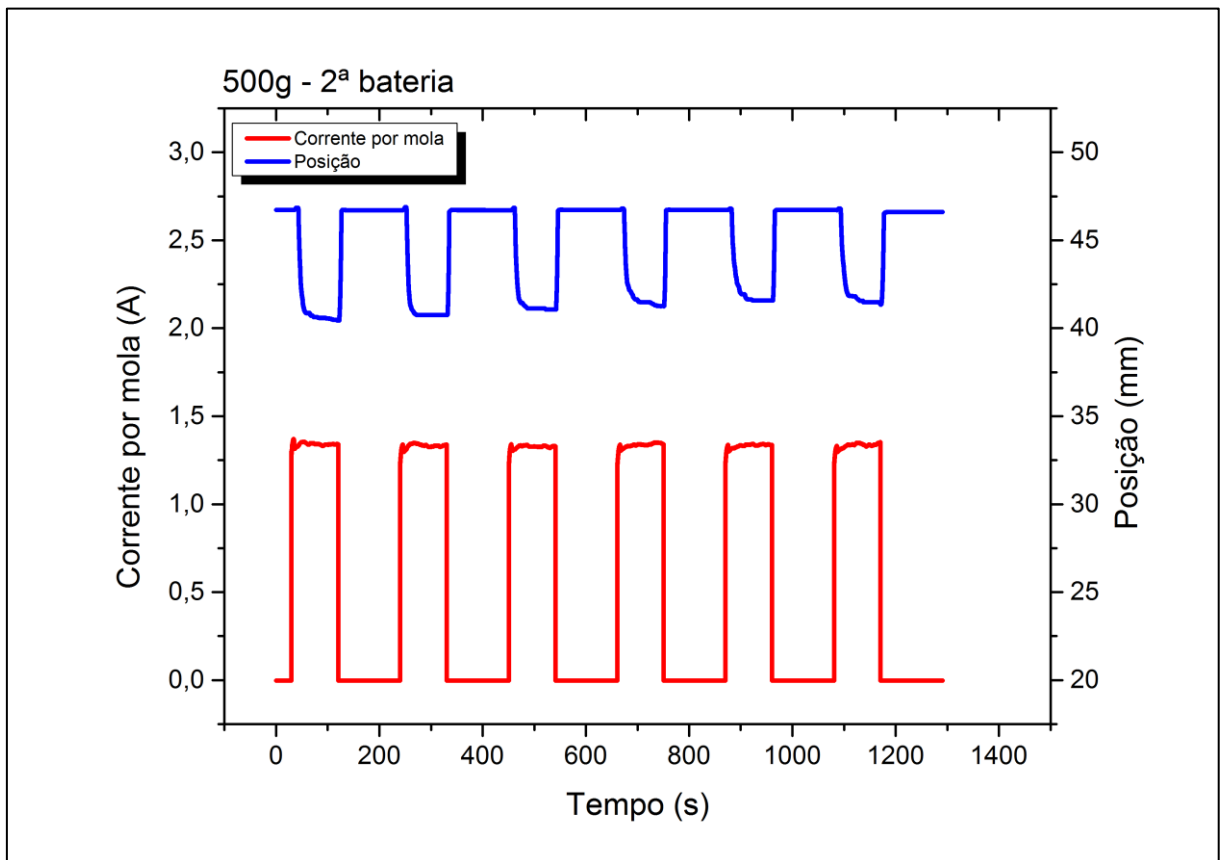


Figura 80: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 2ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.

6.3.9 – Teste com massa de 500,0 g e 2,5 A por mola

O último teste da bateria de 500 g teve resultados bastante semelhantes ao procedimento anterior, incluindo a leve perda de recuperação de forma nos ciclos finais. A corrente mais alta apenas acelerou as transformações de fase, visto que os patamares inferiores apresentaram certa estabilidade.

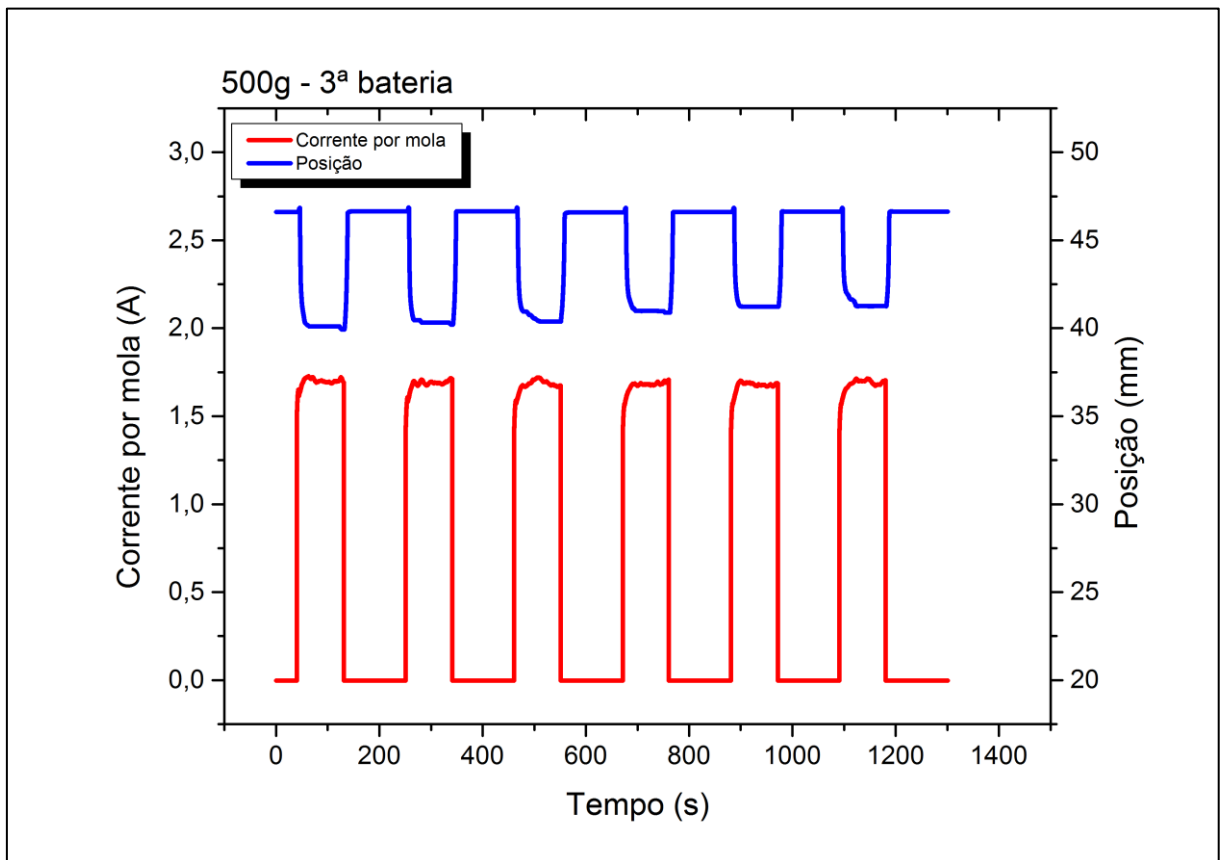


Figura 81: Gráfico da posição e da corrente elétrica para a 3ª bateria de testes com a massa de 500 g. Fonte própria.

6.3.10 – Resultados comparativos

A partir das curvas de posição, o deslocamento de cada ciclo de atuação pôde ser calculado. As Figuras 80, 81 e 82 mostram os gráficos que comparam esse parâmetro pelos ciclos de atuação para cada uma das faixas de corrente utilizadas, enquanto que as Tabelas 7, 8 e 9 mostram os devidos valores encontrados. Em geral, foi observada certa estabilidade, ou seja, o deslocamento não apresentou mudanças muito acentuadas entre os ciclos. A grande exceção é a faixa de 1,5A por mola da Figura 80, para o teste com 100g, onde o 1º ciclo apresentou um valor mais baixo em relação aos demais. Também foi observado que quanto mais intensa for a corrente, maior é a atuação e, portanto, maior o deslocamento. Contudo, para os testes de 100 g e 500 g (Figuras 80 e 82), não há diferença considerável entre as faixas de 2,0 A e 2,5 A por mola. Por fim, foi notado que as maiores massas provocam os menores desempenhos de atuação, o que já era esperado visto que o sistema tem uma carga superior a vencer.

Dando continuidade à análise dos resultados, os valores médios de todos os deslocamentos de atuação por ciclo foram calculados e compilados na Tabela 10. O objetivo esta tabela é comparar o deslocamento médio de atuação por massa a partir do gráfico mostrado pela Figura 83. Conforme já anteriormente dito, maiores valores de corrente elétrica correspondem a maiores respostas de atuação. Entretanto, apenas para a massa de 300g houve clara diferença entre as faixas de 2,0 e 2,5A, portanto, em linhas gerais, o consumo energético extra não vale tanto a pena, sendo então o valor de corrente intermediário o suficiente para acionar o sistema de forma satisfatória.

E por fim, como resultado final destes testes, foi feita a comparação da força exercida sobre a válvula pela coluna d'água com a força que as molas de SMA conseguiram suportar. Visto que houve resposta de atuação com 500 g e 2,0 A por cada mola, é cabível afirmar que as molas de fabricação própria são capazes de exercer uma força de pelo menos 0,5 Kgf, ou aproximadamente 5,0 N. Considerando que a força hidrostática calculada no Capítulo 4 tem valor de 4,8155 N, verifica-se que a configuração escolhida com as quatro molas atuando é capaz de suportar essa coluna d'água de 1,0 m de altura. Contudo, a análise dinâmica, feita tendo em mente o escoamento da água, resultou numa força maior de 9,63 N. Para comportar essa nova carga, o projeto da válvula teria que ser modificado ou ela teria que ser instalada de outra forma no encanamento da residência.

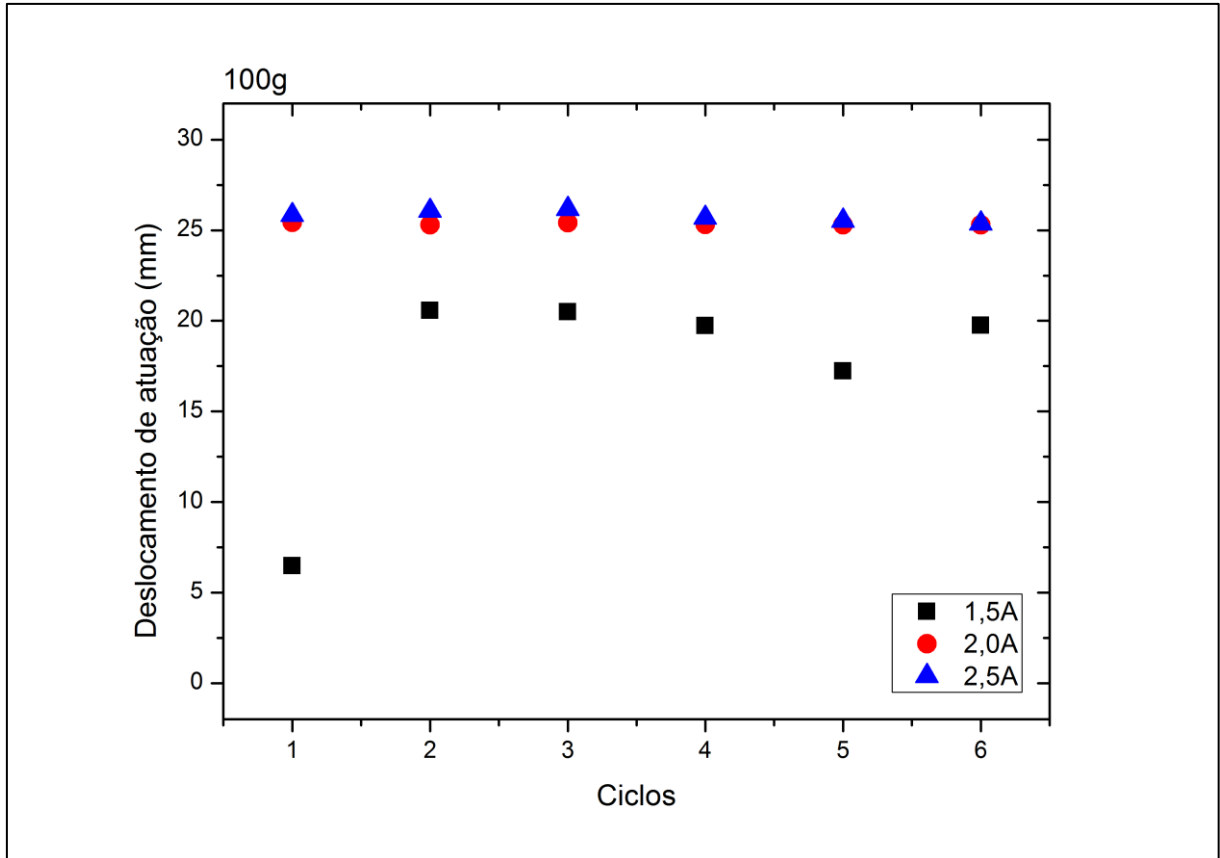


Figura 82: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 100 g. Fonte própria.

Tabela 7: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 100 g. Fonte própria.

Deslocamento de atuação (mm) – 100 g			
Ciclos	1,5 A	2,0 A	2,5 A
1	6,468	25,441	25,836
2	20,569	25,303	26,071
3	20,499	25,418	26,176
4	19,727	25,326	25,687
5	17,226	25,291	25,524
6	19,760	25,291	25,376

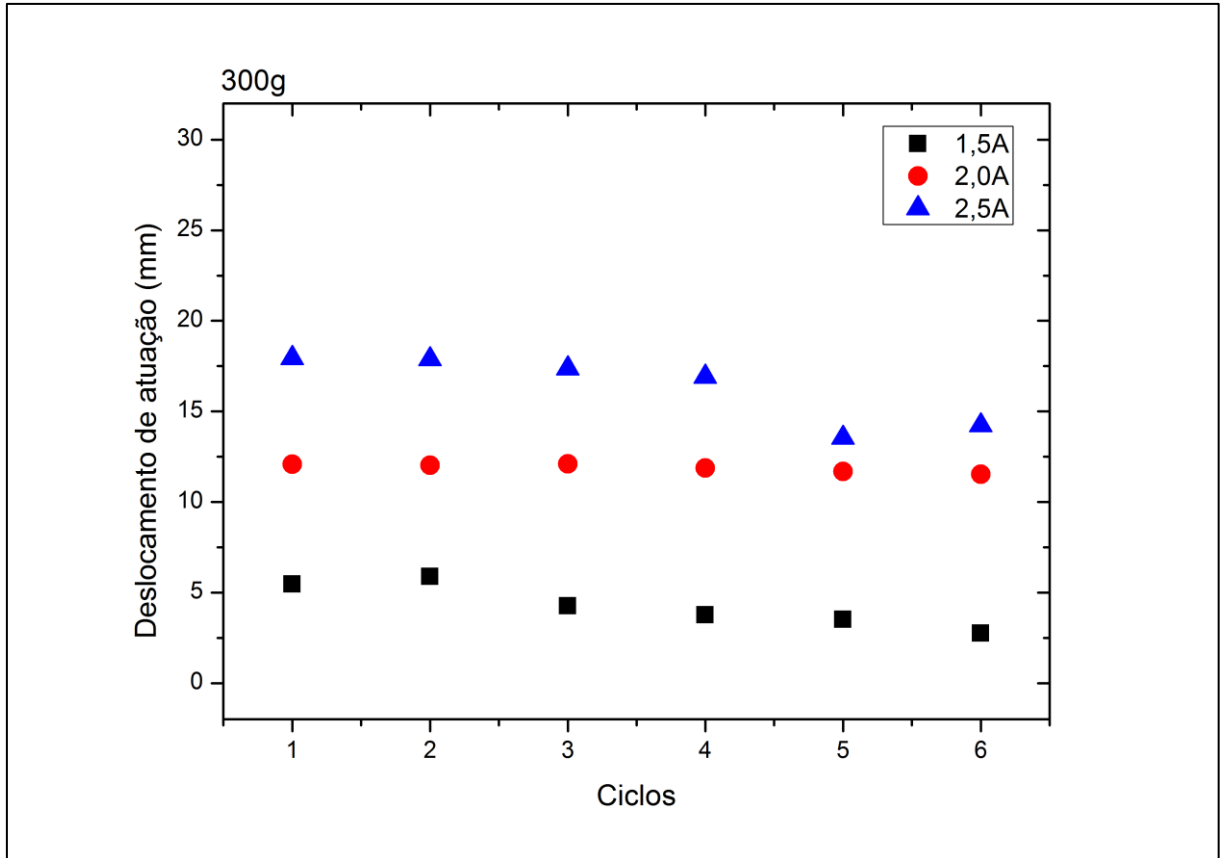


Figura 83: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 300 g. Fonte própria.

Tabela 8: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 300 g. Fonte própria.

Deslocamento de atuação (mm) – 300 g			
Ciclos	1,5 A	2,0 A	2,5 A
1	5,471	12,076	17,943
2	5,890	12,034	17,873
3	4,253	12,092	17,364
4	3,757	11,873	16,907
5	3,518	11,687	13,534
6	2,743	11,532	14,225

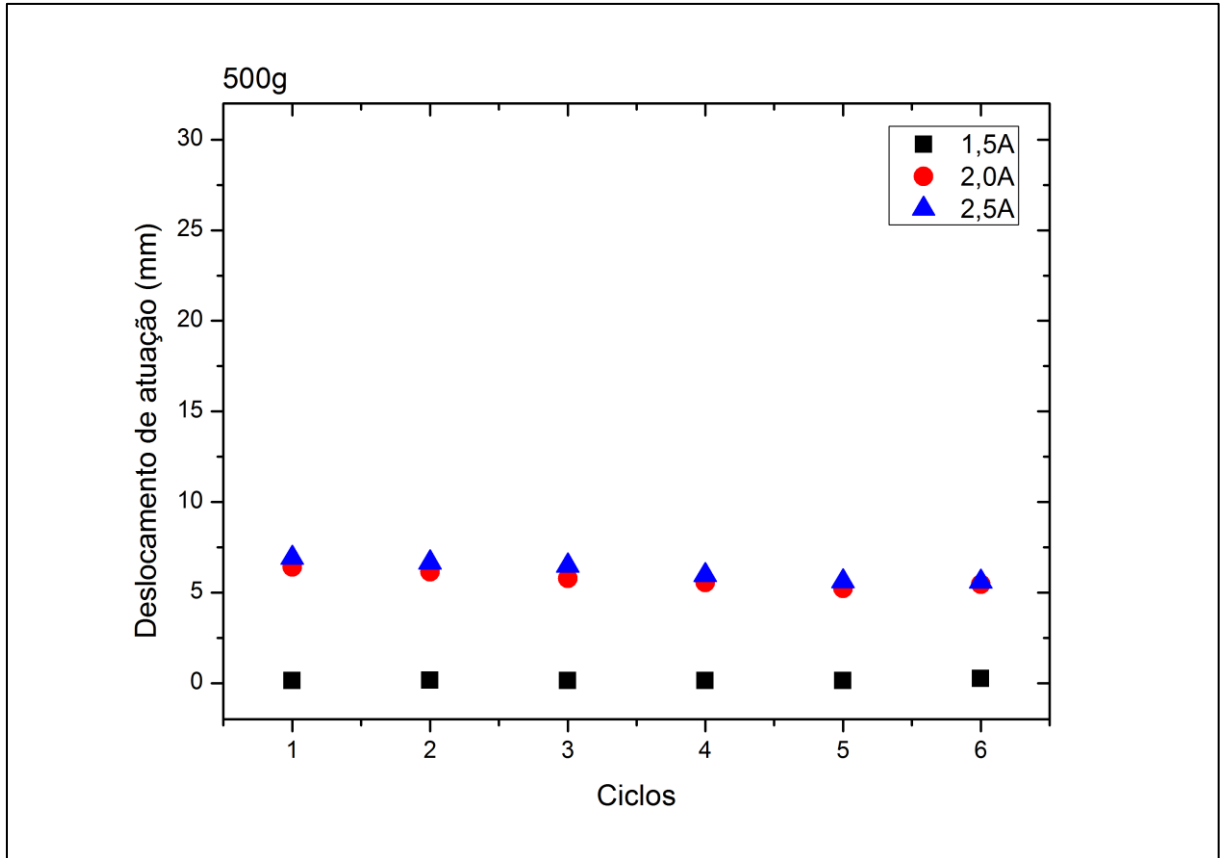


Figura 84: Gráfico do deslocamento de atuação pelo número de ciclos correspondente à massa de 500 g. Fonte própria.

Tabela 9: Deslocamento de atuação das baterias de teste com 500 g. Fonte própria.

Deslocamento de atuação (mm) – 500 g			
Ciclos	1,5 A	2,0 A	2,5 A
1	0,137	6,402	6,915
2	0,156	6,134	6,654
3	0,141	5,777	6,485
4	0,137	5,554	5,96
5	0,142	5,221	5,612
6	0,25	5,457	5,594

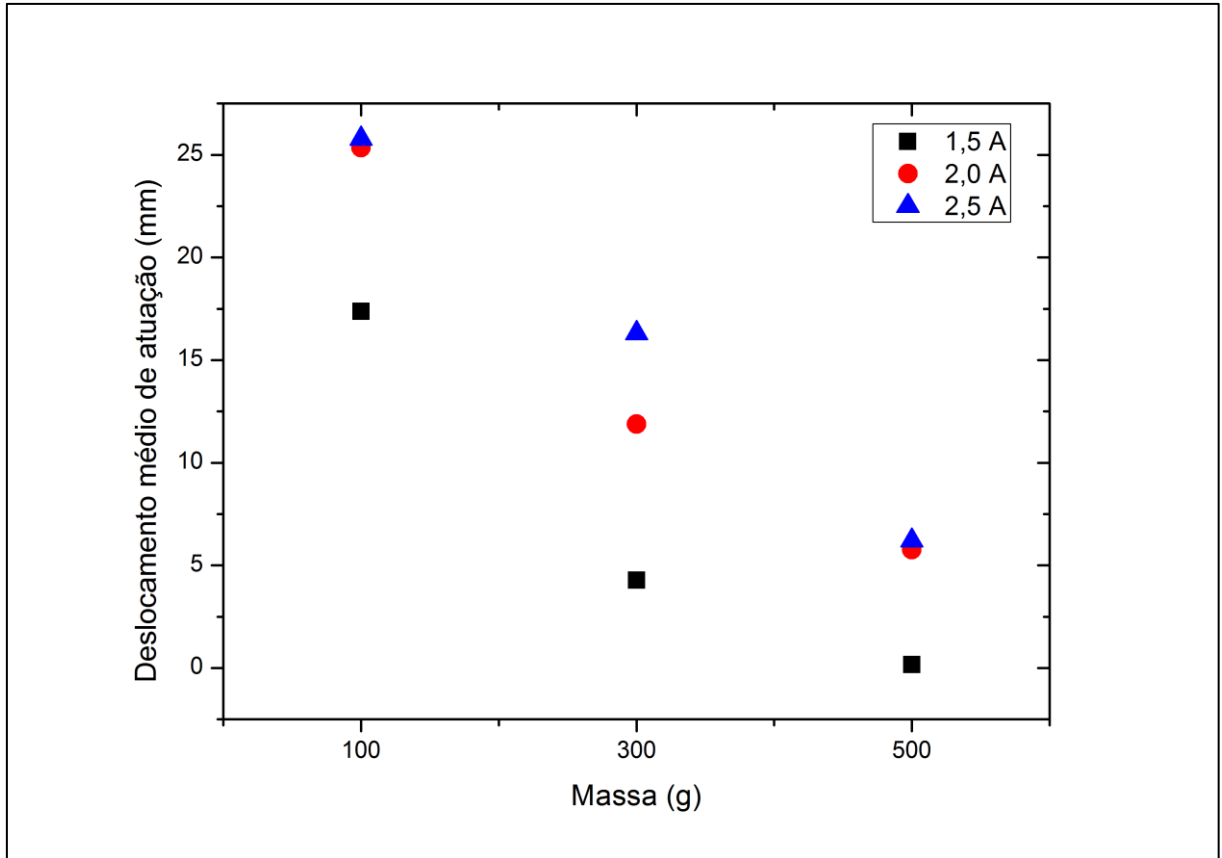


Figura 85: Gráfico do deslocamento médio de atuação pelas massas usadas nos testes. Fonte própria.

Tabela 10: Deslocamento médio dos ciclos de atuação. Fonte própria.

Deslocamento médio dos ciclos de atuação (mm)			
Massas	1,5 A	2,0 A	2,5 A
100 g	17,375	25,345	25,778
300 g	4,272	11,882	16,308
500 g	0,161	5,758	6,203

Capítulo 7

Conclusões

7.1 – Sobre o material utilizado

Na revisão bibliográfica foram vistos diversos exemplos de aplicação das ligas de memória de forma em diversos projetos de válvulas, cada uma delas exercendo um fim específico, seja para uso doméstico, industrial, para líquidos ou gases, para pequenas ou grandes vazões. Inspirados nestes projetos e seus respectivos autores, buscamos desenvolver uma válvula inteligente atuada por molas de SMA, sendo que nesta etapa do projeto nós as construímos a partir de um fio de Nitinol comercial, caracterizando tanto o fio quanto as molas nos ensaios de tração e análise térmica.

De início, houve certa preocupação quanto à rigidez do sistema, visto que a espessura do fio de memória de forma disponível não nos permitia fazer um sistema robusto, com apenas uma mola de SMA. Para contrapor essa questão, foi decidido o uso de diversas molas unidas em paralelo. O ensaio de tração da mola M4 nos permitiu ter uma ideia da rigidez, obtendo-se um valor experimental de 195,93 N/m a partir da curva do gráfico da força por deslocamento obtida.

Em relação à análise térmica, os resultados da mola M6 se mostraram bastante satisfatórios, visto que a transformação para a austenita inicia-se a 87,05 °C e termina a 104,81°C, faixa de temperatura que está muito acima do que é necessário para a aplicação residencial, mas que permitirá que a válvula controle o escoamento de água sobreaquecida ou vapor d'água, por exemplo. Além disso, com M_s e M_f respectivamente a 69,84 °C e 54,06 °C temos a certeza de que as molas apresentam estrutura martensítica em temperatura ambiente. O ensaio DSC do fio serviu como comparação, visto que seu A_s e A_f , 56,94 °C e 77,0 °C, respectivamente, são bem menores em relação aos valores correspondentes da mola de SMA. Atribui-se ao tratamento térmico a razão desse aumento na temperatura da transformação austenítica.

Já as baterias de testes com carga constante feitos com o auxílio do aparato experimental demonstraram que as molas de fabricação própria são capazes de gerar uma boa resposta de atuação, gerando deslocamentos de atuação satisfatórios mesmo suportando o peso de uma massa de 500g. Então a configuração da válvula proposta com quatro molas de

SMA é capaz de suportar a carga de uma coluna d'água de até 1,0 m de altura. Entretanto, a análise feita tendo em vista o escoamento do fluido resultou numa força de 9,63 N, a qual pode sobrecarregar a válvula e as molas. Nesse quesito, o projeto teria que ser modificado para comportar mais molas de fabricação própria ou o modo de instalação da válvula teria que ser alterado para que ela sofra menor requerimento.

Com isso, temos o início do projeto da válvula inteligente atuada por molas de SMA. Os materiais foram escolhidos, avaliados e caracterizados, as molas foram construídas e caracterizadas e os resultados obtidos sugerem que, apesar da espessura do fio empregado ser muito fina, o projeto é viável, porém para um protótipo com água quente, foi verificado que não há deslocamento necessário mesmo com utilização de água com aditivo a uma temperatura de 108°C, uma limitação do nosso material estudado que nos inviabiliza a construção da válvula funcional, mas nestas condições com as características verificadas no fio de SMA do presente experimento seria possível a confecção de uma válvula termostática de radiador veicular, visto que a pressão interna de um radiador é aproximadamente 1,5 bar o que confere a água uma temperatura de ebulição de aproximadamente 120°C, discutiremos sugestões para que se torne viável o projeto de uma válvula de controle de fluxo para um protótipo demonstrativo.

7.2 – Sugestões futuras

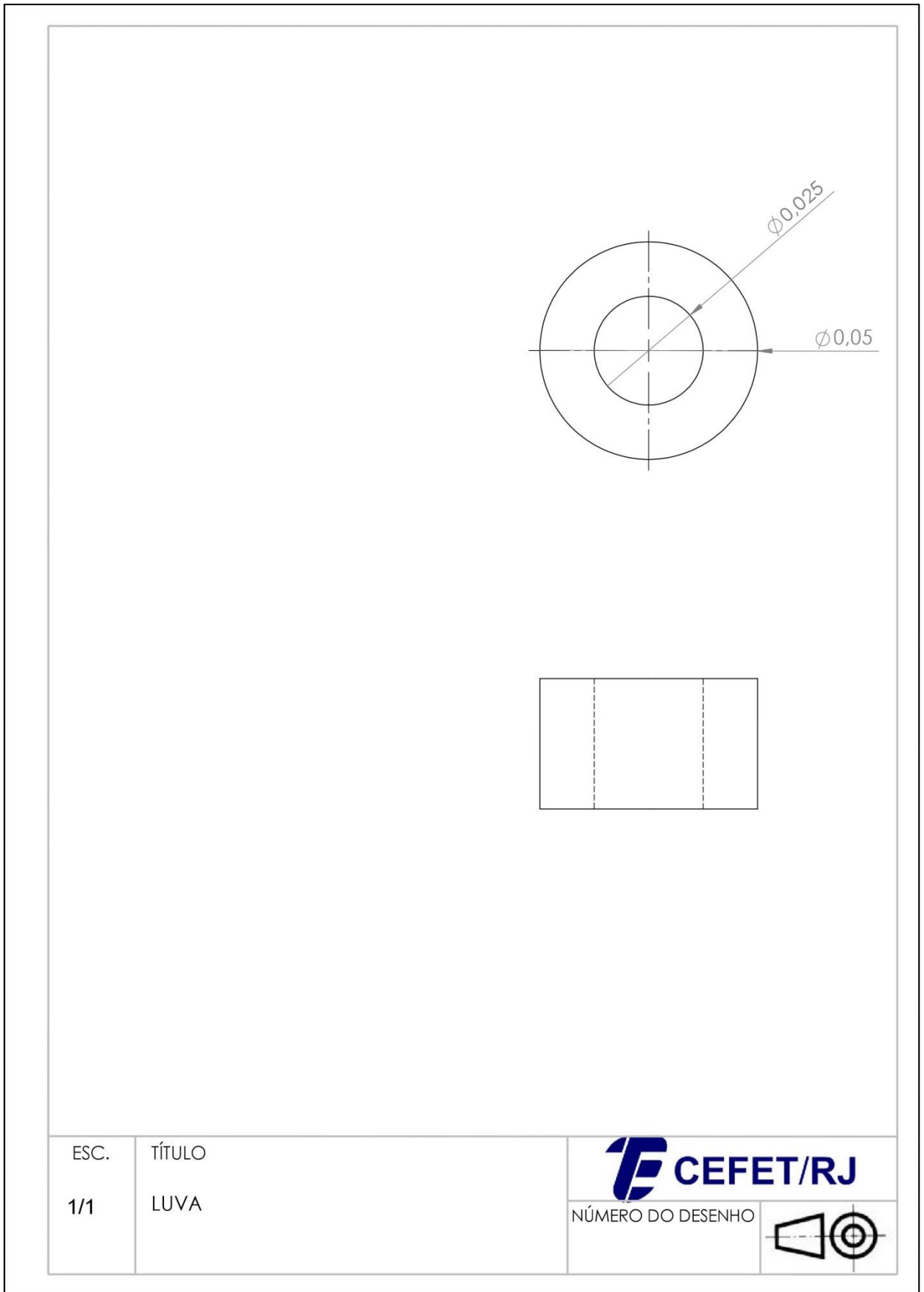
Para uma aplicação doméstica de uma válvula de controle de fluxo de água quente para chuveiro a gás, visando minimizar acidentes com adultos e crianças principalmente, é viável futuramente a utilização de um fio de SMA com uma temperatura A_f abaixo de 100°C, segue a sugestão de utilizar um fio cujo diâmetro seja maior que 0,5 mm para dar uma maior rigidez e uma força de atuação superior à verificada neste experimento. Outra sugestão seria a utilização de um atuador com fio de SMA de baixas temperaturas para substituir termostatos eletrônicos, que costumam possuir elevado custo. Mais sugestões bem interessantes são a realização de um estudo numérico do atuador, outro estudo sobre a influência do diâmetro do fio de Nitinol nas resistências à fadiga e à fluência e determinar a relação entre a temperatura do tratamento térmico com as temperaturas de mudança de fase cristalográfica.

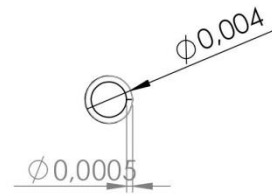
Estas possibilidades dependem de um estudo mais aprofundado sobre como a composição do material da liga de memória de forma influi nas temperaturas de mudança de fase e qual a influência da temperatura do tratamento térmico sobre as mesmas.



BIBLIOGRAFIA

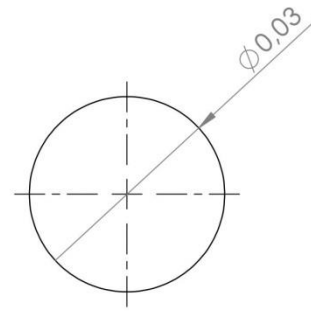
1. LAGOUDAS, D. C. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications**. College Station: Springer, 2008.
2. PRIYA, S.; INMAN, D. J. **Energy Harvesting Technologies**. [S.l.]: Springer, 2009.
3. RALIB, A. A. M.; NORDIN, A. N.; SALLEH, H. A comparative study on MEMS piezoelectric microgenerators. **Microsystem Technologies**, 16, 2010. 1673–1681.
4. MOHD, J. J. et al. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. **Materials and Design**, 2014.
5. RATHMANN, C.; REMMETZ, T.; KREIMEIER, D. Maintenance of Shape memory Actuator Systems - Applications, Processes and Business Models. **7th Industrial Production Service Systems Conference - PPS, industry transformation for sustainability and business**, 2015.
6. SILVA, L. L. et al. Experimental investigation of the influence of the heating rate in an SMA actuator performance. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2013.
7. MONTEIRO, P. C. C. et al. A comparative analysis of different shape memory alloy actuator configurations. **Journal of Intelligent Material Systems**, 2016. 1-13.
8. GUOA, Z. et al. Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2015. 71-80.
9. KLUSZCZYŃSKI, K.; KCIUK, M. SMA actuators: theory, performance curves and design problems. **COMPEL - The international journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering**, 32, 2013. 1417-1427.
10. NESPOLI, A. et al. The high potential of shape memory alloys in developing miniature mechanical devices: A review on shape memory alloy mini-actuators. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2010.
11. MAGRI, G.; ROMAGNOLI, M.; PERNA, C. D. SMA actuator for gas combi boiler diverting valve. **Sensors and Actuators A Physical**, 2006. 355-366.
12. GUI, L.; REN, C. L. Exploration and evaluation of embedded shape memory alloy (SMA) microvalves for high aspect ratio microchannels. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2011. 155-161.
13. MEGNIN, C.; BARTH, J.; KOHL, M. A bistable SMA microvalve for 3/2-way control. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2012. 285-291.
14. GRADIN, H. et al. SMA Microvalves for Very Large Gas Flow Control Manufactured Using Wafer-Level Eutectic Bonding. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 59, 2012.
15. PICCINI, M. E.; TOWE, B. C. A shape memory alloy microvalve with flow sensing. **Sensors and Actuators A: Physical**, 2006. 344-349.
16. SASSA, F. et al. Miniaturized shape memory alloy pumps for stepping microfluidic transport. **Sensors and Actuators B: Chemical**, 2012. 157-163.
17. SAGAR, S. N. K.; SREEKUMAR, M. Miniaturized Flexible Flow Pump using SMA Actuator. **Procedia Engineering**, 2013. 896-906.
18. TANIGUCHI, H. Flexible Artificial Muscle Actuator Using Coiled Shape Memory Alloy Wires. **APCBEE Procedia**, 2013. 54-59.
19. LIU, Y. et al. A TiNiPd thin film microvalve for high temperature applications. **Materials Science and Engineering A**, 2004. 205-209.

20. SHIN, D. D.; MOHANCHANDRA, K. P.; CARMAN, G. P. Development of hydraulic linear actuator using thin film SMA. **Sensors and Actuators A**, 2005. 151-156.
21. FURUKAWA ELECTRIC CO., LTD. Shape Memory Alloys & Super-elastic Alloys. **Furukawa Techno Material**. Disponível em: <<https://www.furukawa-ftm.com/english/nt-e/appli/juutaku.htm>>. Acesso em: 03 jun. 2017.
22. COSTANZA, G.; TATA, M. E.; CALISTI, C. Nitinol one-way shape memory springs: Thermomechanical characterization and actuator design. **Sensors and Actuators A: Physical**, 157, 2010. 113-117.
23. AZEVEDO, A. J. M. D. **Dispositivo para Análise de Fadiga em Fios com Memória de Forma Submetidos a Ciclos Termomecânicos**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2016.
24. HUANG, W. On the selection of shape memory alloys for actuators. **Materials and Design**, 2000. 11-19.
25. RIAGUSOFF, I. I. T. **Estudo de Dispositivos Pseudoelásticos para a Aplicação em Atenuadores de Vibração**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2012.
26. AGUIAR, R. A. A. D.; SAVI, M. A.; PACHECO, P. M. C. L. Experimental Investigation of Vibration Reduction Using Shape Memory Alloys. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, 24, 2013. 247-261.
27. CHEN, L. P.; SI, N. C. Influence of thermomechanical training deformations on TWSME in TiNiCu alloy spring. **Journal of Alloys and Compounds**, 2008. 219-222.
28. DYNALLOY INC. Tech Sheets. **DYNALLOY, Inc. Makers of Dynamic Alloys**. Disponível em: <http://www.dynalloy.com/tech_sheets.php>. Acesso em: 19 Abril 2017.
29. TERÇO, H. **Caracterização de um fio de Memória de Forma para a aplicação em projeto de mão robótica**. Rio de Janeiro: CEFET/RJ, 2016.
30. BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley: projeto de engenharia mecânica**. 8ª. ed. [S.l.]: McGraw Hill; AMGH Editora Ltda, 2011.

APÊNDICE A: Desenhos técnicos do projeto da válvula inteligente



ESC.	TÍTULO		NÚMERO DO DESENHO	
1/1	Mola de SMA			



ESC.

TÍTULO

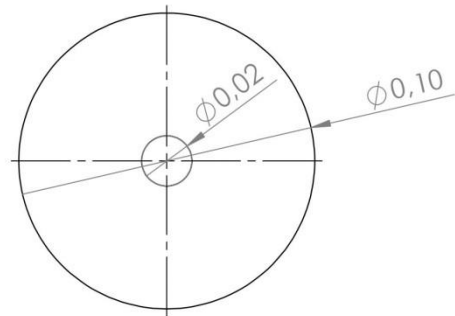
1/1

Tampão

 **CEFET/RJ**

NÚMERO DO DESENHO





ESC.	TÍTULO	
1/1	Travamento	