

**ESCOLA NAVAL**

**DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DA CLASSE ENGENHEIROS  
NAVAIS RAMO DE MECÂNICA**



**CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE  
PROPULSÃO SUBMARINO RECORRENDO A LIGAS COM  
MEMÓRIA DE FORMA**

**ASPOF EN-MEC**

Adriano Ernesto Loureiro Augusto

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS MILITARES  
NAVAIS**

**ENGENHARIA NAVAL - RAMO DE MECÂNICA**

2013

# ESCOLA NAVAL



DEPARTAMENTO DE FORMAÇÃO DA CLASSE ENGENHEIROS  
NAVAIS RAMO DE MECÂNICA

## CONSTRUÇÃO DE UM PROTÓTIPO DE UM SISTEMA DE PROPULSÃO SUBMARINO RECORRENDO A LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

*O Mestrando,*

ASPOF EN-MEC Adriano Ernesto Loureiro Augusto

*O Orientador,*

Professor Doutor Francisco Manuel Braz Fernandes

O Mestrando,

O Orientador

---

ASPOF EN-MEC  
Loureiro Augusto

---

Professor Doutor  
Braz Fernandes



## **Agradecimentos**

A concretização desta dissertação, de forma mais ou menos direta, teve o apoio de muitas pessoas. Pessoas estas que não poderia deixar de demonstrar, no mínimo, o reconhecimento pelo apoio prestado.

Primeiramente, ao Sr. Professor Doutor Braz Fernandes pela disponibilidade para orientar a minha dissertação, pelo apoio dado na obtenção de conhecimentos na área de materiais e pelas vastas sugestões que melhoraram em muito este trabalho. É a ele que se deve todo o trabalho de ensaios termomecânicos e parte da investigação bibliográfica.

Ao João Pedro Oliveira pelo tempo disponibilizado, pela ajuda prestada na realização dos ensaios termomecânicos e pela prontidão demonstrada para instruir e aconselhar quando necessário.

À FCT-UNL e ao Presidente do Departamento de Ciência dos Materiais Professor Catedrático Rodrigo Ferrão de Paiva Martins a disponibilização das instalações do CENIMAT, bem como dos seus equipamentos que possibilitaram a realização dos diversos ensaios necessários a esta dissertação.

À ETNA e ao DPE pelos conhecimentos transmitidos sobre autómatos e a disponibilização das oficinas.

Ao Engenheiro Manuel Lima que foi uma ajuda preciosa na conceção da estrutura do protótipo assim como o fornecimento da grande maioria do material da estrutura.

Ao Sargento ETI Gonçalves Gertrudes pelo apoio dado na montagem do circuito elétrico do protótipo.

Ao Chefe de Departamento de Engenharia Mecânica da Escola Naval Engenheiro Capitão-de-Fragata Carmo Limpinho pelo apoio e compreensão demonstrado durante este ano letivo por si complicado. Mas também pelo apoio financeiro dado à realização desta dissertação.

Finalmente, não posso deixar de agradecer aos meus camaradas de curso que me acompanharam durante estes cinco anos e contribuíram com sugestões para este trabalho. A Maria Oliveira que sempre me apoiou e contribuiu para as correções de português. Aos meus Pais e Irmão por compreenderem a minha falta de tempo e pelo apoio demonstrado. A todos devo a concretização deste trabalho.

## Resumo

As ligas com memória tais como a liga Ni-Ti e Ni-Ti-X revelam excelentes características de resistência à corrosão em meio aquático e conseguem gerar forças superiores quando comparados com atuadores de natureza diferente mas de dimensões idênticas. Os arames destas ligas, quando devidamente educados, permitem um comportamento que em muito se assemelha ao comportamento de um músculo biológico.

Entre muitas áreas de pesquisa, a aplicabilidade de atuadores de ligas com memória de forma para propulsão de veículos subaquáticos autônomos (AUV's) tem sido discutida de forma ativa nas últimas décadas.

Desta forma este trabalho pretende ser mais um contributo para esse estudo através de ensaios de molas de Ni-Ti, construção de um protótipo de uma estrutura de barbatana e análise do seu comportamento.

O trabalho descreve os ensaios termomecânicos realizados para determinar as características de molas de Ni-Ti de 8 espiras com 5 mm de diâmetro e arame de 0,8 mm de diâmetro. Consistiu ainda na conceção de uma estrutura *biomimética* de uma barbatana caudal de um peixe com 3 segmentos independentes com recurso a uma “coluna vertebral” em forma de mola. A indução de alteração da forma da estrutura foi permitida pela colocação das molas de Ni-Ti nas “vértebras”, quatro por segmento e aquecidos aos pares de forma antagónica e arrefecimento realizado por convecção forçada.

Os resultados obtidos mostraram o desenvolvimento de força elevada e sem emissão de ruídos, frequência de oscilação da barbatana inferior ao necessário (com ar como meio de permuta térmica) e consumos energéticos muito elevados.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma; protótipo de sistema de propulsão; Ni-Ti; ensaios de tração.

## **Abstract**

Memory alloys such as Ni-Ti and Ni-Ti-X show excellent characteristics of corrosion resistance in water and can generate higher forces compared with actuators of different nature with equal dimensions and mass. The wires of these alloys, when properly educated, allow a behavior very similar to the behavior of a biological muscle.

One of the many areas of research, the applicability of actuators with shape memory alloys dedicated to propulsion of autonomous underwater vehicles (AUV's) has been actively discussed in the recent decades.

Thus, this work aims to be a contribution to this study by testing springs Ni-Ti, building a prototype of a fin structure and analysis of their behavior. The paper describes the thermo mechanical tests conducted to determine the characteristics of Ni-Ti springs. It was also conducted a construction of a prototype of a biomimetic structure of a tail fin of a fish with three independent segments using a central shaped spring "spine". The induced change in shape of the structure was allowed by placing the Ni-Ti springs on "vertebrae," 2 pairs per segments heated antagonistically. The cooling of the Ni-Ti is perform by 3 computer fans.

The results show the development of high strength and no noise emission, the oscillation frequency of the fin below the requirements (with air as the thermal transfer medium) and very high energy consumption.

Keywords: shape memory alloys; prototype propulsion system, Ni-Ti, tensile tests.

## **Glossário de acrónimos**

AUV – (*Autonomous Undersea Vehicle*) Veículo Subaquático Autônomo

CENIMAT – Centro de Investigação de Materiais

DARPA - Agência de Projetos de Pesquisa Avançada de Defesa

DPE – Departamento de Propulsão e Energia

DRX – Difração de raios-X

DSC – Calorimetria Diferencial de Varrimento

EMF – Efeito de Memória de Forma

EN – Escola Naval

ETI – Eletrotécnico de informática

ETNA – Escola de Tecnologias Navais da Armada

FCT-UNL – Faculdade de Ciências e Tecnologias

LMF – Ligas com Memória de Forma

MATF – Máquinas Avante Toda a Força

SSN – Submarino nuclear de ataque

*SW2013 – Solidworks 2013*

## Nomenclatura

$A_f$  – temperatura de fim da transformação fase austenítica;

$A_s$  – temperatura de início da transformação austenítica;

$D$  – diâmetro da mola;

$d$  – diâmetro do arame;

$F$  – Força;

$I$  – corrente elétrica;

$M$  – momento;

$M_d$  – temperatura máxima a que pode ocorrer indução mecânica de martensite;

$M_f$  – temperatura de fim da transformação martensítica.

$M_s$  – temperatura de início da transformação martensítica;

$P$  – força na mola

$R_f$  – temperatura de fim da formação da fase-R;

$R_s$  – temperatura de início da formação da fase-R (estrutura romboédrica);

$T_0$  – temperatura crítica de início da transformação martensítica

$V$  – diferença de potencial elétrico;

$\varepsilon$  – deformação

$\Omega$  - ohm (resistência elétrica)

# Índice de Matérias

Agradecimentos .....	I
Resumo .....	II
Abstract .....	III
Glossário de acrónimos .....	IV
Nomenclatura .....	V
Índice de Matérias .....	VI
Índice de Figuras .....	VIII
Lista de Tabelas .....	XII
Objetivos .....	1
Estrutura da Tese .....	2
1. Introdução .....	3
2. Enquadramento teórico .....	5
2.1. Ligas com memória de forma .....	6
2.1.1 Ligas Ni-Ti com EMF .....	7
2.1.2 Estruturas da liga de Ni-Ti com EMF .....	8
2.1.3 Transformações austenite $\leftrightarrow$ martensite .....	10
2.2. Atuadores de ligas com memória de forma .....	16
2.2.1 Formas de aquecimento das LMF .....	21
2.3. Caracterização de uma liga com EMF .....	21
2.4. Modelação de uma Mola de Ni-Ti .....	23
2.4.1 Dimensionamento da mola de Ni-Ti .....	23
3. Materiais e métodos. ....	30
3.1. Materiais .....	31
3.2. Métodos Experimentais .....	32
3.2.1 Ensaio Termomecânicos .....	32
3.2.2 Dimensionamento e construção da estrutura da barbatana. ....	37
	VI
Construção de um protótipo de um sistema de propulsão submarino recorrendo a ligas com memória de forma.	

3.2.3	Sistema de arrefecimento.....	43
3.2.4	Construção e teste do circuito elétrico. ....	43
3.2.5	Caracterização da resposta mecânica de um segmento. ....	48
4.	Resultados e discussão de resultados.....	49
4.1.	Caracterização termomecânica das molas Ni-Ti. ....	49
4.1.1	Análise DSC de uma mola (nova) .....	49
4.1.2	Análise de resultados do ensaio DSC.....	50
4.2.	Ensaio Mecânicos com travessão da máquina de tração fixo .....	50
4.2.1	Arrefecimento passivo .....	50
4.2.2	Arrefecimento ativo.....	55
4.2.3	Discussão de resultados dos ensaios mecânicos com travessão da máquina de tração fixo .....	57
4.2.4	Ensaio de Fadiga.....	60
4.2.5	Ensaio de tração.....	66
4.2.6	Discussão de resultados dos ensaios de tração.....	68
4.3.	Ensaio DSC de uma mola após utilização .....	69
4.3.1	Discussão de resultados dos ensaios DSC .....	70
4.3.2	Modelação de Mola de Ni-Ti.....	70
4.3.3	Caracterização do comportamento da barbatana. ....	74
5.	Conclusões e proposta para desenvolvimentos futuros .....	75
5.1.	Conclusões.....	75
5.1.1	Caracterização da mola de liga Ni-Ti .....	75
5.1.2	Programa Excel de modelação de atuadores Ni-Ti .....	76
5.1.3	Protótipo de barbatana .....	76
6.	Bibliografia.....	77
7.	ANEXOS.....	79
7.1.	Anexo A .....	79
7.2.	Anexo B .....	82
7.3.	Anexo C .....	85
7.4.	Anexo D.....	89

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Ilustração de transformação de fase da liga Ni-Ti (Huang, 1998). .....	8
Figura 2.2 - Transformações martensítica (a) Transformação de B2 para B19', (b) transformação B2 para R para B19' e (c) diversas transformações martensíticas com as diversas fases intermédias (Otsuka e Ren, 2005). .....	9
Figura 2.3 – Diagrama de equilíbrio da liga Ni-Ti. (Fernandes, 2013).....	10
Figura 2.4 – Variação da extensão com a temperatura ao longo das transformações de fase sujeita a força constante (Fernandes, 2013). .....	11
Figura 2.5 – Ilustração de transformações de fase. (a) Fase austenítica após o aquecimento, (b) fase martensítica com a forma macroscópica da austenite, (c) fase martensítica auto-acomodante após deformação mecânica (Fernandes, 2013). .....	12
Figura 2.6 - Transformações martensítica (a) Transformação de B2 para B19' e (b) transformação B2 para R para B19' (Otsuka e Ren, 2005). .....	13
Figura 2.7 – Representação gráfica do fenómeno de memória de forma, de superelasticidade e de escorregamento de deslocações na fase austenítica (Fernandes, 2013). .....	13
Figura 2.8 - Efeito da reorientação da martensite no desenvolvimento do EMF duplo, (Ni-50,0Ti recozido a 938K durante meia hora) (Otsuka e Ren, 2005). .....	14
Figura 2.9 – Esquema da relação entre a tensão e temperatura em que está representada a zona de memória de forma e a zona de superelasticidade (Otsuka e Ren, 2005). .....	15
Figura 2.10 – Esquema simplificado de diversos tipos de atuadores: (a) atuador com retorno por força externa ao atuador ou de simples efeito; (b) Atuador de retorno por mola; (c) atuador de retorno por atuador antagónico (Huang, 1998). .....	17
Figura 2.11 - Comparação das características de atuadores térmicos. (a) Curva de Temperatura em função da deflexão de um bimetal e uma liga com memória de forma. (b) curva de temperatura em relação à força/massa para atuadores com memória de forma e de cera (Ohkata e Suzuki, 2008). .....	18
Figura 2.12 – Relação entre a força e o peso de diversos atuadores (Otsuka e Ren, 2005). ...	18
Figura 2.13 - Ensaio DSC realizado sobre uma película fina de Ni-Ti obtida por pulverização catódica (Fernandes, 2013). .....	22
Figura 2.14 – Efeito da temperatura de recozimento na resistividade do Ni – 51 at %Ti (Jackson <i>et al.</i> , 1972). .....	22
Figura 2.15 - Variação da intensidade difratada com a temperatura para películas finas de Ni-Ti obtidas por evaporação térmica (Fernandes, 2013). .....	23
Figura 2.16 – Gráfico de modelação de molas Ni-Ti para obtenção do valor de índice de mola. (Ohkata e Suzuki, 2008 ) .....	26
Figura 2.17 – Ilustração de três métodos díspares para determinar a relação entre a carga e a deflexão da mola de Ni-Ti. (A) Gráfico de correlação de Carga e deflexão a temperatura constante; (B) Gráfico de correlação de Temperatura e deflexão; (C) Gráfico de	

correlação de temperatura e carga com deflexão da mola constante (Ohkata e Suzuki, 2008).....	26
Figura 2.18 – Atuador de duplo efeito com mola de retorno. (a) Curso de trabalho do atuador. (b) Tensão aplicada na mola de Ni-Ti em função da extensão da mola. (Ohkata e Suzuki, 2008 ) .....	27
Figura 2.19 – Gráfico Tensão de corte em função da distorção por corte para a modelação de um atuador de duplo efeito. (Ohkata e Suzuki, 2008 ) .....	27
Figura 2.20 – Influência da dureza da mola de retorno no curso de um atuador. (a) Gráfico de carga em função da extensão da mola de Ni-Ti e temperatura a que se encontra. (b) gráfico de extensão de mola de Ni-Ti em função da temperatura sujeita a 2 molas de retorno diferentes. ....	29
Figura 3.1 – Fluxograma da metodologia para a realização do projeto.....	30
Figura 3.2 – Equipamento DSC 204 F1 Phoenix do CENIMAT da FCT.....	33
Figura 3.3 – Ensaio realizado na máquina de tração SHIMADZU Autograph AG-G Séries no CENIMAT da FCT 1) mola em teste; 2) temporizador de corrente; 3) fonte de corrente; 4) termo ventilador. ....	35
Figura 3.4 - Mola de Ni-Ti com memória de forma do atuador .....	36
Figura 3.5 – Atuador com liga com memória de forma. (1) mola de Ni-Ti; (2) mola de aço; (3) tirante. ....	36
Figura 3.6 – Estrutura 1, SW2013.....	38
Figura 3.7 – Estrutura 2, SW2013.....	38
Figura 3.8 – Fases da construção da estrutura; a) mola da estrutura com os cilindros para fixar a estrutura c); b) chapa cortada com a marcação dos portos de furação; c) chapa b) furada e quinada para estrutura “U” .....	41
Figura 3.9 – Estrutura “U” dos segmentos, SW2013. ....	41
Figura 3.10 - Estrutura após montagem. ....	42
Figura 3.11 – Tensor realizado em SW2013. ....	42
Figura 3.12 – Pórtico, SW2013. ....	43
Figura 3.13 – Estrutura de suporte para as ventoinhas. A esquerda em desenho SW2013 e à direita após construção. ....	43
Figura 3.14 – Autómato <i>Siemens</i> .....	45
Figura 3.15 – Esquema da numeração dos atuadores .....	46
Figura 3.16 – Programa de controlo da temporização e abertura do sinal elétrico para os atuadores da barbatana. ....	47
Figura 3.17 – Programa de controlo do atuador durante os ensaios de tração. ....	47
Figura 4.1– Resultados de ensaios DSC realizados sobre uma mola nova, antes de ser submetida a qualquer ciclo térmico ou mecânico: Termogramas e curvas derivadas para o ciclo de arrefecimento (azul) e para o aquecimento (vermelho). ....	49
Figura 4.2 – Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (10 mm), atuador e modelador. ....	51

Figura 4.3 - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e 1,5 A.....	51
Figura 4.4 - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e modelador.....	52
Figura 4.5 - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e modelador.....	52
Figura 4.6 - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (17,5 mm), atuador e modelador com 2,2 A.....	53
Figura 4.7 – Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (12,5 mm) mola de Ni-Ti nova descarnada 12,5 mm com 3,1 A.....	53
Figura 4.8 - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (17,5 mm) com mola de Ni-Ti nova descarnada, 2,2 A e modelador, com 90 s de aquecimento e 90 de arrefecimento.....	54
Figura 4.9 – Série de dados obtidos na máquina com travessão fixo (17,5 mm) de tração com mola de Ni-Ti descarnada, arrefecimento forçado, modelador e 3,6 A.....	54
Figura 4.10 – Gráfico de ensaio na máquina de tração. Comparação de ensaios executados através de modulador, sem cobertura, distensão da mola de 15 mm com travessão fixo e intensidades de 2,2 e 2,5 A com arrefecimento passivo.....	55
Figura 4.11 – Gráfico obtido no teste de travessão fixo com mola de Ni-Ti descarnada, 12,5 mm de distensão da mola e corrente de 3,1 A e 3,6 A com arrefecimento ativo.....	56
Figura 4.12 – Gráfico comparativo de ensaio de travessão fixo (15 mm), executado com modulador, sem cobertura e intensidades de 2,5, 2,8 e 3,1 A com arrefecimento forçado.....	56
Figura 4.13 – Comparação da perda de força dos primeiros ciclos dos ensaios da Figura 4.11 e Figura 4.16 correspondentes a diferentes extensões, respetivamente 12,5 mm e 15 mm.....	57
Figura 4.14 - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 1000 ciclos de trabalho com intensidade de corrente de 3,6 A durante 55 s e um período de 80 s por ciclo (12,5 mm de distensão da mola) sem cobertura com arrefecimento forçado.....	61
Figura 4.15 – Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 378 ciclos de trabalho sujeita a uma intensidade de corrente de 2,2A durante 90 s e um período de 190 s (15 mm) sem cobertura.....	62
Figura 4.16 - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 1200 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 3,6 A com ciclos de 40 s ON e 25 s OFF (15 mm) com arrefecimento forçado.....	63
Figura 4.17 - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 450 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 2,2 A durante 90 s e um período de 180 s por ciclo (17,5 mm) sem cobertura.....	64

Figura 4.18 - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 220 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 3,6 A durante 55 s e um período de 110 s por ciclo (17,5 mm) sem cobertura com arrefecimento ativo.....	65
Figura 4.19 – Força da Mola de Ni-Ti antes e após ensaio (a força inferior corresponde à força após ciclagem).....	65
Figura 4.20 – Gráfico de resultados obtidos no teste de tração de extensão variável para 2,2 A, 2,8 A, 3,1 A e 3,6 A.....	66
Figura 4.21 – Evolução da força com a intensidade de corrente.....	67
No decorrer destes ensaios verificou-se a correspondência entre a força máxima do atuador e a corrente, assim como a correlação da força com a distensão da mola de Ni-Ti. Como se verificou na Figura 4.22, o aumento da força máxima com a intensidade tem tendência para estabilizar aproximadamente nos 35 N.....	68
Figura 4.23 – Deformação não recuperável obtido em cada ensaio em função da Corrente, dados originados dos gráficos em anexo (B).....	68
Figura 4.24 – Comparação dos resultados DSC obtidos com uma mola nova e uma mola com cerca de 1000 ciclos térmicos.....	69
Figura 4.25 – Relação do $k.C^3$ com o índice de mola (Ohkata & Suzuki, 2008 ). .....	73
Figura 7.1 – Gráfico de resultados obtidos no teste de tração de extensão variável para 2,2 A e 3,6 A.....	82
Figura 7.2 – Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 2,2 A.....	82
Figura 7.3 - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 2,8 A.....	83
Figura 7.4 - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 3,1 A.....	83
Figura 7.5 - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 3,6 A.....	84
Figura 7.6 – Protótipo de estrutura de barbatana para propulsão submarina.....	89

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Propriedades das ligas Ni-Ti com memória de forma (Fernandes, 2013) .....	7
Tabela 2.2 – Propriedades dos arames de Ni-Ti em função do seu diâmetro (Dinalloy.Inc, 2012). .....	20
Tabela 2.3 – Parâmetros de ligas com memória de forma de base Ni-Ti (Ohkata e Suzuki, 2008). .....	25
Tabela 3.1 – Mapa de testes de medição de força com travessão fixo. ....	34
Tabela 3.2 – Tabela de Forças e ângulos de deformação para um segmento da barbatana. ....	48
Tabela 4.1 – Temperaturas de transformação da mola nova (tal como recebida) .....	49
Tabela 4.2 – Comparação de dados dos ensaios com travessão fixo .....	60
Tabela 4.3 – Equações das linhas de tendências. ....	67
Tabela 4.4 – Legenda das tabelas Excel. ....	72
Tabela 4.5 – Tabela de dimensionamento da mola de Ni-Ti. ....	72
Tabela 4.6 – Tabela de limitação do diâmetro. ....	72
Tabela 4.7 – Tabela de construção de atuador de duplo efeito com retorno por mola. ....	73
Tabela 4.8 - Tempos mínimos de atuação da barbatana .....	74
Tabela 7.1 – Dados retirados de todos os ensaios realizados com atuador completo e arrefecimento passivo. ....	79
Tabela 7.2 – Dados de ensaios sem cobertura e arrefecimento passivo. ....	80
Tabela 7.3 – Dados de todos os ensaios sem cobertura e com arrefecimento ativo .....	80
Tabela 7.4 – Dados de todos os ensaios de fadiga <sup>1</sup> .....	81
Tabela 7.5 – Propriedades do material da estrutura .....	85
Tabela 7.6 – Carga aplicada na estrutura .....	85
Tabela 7.7 – Concentração de tensões na peça .....	87
Tabela 7.8 – Deformações verificadas na peça .....	88

## Objetivos

O sistema de propulsão dos submarinos é um elevado emissor de ruído, por esse motivo, desde o início da expansão dos meios de deteção subaquáticos, durante a Segunda Guerra Mundial, tais como o sonar ativo e passivo, houve uma preocupação em desenvolver sistemas de propulsão cada vez mais silenciosos.

O principal objetivo desta dissertação consistiu em analisar a possibilidade de se adaptar um sistema de propulsão de funcionamento ondulatório, inspirado na barbatana caudal de um peixe, com auxílio de atuadores com ligas com memória de forma. Este sistema de extrema complexidade, mas de elevada eficiência, desenvolvido ao longo de milhões de anos tem sido estudado numa tentativa de obter um sistema de propulsão que desenvolva uma eficiência idêntica.

Na introdução deste sistema optou-se por produzir trabalho recorrendo à tecnologia de ponta do efeito de memória de forma das ligas de titânio. O uso destes atuadores permite reduzir ainda mais o ruído da propulsão.

Os materiais com memória de forma, por serem muito diferentes dos atuadores convencionais, precisam de ser ainda muito estudados para poderem ser aplicados de forma económica e tecnicamente viáveis nas nossas aplicações do dia-a-dia. Este trabalho foi direcionado para as ligas de Níquel-Titânio pelo simples facto de ser o material com melhores características de memória de forma aplicáveis a este sistema comercializado.

O estudo dos materiais com memória de forma irá no sentido de alterar os parâmetros possíveis da mola de Ni-Ti do atuador sempre tendo em conta que temos uma dada liga com memória de forma com um determinado tratamento mas que não pretendemos alterar. Com esse atuador visamos obter determinadas características, mas sempre sem sintetizar o seu tratamento termomecânico. A alteração das características, tais como a frequência do movimento, força gerada pelos atuadores e amplitude do movimento, estão na origem de alterações das características físicas da mola de Ni-Ti, da mola de retorno, da temporização dos períodos de abertura e fecho do circuito elétrico e da intensidade da corrente.

Espera-se no fim de este trabalho:

- Caracterizar termo mecanicamente as molas de Ni-Ti.
- Produzir um protótipo de uma estrutura de barbatana caudal de um peixe.
- Caracterizar o comportamento da estrutura da barbatana caudal.

## **Estrutura da Tese**

Ambicionando estruturar da melhor forma, este trabalho está dividido em 7 capítulos: “Introdução”, “Atuadores Mecânicos”, “Materiais e métodos”, “Resultados e discussão de resultados”, “Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros” e “Bibliografia”.

Na Introdução são dados a conhecer os veículos submarinos, a sua evolução histórica, os diferentes meios de propulsão e eventuais desenvolvimentos realizados. Após a introdução do que se pretende produzir são apresentadas algumas vantagens e desvantagens na aplicação de ligas com memória de forma.

No capítulo “Atuadores Mecânicos” são apresentados os diversos tipos de atuadores, com um foco direto para as ligas com memória de forma.

É feita uma introdução às ligas com memória de forma e à sua história. Posteriormente, é referida a liga de Ni-Ti usada neste trabalho. É analisada a composição química e as possíveis adições de elementos para moldar as características da liga Ni-Ti. São referidas ainda as características das ligas Ni-Ti.

Numa segunda parte, são estudadas as transformações de fase assim como as suas temperaturas, propriedades superelásticas, o EMF de simples efeito e de duplo efeito. São também apresentados alguns métodos de caracterização das ligas com memória de forma.

Numa terceira parte, é analisada a utilização de ligas Ni-Ti em atuadores mecânicos e os métodos para atingir a fase austenítica.

Por último, é apresentada uma secção onde se aborda a modelação de atuadores de molas de Ni-Ti.

No capítulo “Materiais e métodos” é definida a metodologia utilizada no trabalho experimental para a realização dos diversos ensaios termomecânicos e na construção do protótipo desde a parte estrutural às ligações elétricas.

No capítulo “Resultados e discussão de resultados” são apresentados e discutidos os ensaios de calorimetria diferencial de varrimento (DSC), ensaios mecânicos com travessão da máquina de tração fixo, ensaios mecânicos com travessão da máquina de tração fixo de longa duração para estudar o fenómeno de fadiga do EMF e ensaios de tração. É também construída uma folha de cálculo para modelação de molas Ni-Ti

No capítulo “Conclusões e propostas para desenvolvimentos futuros” são retiradas conclusões relativamente aos dados obtidos nos ensaios e da construção do protótipo, é analisada a viabilidade do protótipo nestes moldes para aplicação em AUV's e finalmente sugeridos possíveis seguimentos para este projeto.

# 1. Introdução

Os submarinos são máquinas fundamentais para o sucesso naval das grandes potências. Desde o seu aparecimento como máquina de guerra foi logo reconhecida a grande ameaça. Um aparelho de capacidades difíceis de igualar por outro meio naval, tanto pela sua furtividade, como pela sua capacidade de abater qualquer navio com um pequeno arsenal de guerra sem ser detetado (Hervey, 1994; Preston, 1998).

Na atualidade existe um grande leque de submarinos que são divididos em classes distintas pelo tipo de propulsão e missão para que foram desenhados. Existem submarinos nucleares de ataque (SSN's) capazes de navegar em profundidades superiores a 500m durante longos períodos a velocidades que igualam os torpedos da 2ª Guerra Mundial, sem terem que emergir uma única vez. Outros conseguem navegar submergidos a velocidades que equivaleriam a um submarino convencional (submarino diesel Elétricos) dos anos 60 com máquinas avante toda a força (MATF), com níveis de ruídos sonoros dificilmente detetáveis no meio do ruído oceânico com os equipamentos atuais (Hervey, 1994; Preston, 1998).

A capacidade de um submarino operar de forma camuflada em águas territoriais inimigas e de recolher informações sem que o opositor se aperceba da sua existência, torna estes navios numa máquina polivalente. No entanto, para que sejam bem sucedidos, estes terão que ter uma assinatura minimalista em todos os campos: sonoro, magnético e radiante (Hervey, 1994).

Quando submergido, o método mais eficaz para detetar um submersível é através da sua assinatura sonora. Para qualquer unidade naval de guerra existe sempre grande preocupação na redução de vibrações e minimização/isolamento de ruídos, numa tentativa de reduzir a assinatura sonora do mesmo. Considerando que o método mais eficaz de localização de um submarino consiste na utilização de sonares passivos, que se distinguem do sonar ativo por apenas utilizarem o ruído do submarino inimigo para determinar a sua posição, a capacidade de um submarino ser furtivo dependerá, em grande parte, da sua capacidade de ter uma assinatura sonora muito reduzida. Esta realidade tem conduzido a grandes progressos desde a Segunda Grande Guerra ao nível do hélice, máquinas e isolamentos de vibrações. No futuro, segundo Hervey (1994), é esperada a contínua busca pela redução dos ruídos emitidos pelos propulsores e um direcionamento para sistemas elétricos, desprezando cada vez mais os ruidosos sistemas pneumáticos e hidráulicos. Segundo este mesmo almirante, tais alterações levarão sem dúvida a um ligeiro incremento na assinatura magnética, o que é um retrocesso que não deve ser aceite de forma pacífica sob risco de ser explorado como fraqueza pelo inimigo (Hervey, 1994; Preston, 1998).

Qualquer navio, torpedo ou submarino emite algum tipo de ruído. Utilizando um sonar é possível descodificar esse som no meio do ruído de fundo que encontramos nos oceanos filtrando o ruído.

Segundo Hervey (1994), existem quatro tipos de ruídos detetáveis:

- Ruído das máquinas
- Ruído hidrodinâmico
- Ruído do hélice
- Ruído transiente

Os ruídos hidrodinâmicos, provocados pela excitação do casco (ressonância) e o fluxo de água pelas pequenas cavidades do casco, e o ruído provocado no hélice pela cavitação e a frequência de rotação das pás são os ruídos que mais variam com a velocidade de navegação.

Conforme os submarinos se tornam mais silenciosos, os ruídos minimalistas, tais como vibrações provocadas pelos rolamentos e sistemas hidráulicos, tornam-se fontes de ruído cada vez mais importantes (Hervey, 1994; Preston, 1998).

Nas últimas décadas, grandes potências mundiais, de entre os quais os Estados Unidos da América, têm mostrado um grande interesse nos AUV através de diversos programas, inclusivamente diversos programas da DARPA (*Defence Advanced Research Projects Agency*).

O emprego destes AUV's como recurso militar permite a substituição do ser humano e submarinos em sítios de risco como missões de guerra de minas, missões de reconhecimento ou sabotagem, zonas de fracas condições acústicas, águas pouco profundas ou na vigilância de perímetros.

Diversos trabalhos de investigação atuais direcionam-se para o que se entende que será o novo passo: a mímetização dos sistemas de propulsão dos seres vivos aquáticos. Considerando que a aplicação de atuadores de ligas com memória de forma permite, de modo geral, uma redução de emissões sonoras e vibrações, pretende-se criar um protótipo de um sistema de propulsão oscilante *biomimético* inspirado na barbatana caudal de seres aquáticos como o atum azul, recorrendo a atuadores mecânicos com ligas com memória de forma (LMF) e estudar a sua viabilidade.

O desenvolvimento ao longo de milhões de anos das diversas espécies de peixes permitiu-lhes atingir um elevado padrão de rendimento na sua locomoção, mais eficiente que qualquer instalação propulsora instalada em equipamentos aquáticos criados pelo homem, garantindo também uma elevada manobrabilidade e rendimento a qualquer velocidade. Daí a escolha do sistema de propulsão não convencional *biomimetizando* barbatana caudal (Shinjo, 2005).

A escolha da utilização de atuadores de ligas com memória de forma no sistema de propulsão oscilante *biomimético* deve-se às claras vantagens que estes atuadores apresentam, bem como às inúmeras aplicações que estes têm e ao potencial que podem vir a ter no futuro.

As vantagens descritas por Humbeeck (1999), Shinjo (2005) e Ohkata e Suzuki (2008) na aplicação destes atuadores são:

- Grande comprimento de ação
- Elevada força por unidade de massa (do atuador)
- Flexibilidade do movimento obtido pelo atuador
- Ação rápida, condicionada apenas pela temperatura
- Adequado para resistir a diversos tipos de ambientes corrosivos.
- Os atuadores realizam trabalho de forma limpa (evitam a contaminação)
- Operar silenciosamente e sem vibrações.
- Fácil instalação
- Bom sistema para amortecimento de forças ou vibrações
- Biocompatíveis

Dentro destas vantagens, tendo em consideração a finalidade para a qual se pretende os atuadores, salientam-se as capacidades dos atuadores serem extremamente silenciosos e com elevada relação força/peso.

No entanto estes atuadores, quando comparados com os diversos atuadores existentes no mercado, exibem certas desvantagens, como por exemplo:

- Custo de compra superior aos atuadores clássicos
- O intervalo de temperaturas em que pode operar limita-se entre os -20 °C e os +200 °C
- Limitado curso de memória de forma.
- Tempo de vida reduzido
- Arrefecimento deficiente que reduz a velocidade de atuação
- Consumos energéticos elevados
- Rendimento baixo

## **2. Enquadramento teórico**

Nas últimas décadas têm sido exploradas as potencialidades dos atuadores mecânicos para a simulação do movimento muscular de diversos órgãos de seres vivos com o objetivo de solucionar os problemas com que o ser humano se depara. O recurso a atuadores de materiais ativos, isto é, materiais que reagem a um estímulo externo, tem evoluído com o decurso dos anos. De entre estes atuadores destacam-se os polímeros elétricos e iónicos, materiais com memória de forma e os materiais ferroelétricos (Chu, et al., 2012 e Shinjo, 2005).

Como a origem do movimento dos atuadores está na sua estrutura, estes permitem gerar movimento sem requerer engrenagens, rolamentos ou outros mecanismos, tornando o sistema extremamente leve, de tamanho reduzido, mais simples (em pequena escala) e ainda

com a vantagem de serem de atuação extremamente silenciosa comparativamente aos atuadores convencionais (Chu, et al., 2012 e Shinjo, 2005).

De entre estes atuadores, este estudo focou-se na análise da viabilidade da aplicação de ligas com memória de forma como atuadores de propulsão submarina, em particular nos atuadores de Ni-Ti com propriedades de memória de forma.

## 2.1. Ligas com memória de forma

As ligas com memória de forma consistem em compostos metálicos com capacidade de recuperação de forma para a qual foram “treinados”. Essa capacidade revela-se geralmente quando o arame de liga com memória de forma é sujeito a uma deformação, no estado martensítico, seguido de um aquecimento até uma temperatura acima da temperatura de fim de transformação austenítica ( $A_f$ ), temperatura a que terá recuperado a totalidade da sua forma inicial. As ligas com memória de forma, de uma maneira geral, têm uma ductilidade superior no estado martensítico, já no estado austenítico possuem uma dureza e um módulo de Young superiores (Fernandes, 2013; Huang, 1998).

As ligas podem ser educadas para ter apenas memória de forma no sentido da transformação austenítica durante o aquecimento (“*one-way shape memory effect*”) ou nos dois sentidos (“*two-way shape memory effect*”) apresentando vantagens e desvantagens consoante a aplicação. Para este projeto serão usadas ligas de simples efeito. O motivo para esta escolha recai sobre a maior extensão permitida para o efeito de memória da liga Ni-Ti e a maior facilidade em educar uma mola de efeito simples. É essencial referir que a extensão ( $\epsilon$ ) corresponde à razão entre a variação do comprimento ( $d'$ ) e o comprimento do fio ( $l$ ):

$$\epsilon = \frac{d'}{l} \quad (2.1)$$

Das várias ligas com memória de forma existentes no mercado, as ligas com características de memória de forma, tempo de vida útil e uma força produzida apreciáveis e comercialmente viáveis são as ligas de Ni-Ti e de Ni-Ti-Cu.

O primeiro contacto com as singularidades de comportamento termomecânico das ligas com memória de forma foi tido por Arne Olander em 1932 com a liga Au-Cd acima dos 340 °C, mas esse efeito apenas terá sido clarificado, inicialmente em 1949 por Kurdjumov e Khandros e confirmado por Chang e Read em 1951, numa barra de Au-Cd (Au-47,5at%Cd). Somente em 1961 foi descoberto o EMF numa liga de Ni-Ti de forma acidental por Williams J. Buehler Kauffman & Mayo, (1997). O nome comercial da liga, “Nitinol”, remete para a combinação dos nomes dos elementos químicos que a compõem (níquel e titânio) e do laboratório onde foi descoberto, (*Naval Ordnance Laboratory*). Estas ligas também apresentam superelasticidade a alta temperatura. Com esta descoberta aumentou grandemente o interesse sobre este efeito,

surgindo diversas aplicações (Otsuka e Wayman, 2002; Gupta, Seena e Rai, 2012; Fernandes, 2013).

### 2.1.1 Ligas Ni-Ti com EMF

As ligas de Ni-Ti são um composto intermetálico equiatômico de Níquel e Titânio, cujas propriedades gerais estão descritas na tabela 2.1. Esta liga tem uma solubilidade que possibilita a associação de outros elementos que permitem modificar as suas características mecânicas, assim como as temperaturas de transformação de fase. É frequente a adição de Ni até cerca de 51 %. O excesso de níquel, assim como a adição de ferro ou cromo é utilizada para diminuir a gama de temperaturas de transformação, já o cobre permite a redução da histerese na transformação de fases e a tensão de deformação da martensite, (Fernandes, 2013; Rediniotis *et al.*, 2000).

**Tabela 2.1** – Propriedades das ligas Ni-Ti com memória de forma (Fernandes, 2013)

<b>Propriedades térmicas</b>	
Ponto de fusão (°C)	~ 1300
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	6,45
Resistividade ( $\mu\Omega \cdot \text{Cm}$ )	
Austenite	100
Martensite	70
Condutividade eléctrica ( W / m . K )	
Austenite	18
Martensite	8,5
Capacidade calorífica ( J / kg . K )	400
<b>Propriedades mecânicas</b>	
Módulo de Young ( GPa ) (°)	
Austenite	~ 80
Martensite	25 a 40
Tensão de cedência ( MPa )	
Austenite	195 a 690
Martensite	70 a 140
UTS no estado recozido ( MPa )	895
UTS no estado encruado ( MPa )	1900
Extensão até à ruptura no estado recozido ( % )	25 a 50
Extensão até à ruptura no estado encruado ( % )	5 a 10
<b>Propriedades características do efeito de memória de forma</b>	
Temperaturas de transformação ( °C )	-200 a 110
Deformação recuperável	8,5
Histerese ( °C )	15 a 25
<b>Resistência à corrosão</b>	Excelente. Semelhante à dos aços inox da série AISI 300

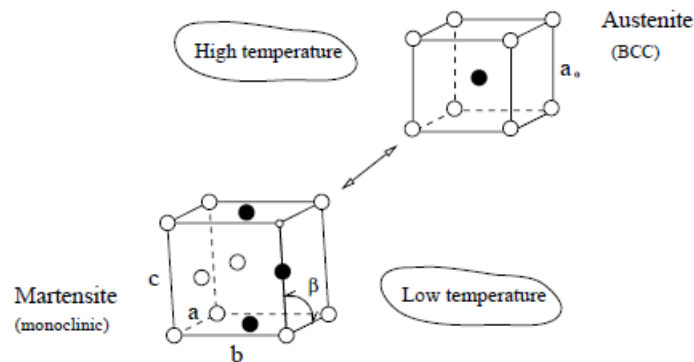
### 2.1.2 Estruturas da liga de Ni-Ti com EMF

A matriz da liga Ni-Ti é caracterizada por uma fase de alta temperatura denominada de fase mãe (austenite) e uma fase de baixa temperatura (martensite). A percentagem de cada uma das fases é função da temperatura, permitindo variar as propriedades do material e obter o EMF ou de superelasticidade.

A austenite é composta por uma estrutura cúbica de corpo centrado (B2) ordenada com  $a_0=0,3015$  nm, Figura 2.1.

A estrutura martensítica, resultante do arrefecimento da austenite, é uma estrutura monoclinica (B19') com  $a=0,2889$  nm,  $b=0,4120$  nm,  $c=0,4622$  nm,  $\alpha=\beta=90^\circ$  e  $\gamma=96,8^\circ$ , Figura 2.1. Esta tem uma energia baixa das interfaces austenite/martensite, que associada a uma elevada mobilidade das interfaces facilita o seu movimento com pequenas tensões (Huang, 1998; Otsuka e Ren, 2005; Fernandes, 2013).

A martensite, quando observada microscopicamente, está organizada em plaquetas de variantes que se acomodam umas com as outras, macladas entre elas. Existe uma relação entre a orientação dos cristais da austenite local e os cristais da martensite vizinhos. A liga de Ni-Ti é caracterizada por ter até 12 variantes de martensite possíveis de serem formadas. As variantes são cristalograficamente semelhantes mas com diferentes planos de corte e diferentes orientações, permitindo minimizar as tensões internas evitando deformações macroscópicas da liga durante o arrefecimento e permitindo acomodar deformações (Huang, 1998).



**Figura 2.1** – Ilustração de transformação de fase da liga Ni-Ti (Huang, 1998).

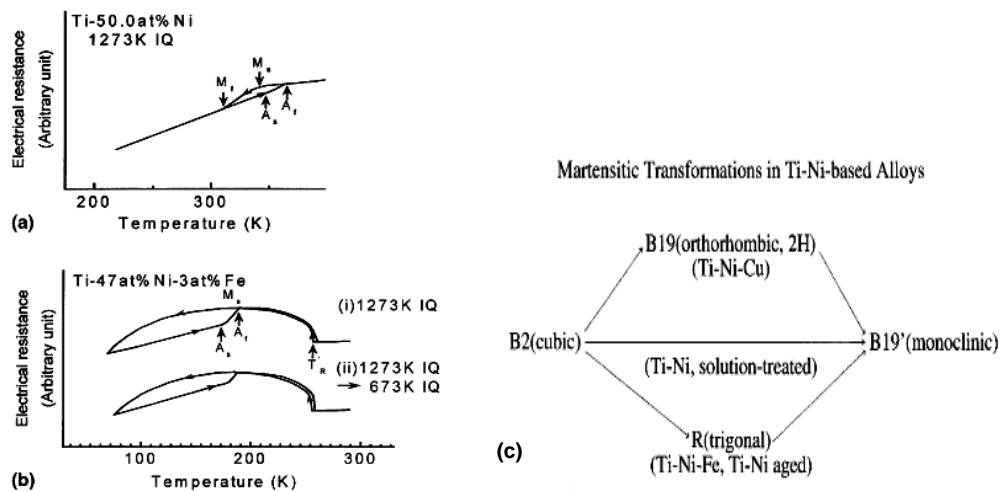
A Fase-R (estrutura de simetria trigonal) é uma estrutura intermédia que pode ocorrer em certas condições determinadas pelo tratamento termomecânico. Para que exista a etapa intermédia (fase-R) durante a transformação direta, é imperativo que o recozimento da liga não ultrapasse os 450 °C. Pode ocorrer com a verificação de uma das seguintes condições:

1) Está presente em ligas ricas em Ni, caso sejam tratadas com um envelhecimento térmico a uma temperatura de 400 °C, produzindo precipitados de Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>.

2) Pode também ocorrer através de recozimento após deformação por laminagem ou trefilagem a baixa temperatura, sofrendo uma reorganização da estrutura.

3) Também pode formar-se em ligas em que o Ni é parcialmente substituído por outros elementos tais como o Al, Cu ou Fe (Otsuka e Ren 2005; Fernandes, 2013).

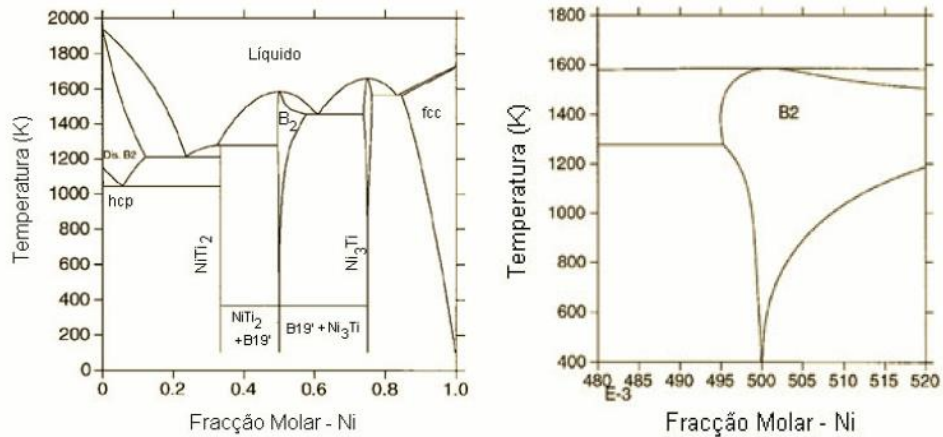
Esta fase intermédia, que ocorre durante a transformação de austenite para martensite, aparece pela distorção da fase B2 na direção <111>. Esta transformação é acompanhada pelo aumento da resistência elétrica durante o arrefecimento e uma pequena histerese térmica (1 a 2 °C) para uma liga de Ti – 47 at %Ni – 3 at %Fe, tal como se pode ver na Figura 2.2 (b). No caso de, no intervalo do arrefecimento, aparecer primeiramente a fase B19', a Fase-R já não ocorrerá.



**Figura 2.2** - Transformações martensítica (a) Transformação de B2 para B19', (b) transformação B2 para R para B19' e (c) diversas transformações martensíticas com as diversas fases intermédias (Otsuka e Ren, 2005).

Na Figura 2.2 pode-se verificar que a fase austenítica é evidentemente mais estável para ligas mais ricas em Ni. Nas ligas com concentrações de Ni superiores à relação estequiométrica, constata-se uma forte variação da solubilidade máxima com a temperatura para a fase B2. No que diz respeito às ligas com concentrações superiores de Ti em relação à concentração estequiométrica, a variação não é tão relevante. Estas características de transformação da fase mãe permitem jogar com as temperaturas de transformação uma vez que a temperatura T<sub>0</sub> está dependente da relação de Ni : Ti na liga. As ligas de concentração superior de Ni em relação as proporções estequiométricas da liga Ni-Ti têm uma variação muito acentuada das temperaturas de transformação em função da composição, já no que respeita

as ligas ricas em Ti, verifica-se uma menor influência da composição química sobre as temperaturas de transformação (Otsuka e Ren, 2005; Fernandes, 2013).



**Figura 2.3** – Diagrama de equilíbrio da liga Ni-Ti. (Fernandes, 2013)

### 2.1.3 Transformações austenite ⇌ martensite

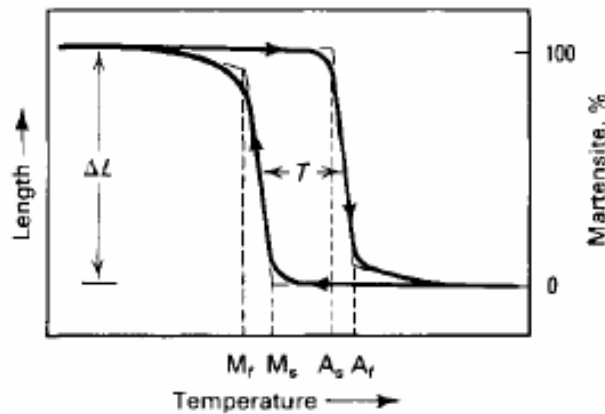
As transformações de fase nas ligas com memória de forma estão associadas a um deslocamento uniforme dos átomos, inferior à distância interatômica. Este movimento é executado de forma cooperativa e frequentemente acompanhado por um mecanismo de deformação por corte.

A transformação martensítica pode ser induzida de formas diferentes: (i) termicamente, através da variação da temperatura ou (ii) mecanicamente, através da aplicação de uma tensão externa (Fernandes, 2013; Otsuka *et al.*, 2005).

#### Transformação martensite ⇌ austenite induzida termicamente

As transformações induzidas termicamente, porque as transformações não dependem do efeito de difusão de átomos, têm uma velocidade unicamente dependente da condutibilidade térmica.

As transformações desenvolvem-se ao longo de um grande intervalo térmico mas, a globalidade deste fenómeno concentra-se num pequeno domínio de temperaturas, as temperaturas de maior relevância correspondem ao aumento brusco da transformação.



**Figura 2.4** – Variação da extensão com a temperatura ao longo das transformações de fase sujeita a força constante (Fernandes, 2013).

O Ciclo térmico da transformação de fase é caracterizado na Figura 2.4. As temperaturas de maior importância para o fenómeno de EMF de que se falou no parágrafo acima correspondem efetivamente à  $A_s$  - temperatura de início da transformação austenítica,  $A_f$  - temperatura de fim da transformação austenítica,  $M_s$  - temperatura de início da transformação martensítica,  $M_f$  - temperatura de fim da transformação martensítica.

A martensite é a fase com menor energia livre abaixo da temperatura  $T_0$  (temperatura crítica), no entanto devido a alguns fatores, de entre os quais o atrito interno, esta inicia a sua formação somente na  $M_s$  ligeiramente abaixo de  $T_0$ . A temperatura  $T_0$  pode ser encontrada recorrendo à média entre as temperaturas  $A_f$  e  $M_s$ .

Observando-se o comportamento da liga na fase de aquecimento e arrefecimento verifica-se que existe histerese entre as temperaturas  $M_f$  e  $A_s$ , assim como entre as temperaturas  $M_s$  e  $A_f$ . Desta forma, o EMF é tanto mais eficiente quanto menor for a histerese.

É interessante notar que o controlo da concentração de martensite é diretamente efetuado através da temperatura, pelo que quando ocorre a estabilização da temperatura também se verifica a estabilização na estrutura da liga.

As propriedades da liga Ni-Ti variam de acordo com a proporção de níquel e de titânio, e da microestrutura associada aos tratamentos termomecânicos do processo de produção que sofreu durante a educação da liga. (Huang, 1998; Otsuka e Ren, 2005; Fernandes, 2013)

Iniciando o ciclo na fase austenítica, a transformação (induzida termicamente através do arrefecimento da liga) na fase mãe para a fase martensítica não ocorre deformação macroscópica da liga, à parte da reduzida deformação devida aos fenómenos de expansão/contração térmica. O resultado desta transformação, ao nível microscópico, é constituído por diversas variantes de martensite estruturalmente iguais. A assimetria da estrutura monoclinica permite a criação de diversas variantes macladas entre elas para manter

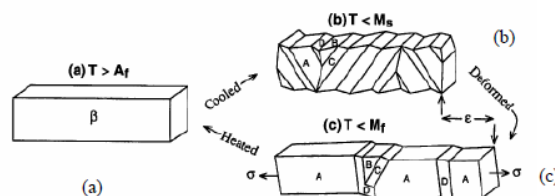
a forma original com o mínimo de tensões (mecanismo de Auto-acomodação), Figura 2.5 (a) → (b).

A martensite formada a partir da fase mãe, normalmente maclada, quando sujeita a uma tensão incrementada de forma gradual, sofre uma deformação inicialmente elástica (tensão proporcional à extensão) até atingir o limite elástico. Numa fase seguinte a tensão, é estabilizada verificando-se apenas o aumento da extensão. Este fenómeno deve-se à desmaclagem da martensite maclada. Numa fase final o fenómeno de desmaclagem é acompanhado pelo aumento da tensão até estar totalmente desmaclada, com variantes mais concordantes com a direção da deformação Figura 2.5 (b) → (c) (Fernandes, 2013; Otsuka *et al.*, 2005).

Durante a transformação de fase martensítica (por aquecimento) para a fase mãe, Figura 2.5 (c) → (a), também chamada transformação inversa, os movimentos dos átomos são obtidos através de mecanismos de corte que conduzem a uma deformação homogénea da estrutura, resultando na alteração da forma macroscópica. Esta alteração uniforme tem origem na componente desviadora do tensor das deformações.

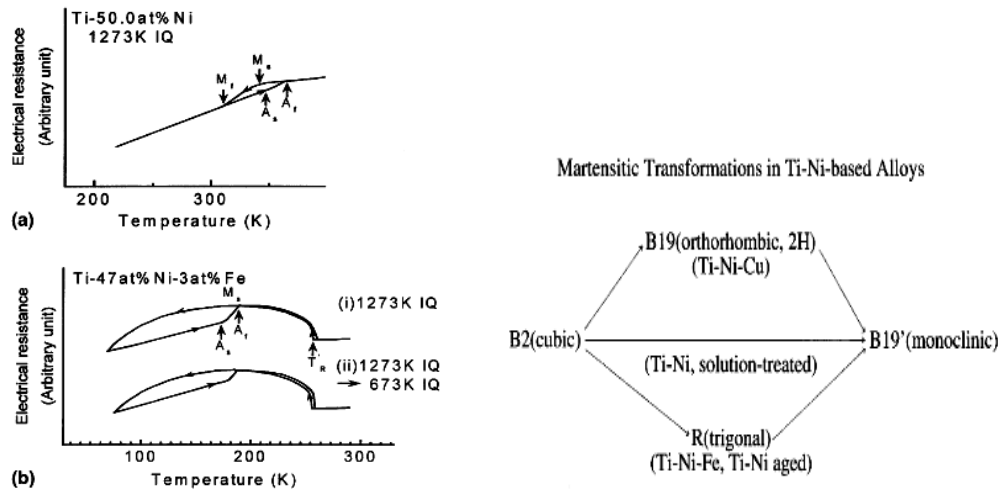
As duas fases têm estruturas cristalográficas diferentes, o que leva a deformações da rede cristalográfica, durante o desenvolvimento da austenite, devido às estruturas de diferentes naturezas.

No aspeto microscópico, durante a transformação, existe um plano ao longo do qual não são verificadas alterações entre a fase de alta temperatura e a fase de baixa temperatura quanto às componentes normais da deformação, como às de distorção. Este plano pertence a ambas as fases. Se considerarmos um plano de referência invariante, todos os átomos se deslocam em relação a este de forma proporcional à distância ao mesmo. A deformação ostenta um efeito de escada sendo que a soma dos degraus será a deformação macroscópica. Estas transformações são acompanhadas de deformações heterogéneas na rede invariante que coadjuvam na limitação da energia de transformação. Esta intervenção pode ser por escorregamento ou por maclagem, impelidos por esforços de corte (Huang, 1998; Otsuka e Ren, 2005; Fernandes, 2013).



**Figura 2.5** – Ilustração de transformações de fase. (a) Fase austenítica após o aquecimento, (b) fase martensítica com a forma macroscópica da austenite, (c) fase martensítica auto-acomodante após deformação mecânica (Fernandes, 2013).

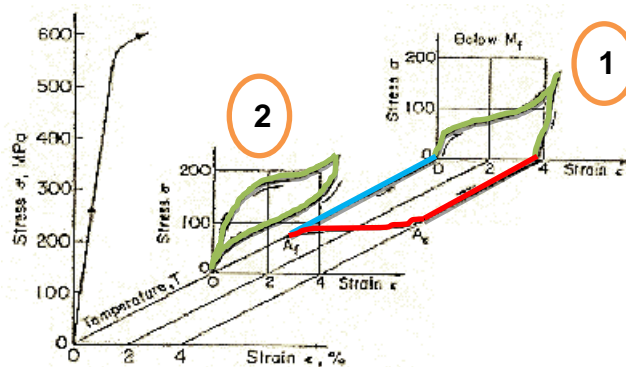
Para o estudo deste projeto em que é analisado o EMF na liga Ni-Ti com temperaturas acima da temperatura ambiente, apenas são consideradas as transformações do tipo B2  $\leftrightarrow$  B19' e B2  $\leftrightarrow$  Fase-R  $\leftrightarrow$  B19', como se verifica na Figura 2.6.



**Figura 2.6** - Transformações martensítica (a) Transformação de B2 para B19' e (b) transformação B2 para R para B19' (Otsuka e Ren, 2005).

### Memória de forma de simples (OWSME)

O efeito de memória de forma simples é descrito pela capacidade que uma liga com memória de forma tem de recuperar a sua forma inicial após ser deformada no estado martensítico. O EMF apenas ocorre durante a transformação da fase martensítica na fase mãe, como se observa no gráfico (2) da Figura 2.7. A capacidade de recuperação da deformação induzida no estado martensítico pode atingir valores entre 6 a 8% (para um número de ciclos muito reduzido) (Suleman e Crawford, 2009; Fernandes, 2013).

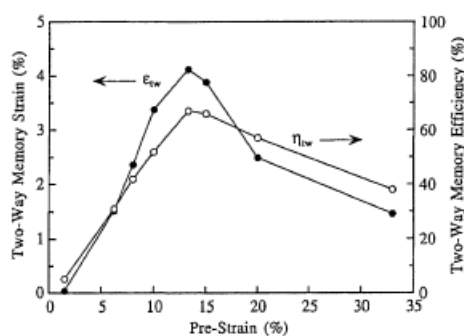


**Figura 2.7** – Representação gráfica do fenómeno de memória de forma, de superelasticidade e de escorregamento de deslocações na fase austenítica (Fernandes, 2013).

## Memória de forma de duplo efeito (TWSME)

Segundo Otsuka e Ren (2005) é possível que uma liga com memória de forma tenha a capacidade de recuperar não só a forma memorizada na fase austenítica, como também a sua forma memorizada na fase martensítica. Isto é, recuperar uma forma durante o arrefecimento e outra durante o aquecimento, para o qual o material foi treinado. Este fenómeno caracteriza-se por uma força de ação elevada durante o aquecimento, à semelhança do efeito de memória simples. A força disponível durante o arrefecimento (para o retorno à forma memorizada na fase martensítica) é consideravelmente inferior. A máxima extensão expectável de se obter, sem deformação não recuperável, é de aproximadamente 4 %.

O duplo efeito de memória é obtido através de processos termomecânicos que introduzem deformações plásticas, limitam o envelhecimento (*constraint aging*) e fazem uma ciclagem térmica em condições controladas recorrendo a precipitados de Ni-Ti. A criação de defeitos na malha permite, no seu conjunto, criar tensões internas suficientes para condicionar o crescimento das plaquetas martensítica desmacladas segundo a direção da tensão induzida. Não existe por isso a fase intermédia da martensite maclada. Este processo, conhecido por efeito super-termoelástico, decorre durante a transformação martensítica. Com efeito, os interstícios, as deslocações e outros defeitos, que em ligas com efeito de memória de forma simples iriam aumentar a deformação residual ao longo dos primeiros ciclos térmicos, podem ser educados para obter EMF durante o arrefecimento (Huang, 1998; Rediniotis *et al.*, 2000; Fernandes, 2013).



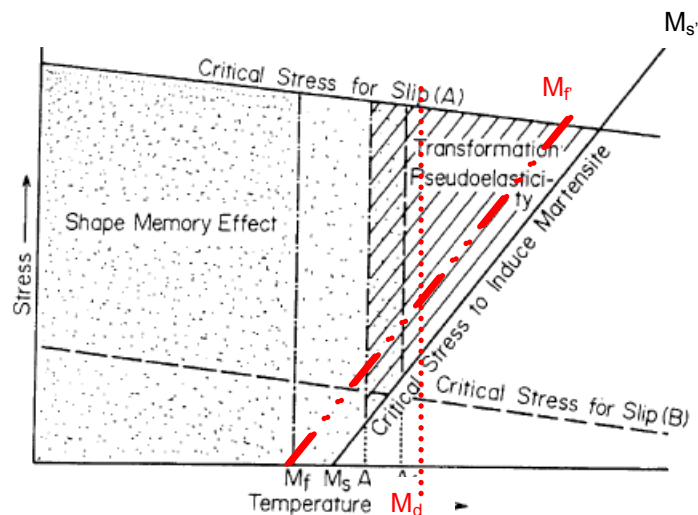
**Figura 2.8** - Efeito da reorientação da martensite no desenvolvimento do EMF duplo, (Ni-50,0Ti recozido a 938K durante meia hora) (Otsuka e Ren, 2005).

Como se pode verificar na Figura 2.8, o rendimento máximo do efeito de memória de duplo está próximo dos 60 % para uma recuperação de extensão de 4 % com uma pré-deformação de 15 %. Esse rendimento corresponde ao rácio de extensão máxima para o efeito de memória de forma simples e a extensão máxima do efeito de memória de forma simples (Otsuka e Ren, 2005).

## Transformação martensite ⇌ austenite - Propriedades superelásticas

No estado austenítico, quando aplicada uma força, verifica-se um crescimento gradual da tensão com a deformação durante o processo puramente elástico, seguindo a lei de Hooke. Após superar a tensão crítica para indução de martensite, segue-se um patamar onde o declive da curva  $\sigma$ - $\epsilon$  é muito inferior ao módulo de elasticidade  $\sigma$ - $\epsilon_e$  e verifica-se um aumento da extensão do arame muito superior à deformação elástica. Este patamar tem origem na deformação superelástica, por transformação da austenite em martensite desmaçada. Com o cessar da força, a tensão reduz, tal como a extensão, até a deformação elástica ser recuperada. No final da recuperação da deformação elástica, atinge-se um patamar de tensão quase constante em que se verifica a redução da extensão até recuperar a forma inicial e a fase austenítica ser totalmente reposta, este fenómeno é representado pelo gráfico (2) da Figura 2.7. Este fenómeno demarca-se pela não linearidade do comportamento mecânico.

Em contrapartida, sabendo que a tensão crítica para ocorrer o fenómeno de superelasticidade aumenta com a temperatura, se a temperatura for demasiado elevada, a tensão crítica necessária para induzir a transformação martensítica pode não ser atingida devido ao facto de a tensão de deformação plástica da austenite por escorregamento de deslocações ter um valor inferior. Nesta situação verifica-se um comportamento de deformação plástica não recuperável da austenite, não ocorrendo fenómeno de superelasticidade. O fenómeno da superelasticidade encontra-se limitado superiormente por uma temperatura  $M_d$  a partir da qual se verifica a deformação plástica da austenite, Figura 2.9. O progresso no domínio superelástico é linear com a temperatura, Na Figura 2.9 essa linha é  $M_s'$  (Fernandes, 2013).



**Figura 2.9** – Esquema da relação entre a tensão e temperatura em que está representada a zona de memória de forma e a zona de superelasticidade (Otsuka e Ren, 2005).

Segundo Otsuka e Ren (2005), a superelasticidade é um fenómeno que se revela nas ligas Ni-Ti no domínio de temperaturas superiores à  $A_f$ . Neste processo verifica-se uma recuperação quase total da deformação. No entanto, não é verificada a recuperação total da energia, o processo exibe uma histerese mecânica pois o patamar da tensão de deformação é superior à tensão de recuperação.

Sabendo que o objetivo desta dissertação é realizar atuadores de Ni-Ti baseados no EMF, as transformações de fase induzidas termicamente são as mais relevantes para este trabalho. A superelasticidade é todavia um fenómeno interessante para aplicações direcionadas para a absorção de choques e vibrações, proporcionado pela histerese energética do efeito superelástico.

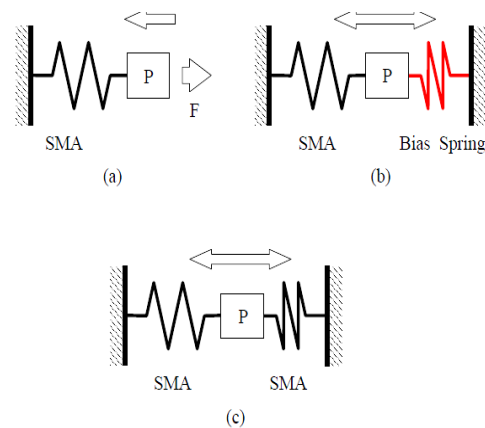
## **2.2. Atuadores de ligas com memória de forma**

Segundo o trabalho realizado por Suleman e Crawford (2009), os materiais com memória de forma remetem para diversas vantagens no que respeita aplicações de pequena escala.

Os atuadores com memória de forma são atuadores capazes de transformar energia térmica em energia mecânica recorrendo ao EMF. Apresentam a capacidade de produzir movimentos diversos, sempre condicionados pelo tratamento termomecânico a que estiveram sujeitos durante o processo de educação. O seu movimento poderá ser retilíneo atuando a tração ou compressão, angular ou mesmo tridimensional (Ohkata & Suzuki, 2008).

Existem duas formas consensuais de obter movimento nos dois sentidos:

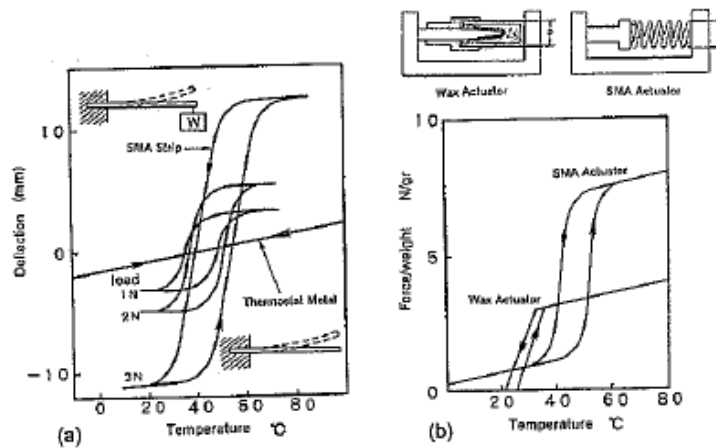
- Atuadores de simples efeito com mola de retorno, que se socorrem de uma mola normal (aço) para armazenar energia mecânica durante a transformação da liga Ni-Ti para a fase mãe libertando-a posteriormente durante o arrefecimento. Como resultado, a mola de Ni-Ti é deformada na sua fase martensítica, através de uma força externa. Esta força pode também ser realizada através de um atuador antagónico, este último permite obter qualquer posição de forma precisa com um controlo correto das LMF (Huang, 1998).
- Atuadores de duplo efeito que recorrem ligas com efeito de memória forma duplo, mais recorrente em situações que careçam de grande precisão de movimento por serem mais onerosos e de produção mais difícil. Este tipo de atuador caracteriza-se por uma deformação máxima recuperável da ordem de grandeza de metade das ligas com efeito de memória simples (Huang, 1998).



**Figura 2.10** – Esquema simplificado de diversos tipos de atuadores: (a) atuador com retorno por força externa ao atuador ou de simples efeito; (b) Atuador de retorno por mola; (c) atuador de retorno por atuador antagônico (Huang, 1998).

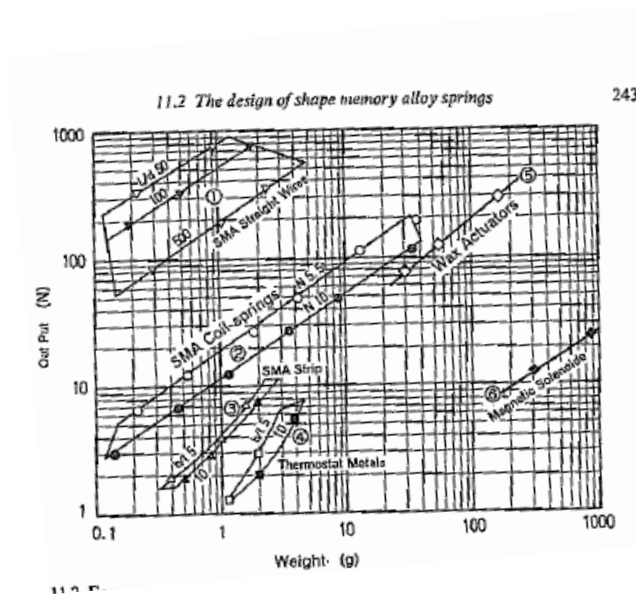
Nas aplicações que exijam um curso de atuação que seja superior à extensão máxima que a liga Ni-Ti consegue suportar sem causar a degradação rápida do EMF ou sofrer deformações, comprometendo o seu tempo de vida útil, recorre-se ao aumento do comprimento do arame usando a forma de mola helicoidal. Visto que a mola terá um comprimento superior, ocupando um espaço menor que um arame retilíneo, haverá um maior deslocamento, contudo, as forças associadas serão inferiores. Nas aplicações que exijam grandes tensões, mas com pequenos deslocamentos, usam-se geralmente as LMF em lâmina ou em arame linear. Deduz-se pois, que não é possível obter força e extensão elevada, mas sim jogar com as duas características em função do pretendido (Huang, 1998; Ohkata e Suzuki, 2008).

Os atuadores de LMF têm revolucionado o desenho de pequenos atuadores em virtude das suas capacidades. No que respeita às vantagens dos atuadores de memória de forma pode-se sublinhar o seu rácio potência/peso e força/volume. Na Figura 2.11 verificam-se as capacidades dos atuadores de memória de forma quando em comparação com atuadores de cera, bimetais e eletroímã (Ohkata e Suzuki, 2008).



**Figura 2.11** - Comparação das características de atuadores térmicos. (a) Curva de Temperatura em função da deflexão de um bimetal e uma liga com memória de forma. (b) curva de temperatura em relação à força/massa para atuadores com memória de forma e de cera (Ohkata e Suzuki, 2008).

Os atuadores de memória de forma são claramente superiores para massas que sejam inferiores a 1 g. Esta afirmação foi justificada por Ohkata e Suzuki (2008) que comprovaram que, a esta escala, os materiais com memória de forma apresentam características superiores às dos pequenos motores elétricos, Figura 2.12.



**Figura 2.12** – Relação entre a força e o peso de diversos atuadores (Otsuka e Ren, 2005).

Os atuadores de LMF, como foi visto na introdução, permitem produzir movimentos com um curso considerável, (até sensivelmente 8% de deformação com memória de forma num sentido ou 4% com memória nos dois sentidos de atuação), sem pôr em causa a força de atuação (Otsuka e Ren, 2005; Ohkata e Suzuki, 2008).

São sistemas limpos e silenciosos que não necessitam de mecanismos de lubrificação para o bom funcionamento e por sinal com ótimas características de resistência à corrosão. Não necessitam de qualquer tipo de engrenagem ou de outro sistema para a transmissão de força, sendo extremamente silenciosos (Ohkata e Suzuki, 2008).

Os movimentos dos atuadores de LMF podem ser extremamente precisos e com acelerações ínfimas se for necessário, podendo ser usados em aplicações delicadas. A transformação de fase apenas depende da temperatura da liga e a velocidade de atuação está apenas dependente da velocidade de arrefecimento e aquecimento do atuador (Fernandes, 2013).

A diferença de potencial requerida é extremamente pequena dada a baixa resistividade da liga Ni-Ti, permitindo uma segurança considerável na sua aplicação em meios aquáticos (Garner *et al.*, 2000).

Nos aspetos desvantajosos das ligas com memória de forma, o rendimento máximo do ciclo de Carnot entre  $A_f$  e  $M_f$  ronda sensivelmente os 10% a baixa temperatura e com uma diferença de temperaturas pequenas. O seu rendimento à tração atinge o seu máximo para cerca de 1,3% de extensão (Humbeeck, 1999; Rediniotis *et al.*, 2000).

Os tempos de ação destes atuadores estão limitados pela capacidade de dissipação da energia térmica no meio envolvente. Uma vez que o aquecimento é quase instantâneo, o ciclo pode ser melhorado com um arrefecimento forçado e alteração do fluido de arrefecimento. Os seus tempos de arrefecimento não permitem ciclos muito inferiores a 1Hz, como se verifica na Tabela 2.2. Uma nota importante de manter presente é o facto de, durante a transformação da austenite em martensite, haver libertação de energia nas transformações de fase. Ou seja, durante a transformação da fase mãe para a fase martensítica no domínio superelástico tem-se uma transformação estrutural exotérmica correspondente sensivelmente a 20 J/g, para o projeto, este aspeto não é muito relevante pois não se pretende que as molas trabalhem no domínio superelástico. Nas aplicações em que seja aplicado o efeito superelástico, esta libertação de energia provoca um aumento da tensão crítica de formação de martensite mecanicamente induzida, que deve ser tido em atenção porque pretende-se um comportamento linear (Humbeeck, 1999; Rediniotis *et al.*, 2000).

**Tabela 2.2** – Propriedades dos arames de Ni-Ti em função do seu diâmetro (Dinalloy.Inc, 2012).

Diâmetro [mm]	Resistência ( $\Omega/m$ )	Força [g]	Intensidade para contração de 1s [mA]	Tempo de arrefecimento (70 °C)	Tempo de arrefecimento (90 °C)
0,025	-1425	-8,9	45	0,18	0,15
0,038	-890	-20	55	0,24	0,2
0,05	-500	-36	85	0,4	0,3
0,076	-232	-80	150	0,8	0,7
0,1	-126	-143	200	1,1	0,9
0,13	-75	-223	320	1,6	1,4
0,15	-55	-321	410	2	1,7
0,2	-29	-570	660	3,2	2,7
0,25	-18,5	-891	1050	5,4	4,5
0,31	-12,2	-1280	1500	8,1	6,8
0,38	-8,3	-2250	2250	10,5	8,8
0,51	-4,3	-3560	4000	16,8	14

Quando consideramos a aplicação de atuadores com memória de forma para aplicações que não estejam num ambiente aquático, deparamo-nos com um grave constrangedor da frequência de atuação do atuador provocado pela baixa condutibilidade térmica do ar. Este problema pode ser solucionado aumentando o fluxo de ar, no entanto, o aumento da velocidade de transformação da fase austenítica para martensítica mantém-se limitado. No caso da utilização destes atuadores no meio aquático, verifica-se um aumento da frequência máxima dos atuadores, acompanhados pelo aumento da intensidade de corrente elétrica necessária para criar um aquecimento, por efeito de Joule, que permita o aquecimento da liga Ni-Ti devido à alta condutibilidade da água. Este problema é solucionado usando sistemas de arrefecimento controlados por bombas ou válvulas que controlem a circulação do fluido junto da mola, permitindo um aumento de rendimento do atuador associado a um aumento de rapidez de atuação (Chu, *et al.*, 2012; Rediniotis, *et al.*, 2000).

O uso contínuo destes atuadores está constrangido a um número limitado de ciclos que varia com a extensão máxima, a composição da liga, a tensão máxima exercida e com a temperatura máxima aplicada. Em suma, se necessitarmos de um grande número de ciclos para estes atuadores, deveremos limitar a extensão da liga e a temperatura. Para obter um tempo de vida na ordem dos  $10^4$  ou  $10^6$  com a liga Ni-Ti, é necessário limitar sempre a extensão máxima abaixo dos 5% do comprimento do arame de Ni-Ti linear. Os arames enrolados já estão limitados abaixo deste valor para obter o mesmo número de ciclos de vida (Ohkata e Suzuki, 2008).

Para aplicações que necessitem de uma grande amplitude de movimento e forças consideráveis, numa tentativa de manter um valor de extensão baixo, pode ser usado um

arame helicoidal que permite aumentar o comprimento do arame sem, no entanto, aumentar o comprimento do espaço em que se encontra inserido. (Ohkata e Suzuki, 2008 )

### **2.2.1 Formas de aquecimento das LMF**

A mudança de fase do estado martensítico para o estado austenítico requer um incremento da temperatura. Os procedimentos que podem ser aplicados dependem muito do tipo de atuadores, como se irá descrever.

Os atuadores que apliquem arames de Ni-Ti de pequeno diâmetro podem ser aquecidos diretamente por efeito de Joule. A resistência à passagem da corrente elétrica é tanto maior quanto menor for a área da sua secção de passagem (diâmetro do arame). Para arames de pequeno diâmetro é possível obter valores de resistência superiores por unidade de comprimento, conseqüentemente obtém-se temperaturas superiores com correntes baixas comparativamente aos de maior diâmetro. Este método é simples, implicando no entanto que as LMF estejam isoladas.

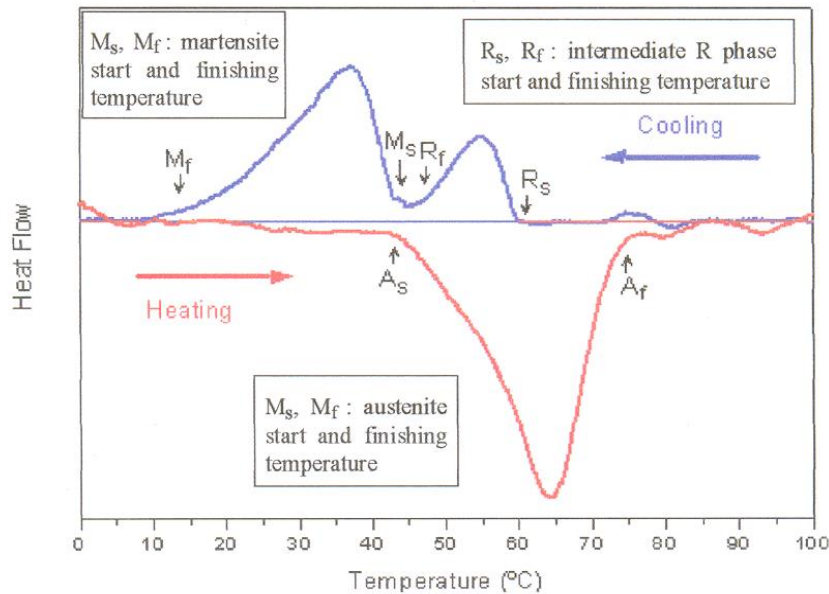
Os atuadores de grandes diâmetros, como têm uma secção muito superior, a intensidade de corrente elétrica necessária para permitir o mesmo aquecimento da liga é muito elevada. No entanto o seu aquecimento é frequentemente realizado por um fio de alta resistência elétrica isolado e enrolado nas LMF que permita a transferência de energia térmica para a LMF. Este fio terá que oferecer uma boa condutividade térmica.

Por fim, também é possível realizar transferência térmica através de um fluido ou radiação térmica (Huang, 1998).

### **2.3. Caracterização de uma liga com EMF**

Na determinação das características das ligas com memória de forma são empregues diversas técnicas, a mais comum é o DSC. Este método consiste num ciclo térmico, com variação da temperatura do meio envolvente entre valores extremos negativos e positivos, medindo-se a energia térmica absorvida ou emitida pela amostra da liga.

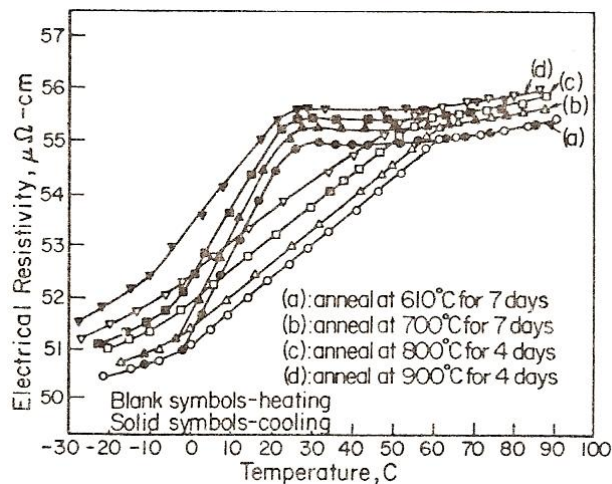
Os resultados obtidos permitem determinar o início e o fim de cada transformação de fase, bem como a energia específica transferida para ocorrer cada transformação de fase. Neste tipo de ensaios não se entra em consideração com tensões (Jackson *et al.*, 1972; Fernandes, 2013).



**Figura 2.13** - Ensaio DSC realizado sobre uma película fina de Ni-Ti obtida por pulverização catódica (Fernandes, 2013).

A resistividade elétrica do atuador de liga Ni-Ti, no decorrer da transformação, é também muito utilizada, dado a liga ter uma grande variação em função do seu estado: fase austenítica, martensítica ou Fase-R. Como pode ser verificado na Figura 2.14, este valor é influenciado pela temperatura de recozimento.

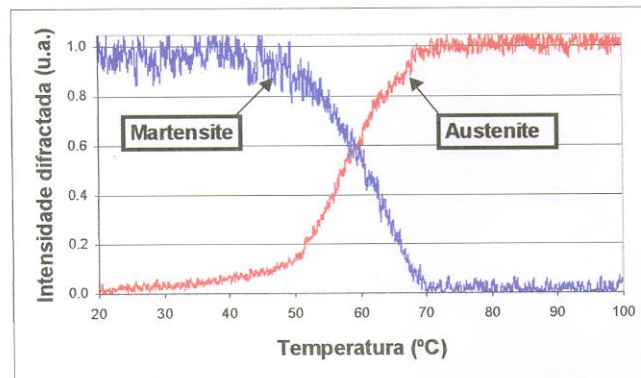
Os resultados expectáveis para a liga Ni-Ti são um aumento de resistência durante a transformação  $B2 \rightarrow R$  e uma redução durante a transformação  $R \rightarrow B19'$  e  $B2 \rightarrow B19'$  (Jackson *et al.*, 1972; Fernandes, 2013).



**Figura 2.14** – Efeito da temperatura de recozimento na resistividade do Ni – 51 at %Ti (Jackson *et al.*, 1972).

A dilatometria também é passível de ser usada para determinar as transformações de fase. Esta baseia-se na variação volumétrica da liga Ni-Ti nas várias fases, No caso da liga de Ni-Ti verifica-se uma contração do volume de B2→R e uma dilatação durante a transformação R→B19' e B2→B19'.

A difração de raios X (DRX) é mais um método para o estudo das características termomecânicas (Figura 2.15). Este método possibilita a identificação de fases na amostra, assim como a sua percentagem, permitindo um seguimento da transformação de fases em função da temperatura (Fernandes, 2013).



**Figura 2.15** - Variação da intensidade difratada com a temperatura para películas finas de Ni-Ti obtidas por evaporação térmica (Fernandes, 2013).

## 2.4. Modelação de uma Mola de Ni-Ti

A modelação da liga com memória de forma é determinada pela força e deflexão ou alongamento máximo requerida pelo protótipo, condicionada sempre pelo espaço existente para os atuadores.

### 2.4.1 Dimensionamento da mola de Ni-Ti

As equações necessárias são:

A deflexão:

$$\delta = \frac{8PD^2n}{Gd^4} \quad (2.2)$$

A distorção:

$$\gamma = \frac{\delta d}{\pi n D^2} \quad (2.3)$$

Tensão de corte:

$$\tau = \frac{8PDk}{\pi d^3} \quad (2.4)$$

Fator de correção de tensão:

$$k = \frac{4C-1}{4C-4} + \frac{0.615}{C} \quad (2.5)$$

Módulo de distorção:

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (2.6)$$

Índice de mola:

$$C = \frac{D}{d} \quad (2.7)$$

Legenda as equações acima apresentadas:

- D – diâmetro da mola
- d – diâmetro do arame
- n – número de espiras
- P – tensão na mola
- $\tau$  – tensão de corte
- G - módulo de distorção
- C – índice de mola
- $\gamma$  – distorção de corte
- $\delta$  – deflexão
- k - Fator de correção de tensão

A força que o atuador consegue exercer é determinada pelo diâmetro do arame em associação com o diâmetro da mola. Se se aumentar um deles ou os dois obtém-se um aumento da tensão máxima exercida pela mola.

A extensão permitida é função do número de espiras da mola.

Para obter as características dimensionais necessárias para a produção de uma mola com as características previamente definidas, é necessário saber três características da liga empregue no atuador:

- A tensão máxima de corte ( $\tau_{max}$ ) em Mega Pascal [MPa].
- O módulo de corte na alta temperatura ( $A_f$ ) ( $G_H$ ) [MPa].
- O módulo de corte na baixa temperatura ( $M_f$ ) ( $G_L$ ) [MPa].

Com o intuito de se obter as características finais da mola é necessário os seguintes dados:

- O índice de mola
- A força que pretendemos obter do atuador.
- O comprimento de ação da mola.

O índice de mola, que consiste na relação entre o diâmetro da mola e o diâmetro do fio, é uma escolha arbitrária. Contudo, por norma é escolhido um valor próximo de 6 por ser um valor que permite um bom enrolamento (Ohkata e Suzuki, 2008).

Primeiramente, é calculado o diâmetro do arame de Ni-Ti recorrendo às equações 2.4 e 2.6. Seguidamente, com recurso à equação 2.7 é determinado o diâmetro da mola. A obtenção do número de espiras recorre à equação 2.3. As extensões entre a alta temperatura e baixa temperatura são obtidas através da subtração das fórmulas, para ambas as temperaturas, pela equação 2.6.

A extensão obtida na baixa temperatura é um valor que irá influenciar o tempo de vida do atuador. Desta forma, para se obter um número de ciclos superior, torna-se indispensável a sua redução para um valor que se distancie do valor em que inicia a deformação plástica. É referido por Ohkata e Suzuki (2008) que geralmente o valor de  $Y_s$  (diferença de extensão a alta e baixa temperatura) é idêntico a valor de  $Y_L$  (extensão a baixa temperatura). Nos casos em que o valor de  $Y_L$  é excessivo, é frequente recorrer ao valor de  $Y_{max}$  da liga, que corresponde a um tempo de vida, em ciclos, desejado, Tabela 2.3.

**Tabela 2.3** – Parâmetros de ligas com memória de forma de base Ni-Ti (Ohkata e Suzuki, 2008).

Alloy type	$\tau_{max}$	$\gamma_{max}$	$G_H$	$G_L$	Fatigue life
Ti-Ni (R-phase)	120 MPa	1.0%	23 000 MPa	8000 MPa	$> 10^6$
Ti-Ni-Cu	250 MPa	2.0%*	17 000 MPa	2000 MPa	$10^4$

\* 5.0% if used as a straight wire

É calculado, com o novo valor de extensão máxima, o número de espiras ativas.

Em diversas aplicações o espaço para os atuadores é limitado. Nestas situações, e de forma a limitar o diâmetro máximo da mola, Ohkata e Susuki (2008) referem um método gráfico para obter um valor de diâmetro de mola dentro dos valores adequados, Figura 2.16.

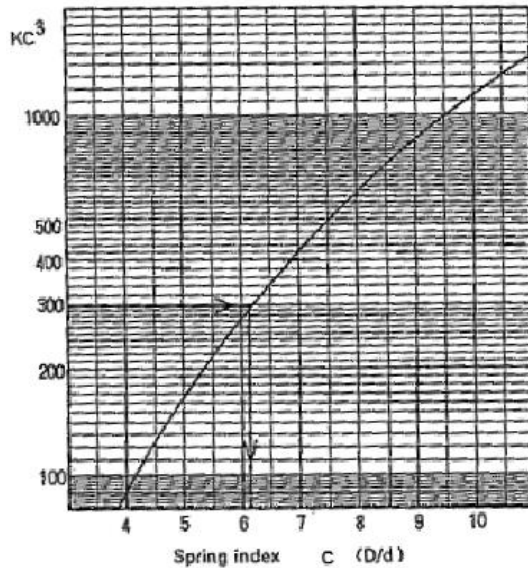
As equações envolvidas são:

$$kC^3 = \frac{\pi D^2 \tau}{8P} \quad (2.8)$$

$$n = \frac{S}{\pi CDY_s} \quad (2.9)$$

Legenda as equações acima apresentadas:

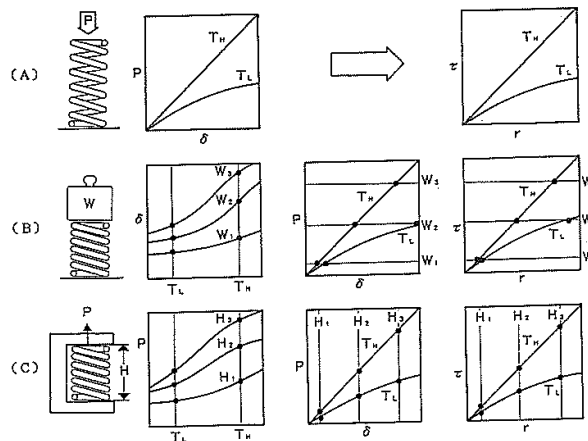
- D – diâmetro da mola
- n – número de espiras
- P – tensão na mola
- $\tau$  – tensão de corte
- C – índice de mola
- $Y_s$  – Curso de trabalho
- k – Fator de correção de tensão



**Figura 2.16** – Gráfico de modelação de molas Ni-Ti para obtenção do valor de índice de mola. (Ohkata e Suzuki, 2008)

Recorrendo à equação 2.8 calcula-se  $KC^3$ , que ao aplicar esse valor no gráfico da Figura 2.16, obtém-se o valor do índice de mola.

Para situações de modelação que requeiram a obtenção do módulo de distorção, pode recorrer-se à equação 2.6. Os valores de tensão de corte são obtidos experimentalmente segundo 3 métodos exemplificados na Figura 2.17. Os métodos B e C são os que permitem uma maior precisão do valor da deflexão.



**Figura 2.17** – Ilustração de três métodos díspares para determinar a relação entre a carga e a deflexão da mola de Ni-Ti. (A) Gráfico de correlação de Carga e deflexão a temperatura constante; (B) Gráfico de correlação de Temperatura e deflexão; (C) Gráfico de correlação de temperatura e carga com deflexão da mola constante (Ohkata e Suzuki, 2008).

O desenho do gráfico de correlação da tensão com a extensão do atuador, seguindo as instruções de Ohkata e Suzuki (2008), é feito através da curva de tensão - extensão da mola de retorno, que é usualmente de rigidez idêntica à mola de Ni-Ti no estado martensítico. A reta



contrário. Quanto menor é a extensão da mola de Ni-Ti menor será a força disponível para trabalho.

### Dimensionamento da mola de retorno

No dimensionamento da mola de retorno, primeiramente retira-se do gráfico o valor de extensão máxima obtido pela diferença entre o ponto onde a curva da mola de retorno cruza o eixo dos XX e o ponto onde cruza a linha correspondente à extensão mínima da mola de Ni-Ti.

A deformação máxima da mola de retorno corresponde a:

$$\delta_{max} = \frac{S \cdot X''Y}{B'X''} \quad (2.10)$$

$$P_{max} = \frac{P \cdot X'X''}{XX'} \quad (2.11)$$

Obtém-se então a constante de mola da mola de retorno:

$$K = \frac{P_{max}}{\delta_{max}} \quad (2.12)$$

Legenda das equações acima:

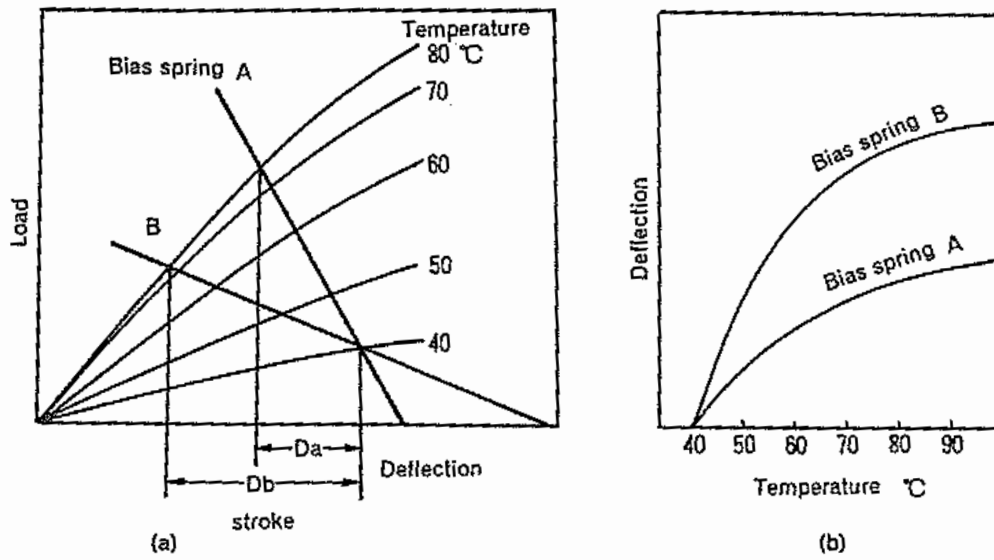
- S – extensão do movimento.
- X''Y – deformação máxima da mola de retorno.
- B'X'' – diferença entre a extensão máxima e mínima que o atuador obtém entre as posições de alta e baixa temperatura.
- XX' – tensão máxima útil do atuador.
- $\delta_{max}$  – deflexão máxima.
- XX'' – tensão da mola de retorno.
- P<sub>max</sub> – carga máxima.
- K – constante da mola de retorno.

O cálculo do diâmetro da mola de retorno é obtido considerando o módulo de corte para a liga e a sua tensão máxima, e assumindo um fator de correção de tensão.

Usando a equação 2.4 da tensão de corte determina-se o diâmetro do arame e através da fórmula 2.13 determina-se o número de espiras.

$$n = \frac{Gd^4\delta_{max}}{8P_{max}D^3} \quad (2.13)$$

As características do atuador estão relacionadas com as características da mola de retorno. Dependendo da rigidez da mola, o atuador poderá necessitar de uma temperatura diferente para ser ativado, verifica-se variação das temperaturas de atuação assim como da força e o curso máximo do atuador.

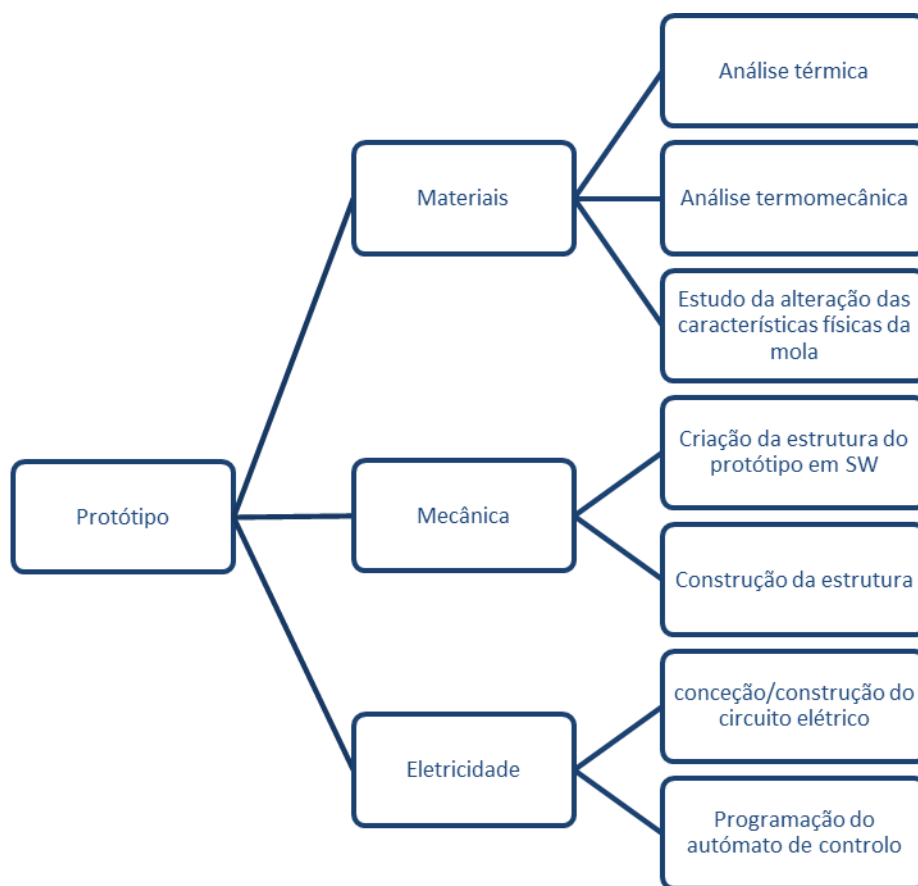


**Figura 2.20** – Influência da dureza da mola de retorno no curso de um atuador. (a) Gráfico de carga em função da extensão da mola de Ni-Ti e temperatura a que se encontra. (b) gráfico de extensão de mola de Ni-Ti em função da temperatura sujeita a 2 molas de retorno diferentes.

### 3. Materiais e métodos.

No âmbito deste projeto propôs-se a construção de um protótipo que levasse a cabo a demonstração das capacidades e eventuais desvantagens da aplicação das ligas com memória de forma como sistema de propulsão submarino tipo barbatana caudal. Tendo como objetivo esta ideia, prosseguiu-se um estudo para agregar ideias para a construção do protótipo.

Na Figura 3.1 é apresentada a metodologia deste trabalho.



**Figura 3.1** – Fluxograma da metodologia para a realização do projeto.

Os atuadores de LMF que foram empregues neste trabalho foram disponibilizados pelo orientador (FCT – CENIMAT), pelo que apenas foram estudadas as suas características termomecânicas de forma a prever o comportamento do atuador quando aplicado na estrutura da barbatana.

Após ter dados sobre as características das molas de Ni-Ti, principiou-se o projeto em *SolidWorks* de duas possíveis estruturas para a realização da barbatana com versatilidade que permitisse a variação de parâmetros como:

- Braços de força;
- Ângulos dos atuadores;
- Extensão máxima dos atuadores;

Para a realização deste projeto foi necessário utilizar uma estrutura que permitisse reproduzir um movimento ondulatório acionado por um conjunto de atuadores de liga de Ni-Ti, um sistema de controlo de abertura e fecho do sinal elétrico para os atuadores, uma fonte de energia e um limitador de corrente para proteger as molas de Ni-Ti. O circuito elétrico de alimentação das molas foi pensado para fazer face ao consumo solicitado por 16 atuadores (no máximo 8 ao mesmo tempo), permitindo o controlo do tempo de atuação de cada atuador assim como a sequência de ação. Foi também idealizado um sistema de arrefecimento por ar de convecção forçada.

Foi construída uma folha de cálculo Excel para encontrar, através de dados de entrada das características que se pretende e de dados do material que compõe a mola, as dimensões físicas do atuador de Ni-Ti com a força e curso necessários. Esta folha de cálculo permite, através da informação relacionada com as dimensões da estrutura e com o espaço disponível, maximizar o rendimento do atuador.

### **3.1. Materiais**

O material estudado para a construção do sistema de propulsão é uma liga metálica constituída por Níquel (Ni) e Titânio (Ti). A composição química desta liga não é fornecida pelo fabricante, não obstante, sabe-se que é uma liga rica em Titânio, já que as temperaturas de transformações estão acima da temperatura ambiente. A sua forma macroscópica é uma mola helicoidal com um comprimento contraído de 12 mm, um diâmetro de 5 mm e um diâmetro de fio de 0,8 mm. A distensão máxima da mola do atuador foi limitada com um curso de 20 mm.

## 3.2. Métodos Experimentais

### 3.2.1 Ensaios Termomecânicos

Na primeira secção dos métodos experimentais lidou-se com a caracterização experimental da liga Ni-Ti que compõe os atuadores recorrendo primeiramente a um teste DSC, um teste puramente térmico. Numa segunda parte foram realizados ensaios de natureza termomecânica recorrendo à máquina de tração. Os diversos ensaios realizados na máquina de tração resumem-se a dois tipos:

- Ensaio de força com travessão da máquina de tração fixo (extensão fixa) e intensidade de corrente variável (correspondendo a temperatura da mola variável).
- Ensaios de tração com extensão variável mas com intensidade de corrente constante dentro do regime de funcionamento do efeito de superelasticidade (com uma temperatura próxima do regime estável).

#### Calorimetria Diferencial de Varrimento (DSC)

A análise por DSC é um teste de utilização recorrente na análise das transformações de fase. Esta análise permite medir a energia libertada e absorvida pela amostra a partir da variação da temperatura ao longo de um ciclo térmico de aquecimento e arrefecimento. As amostras deste ensaio não se encontram sujeitas a tensões pelo que apenas fornece informação sobre a transformação induzida termicamente em função da composição química e do estado estrutural da amostra.

O ensaio DSC foi realizado no equipamento DSC 204 F1 Phoenix existente nas instalações do CENIMAT (UNL-FCT) para determinar as características da liga Ni-Ti utilizada. Para a realização da análise, foram preparadas 2 amostras de mola, com cerca de 50 mg devidamente pesadas numa balança de alta precisão. Uma das amostras pertence a uma mola que não exerceu esforços (mola nova), a outra amostra pertence a uma mola que foi sujeita a um ensaio que durou cerca de 24 horas, totalizando aproximadamente 1000 ciclos de transformação de fase.

O processo de preparação das amostras passou pela limpeza da superfície da mola de Ni-Ti através de uma solução ácida de  $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$ , nas proporções 1 : 5 : 10. Após a preparação das amostras, estas foram colocadas no DSC para a realização do teste.

Os termogramas presentes nos resultados consistiram num arrefecimento de 150 °C para -30 °C a uma taxa de 10 °C/min acompanhado da transformação da fase austenítica (B2) em martensite (B19') com a evolução do arrefecimento. O ciclo de aquecimento consiste no processo inverso com a mesma velocidade de variação térmica até voltar a atingir os 150 °C ocorrendo a transformação inversa (de martensite (B19') para austenite (B2)).

Foram determinadas as temperaturas de transformação, a histerese térmica da liga, bem como os tipos de transformação que se verificam no intervalo de temperaturas definido. Por conseguinte, comparou-se as diferenças observadas nos termogramas do DSC de ambas as amostras.

É importante referir que estes valores não correspondem realmente ao início ou ao fim das transformações. Como foi dito na introdução estes valores correspondem ao início explícito e com crescimento exponencial de transformação de fase. Os espreiamentos ao longo da temperatura correspondem a uma percentagem residual da transformação total. Estas temperaturas foram encontradas pelo método do cruzamento das tangentes da linha de base e da linha de pico.



**Figura 3.2** – Equipamento DSC 204 F1 Phoenix do CENIMAT da FCT.

### **Ensaio Termomecânicos**

Para a caracterização mecânica das molas de Ni-Ti foram realizados diversos ensaios na máquina de tração SHIMADZU Autograph AG-G Séries do CENIMAT com uma célula de carga de 500 N à temperatura ambiente.

Os atuadores foram fixados através de duas garras de metal isoladas com duas folhas de lixa entre a garra e o atuador, evitando o contacto elétrico.

A fonte térmica usada para o aquecimento do arame da mola de Ni-Ti foi o efeito de Joule produzido através da passagem da corrente elétrica na mola de Ni-Ti. Para este efeito, recorreu-se uma fonte de alimentação de corrente contínua de intensidade variável, ligada através de um fio soldado à extensão de latão da mola e outro fio enrolado à ponta da mola com um pingo de solda de estanho por cima para o prender (mas não deixando sobreaquecer a mola).

Os ciclos térmicos dos ensaios foram conduzidos de maneira a serem sempre atingidos os patamares de estabilização de força (máximo e nulo).

Para realizar o ensaio sobre diferentes métodos de arrefecimento (arrefecimento por convecção natural e arrefecimento por convecção forçada de ar), recorreu-se a um termo ventilador no modo *ventilação* de modo a permitir a transmissão térmica por convecção forçada.

### **Ensaio termomecânicos com travessão da máquina de tração fixo para medição de força.**

Os ensaios de molas de Ni-Ti individuais decorreram sujeitos a variações individuais de diversos parâmetros tais como a extensão, o método de arrefecimento e intensidade de corrente. Estas variações permitiram compreender a influência destes parâmetros na frequência dos ciclos de força do atuador e na força disponível ao longo do curso do atuador.

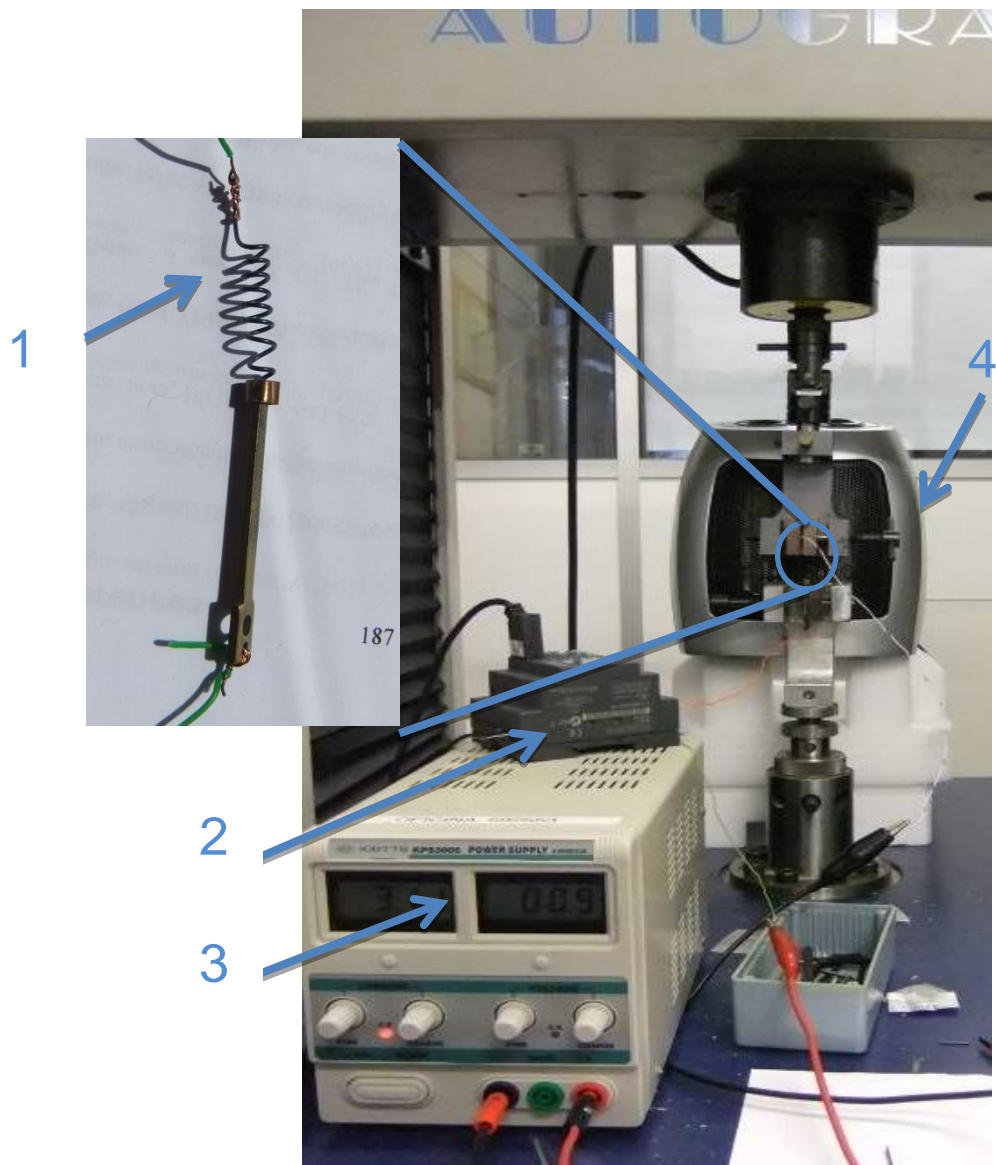
Os testes com extensão fixa foram realizados sequencialmente com intensidades de corrente sucessivamente maiores. No final de cada série foi aumentada a distensão da mola. Seguindo esta sequência de ideias, no fim dos ensaios com arrefecimento por convecção natural, alterou-se o método de arrefecimento repetindo-se os ensaios. É de referir que as molas foram trocadas sempre que se iniciaram ensaios com extensões menores, de forma a reduzir a influência da fadiga e da deformação não recuperável sofrida durante os ensaios anteriores nos resultados obtidos.

Os ensaios realizados estão resumidos, com os respetivos parâmetros, na Tabela 3.1. A cor verde corresponde aos parâmetros de ensaios realizados. Relativamente às intensidades de corrente acima dos três amperes, estas não foram estudadas com arrefecimento passivo uma vez que o aumento de temperatura resultaria num arrefecimento mais prolongado, consequentemente o período de um ciclo seria muito mais amplo.

Com estes ensaios pretendeu-se estudar principalmente a capacidade de realização de força das molas de Ni-Ti sujeitas a diversas intensidades de corrente elétrica, assim como a frequência de atuação da mola para um ciclo de EMF completo.

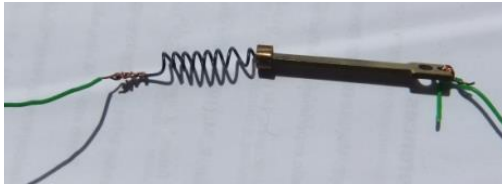
**Tabela 3.1** – Mapa de testes de medição de força com travessão fixo.

d(milímetros) x I (Amperes)	Arrefecimento passivo			Arrefecimento ativo		
	10	15,0	17,5	12,5	15,0	17,5
1,5	Red	Green	Red	Red	Red	Red
1,6	Red	Green	Red	Red	Red	Red
1,8	Red	Green	Red	Red	Red	Red
1,9	Red	Green	Red	Red	Red	Red
2,2	Green	Green	Green	Red	Red	Green
2,5	Green	Green	Green	Red	Red	Green
2,8	Green	Green	Green	Red	Red	Green
3,1	Red	Red	Red	Green	Red	Green
3,6	Red	Red	Red	Green	Green	Red

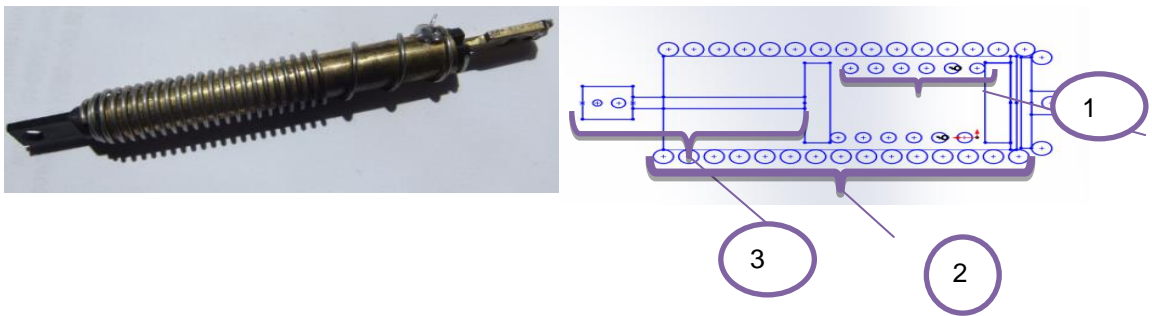


**Figura 3.3** – Ensaio realizado na máquina de tração SHIMADZU Autograph AG-G Séries no CENIMAT da FCT 1) mola em teste; 2) temporizador de corrente; 3) fonte de corrente; 4) termo ventilador.

Numa primeira instância, os testes foram conduzidos com o atuador, (mola de Ni-Ti dentro de um invólucro de latão), como se pode ver na Figura 3.5. No entanto, o atuador apresentou um arrefecimento deficiente, fruto do isolamento da mola de Ni-Ti com o ambiente. Para solucionar o problema, optou-se por desmontar o atuador utilizando apenas a mola de Ni-Ti contida no interior, como se verifica na Figura 3.4. Esta alteração permitiu reduzir de forma considerável o tempo de arrefecimento da mola, não influenciando a fase de aquecimento de forma notória.



**Figura 3.4** - Mola de Ni-Ti com memória de forma do atuador



**Figura 3.5** – Atuador com liga com memória de forma. (1) mola de Ni-Ti; (2) mola de aço; (3) tirante.

Os ensaios para simular um sistema de arrefecimento ativo das molas de Ni-Ti durante a fase de arrefecimento da mola foram conduzidos com o termo ventilador, no modo de ventilação sem aquecimento do ar, disposto o mais próximo possível das garras da máquina de tração. Por precaução, o ventilador foi colocado numa base de esferovite de alta densidade para prevenir transmissão de vibrações à célula de carga da máquina de tração.

Este estudo visou analisar o aumento de frequência de ação do atuador de Ni-Ti quando sujeitos a um sistema de arrefecimento ativo por ar. Nestes ensaios é necessário ter em conta que, por motivos de simplificação, o ventilador esteve em funcionamento durante o ciclo completo, o que justifica a necessidade de incremento da intensidade de corrente para aquecimento de modo a compensar as perdas de calor durante a fase de aquecimento justificadas pelo aumento da velocidade do ar.

O processo de controlo do tempo da fase de aquecimento e de arrefecimento foi inicialmente realizado manualmente através do interruptor da fonte de alimentação, permitindo assim determinar o tempo necessário para a estabilização da força da mola de Ni-Ti quer no

patamar superior, quer no patamar inferior para cada intensidade, extensão de mola e modo de refrigeração. Com estes dados modelou-se o programa do autómato *siemens logo!* previamente realizado para controlar os tempos de abertura e fecho do circuito elétrico para os ensaios. A programação do autómato irá ser referida posteriormente em pormenor.

### **Ensaio termomecânicos de tração**

Os diversos ensaios realizados tiveram como característica principal a distância entre garras variável entre 0 e 22 mm. O curso foi realizado a velocidade constante pela máquina de tração: 30 mm/min. A corrente elétrica foi mantida constante no atuador para determinar qual seria a perda do EMF com o decorrer dos ciclos do atuador de Ni-Ti e analisar a força correspondente ao longo de todo o curso do atuador. É importante sublinhar que foi sempre usada a mesma mola para os 4 ensaios descritos abaixo. Este facto pode ter influenciado a tendência de perda de força durante os ciclos iniciais e uma tendência para ter reduções de força cada vez menores ao longo dos ensaios seguintes, e conseqüentemente com o aumento da intensidade da corrente elétrica.

### **3.2.2 Dimensionamento e construção da estrutura da barbatana.**

Na construção da estrutura do protótipo para testar a viabilidade da aplicação de atuadores com memória de forma, teve-se em consideração a diversa literatura existente nesta área, como referência do que já foi feito e do que pode ser melhorado. Os protótipos que suscitaram maior interesse foram:

- O hydrofoil de Rediniotis *et al.*, (2000);
- O hydrofoil de Garner *et al.*, (2000);
- O “biomimetic Tuna de Suleman e Crawford (2009).
- A revisão dos meios de propulsão realizados até então através de diversos tipos de atuadores de Chu *et al.*, (2012);

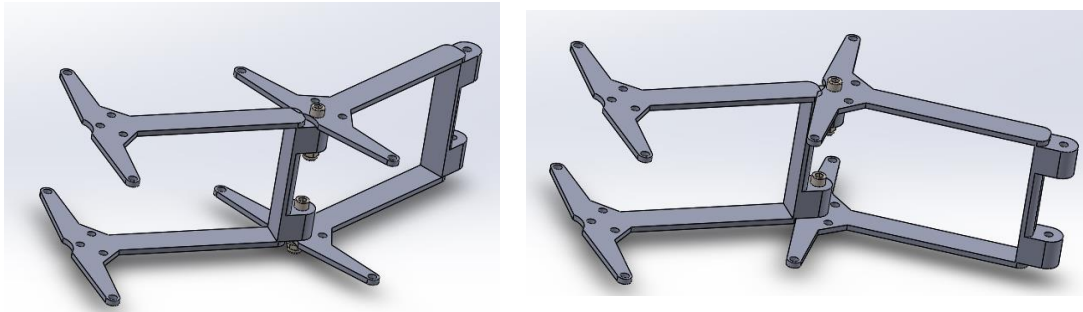
A construção de uma estrutura que permita um movimento ondulatório próximo do movimento dos peixes carangiforme é descrita em seguida.

A linha de raciocínio principiou na ideia de que o movimento de cada segmento seria realizado através de atuadores antagónicos à imagem da estrutura muscular normal de uma barbatana caudal.

Dentro deste conceito, surgiram diversas ideias para a possível estrutura de barbatana caudal.

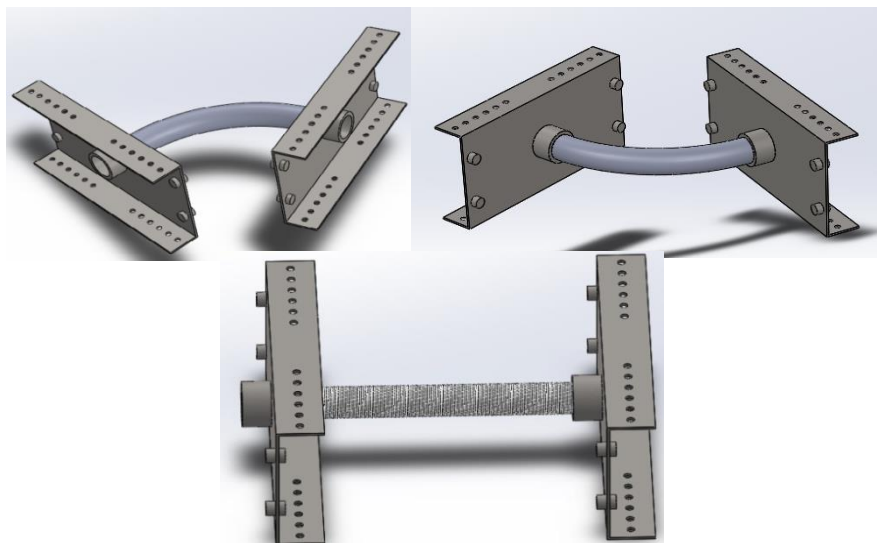
1. A primeira hipótese que surgiu consiste em estruturas em “U” idênticas, acopladas umas às outras por um sistema de veio/dobradiça. A força das molas seria aplicada

aos braços laterais em forma de “T” que permite aumentar o braço de força do atuador para obter maior binário sobre o eixo de rotação. Quanto maior é a distância da ligação do atuador ao centro de rotação, maior se torna o momento torsor para a mesma força. Tendo em conta essa propriedade, é necessário calcular o melhor rácio entre o ângulo máximo que o atuador pode realizar, tendo em conta a distensão máxima permitida pela mola de liga Ni-Ti e o momento torsor que pretendemos obter para gerar força de propulsão, Figura 3.6.



**Figura 3.6** – Estrutura 1, SW2013.

2. A segunda hipótese considerada consiste em usar um sistema de atuação antagónico muito semelhante ao descrito no ponto 1, no entanto com alteração da estrutura central,
3. Figura 3.7. Neste caso, a estrutura recorre a uma mola de espirais unidas (mola de tração) para uma espinha dorsal a todo o comprimento da barbatana caudal, passando no centro de cada divisória de segmento. Os segmentos são divididos por chapas quinadas em “U” (extensões para fixar as molas de liga Ni-Ti).



**Figura 3.7** – Estrutura 2, SW2013.

A segunda estrutura foi escolhida para este projeto por permitir um movimento mais harmonioso. O risco na aposta de uma nova estrutura foi minimizado com a existência da primeira estrutura caso se verificasse a inviabilidade da *mola espinal*. Não foi encontrada, durante a realização deste trabalho, nenhuma estrutura para a realização de um sistema de propulsão aquático que recorresse a uma mola para permitir os graus de liberdade necessários ao movimento da barbatana. No entanto, verificou-se a aplicação de um elastómero para o mesmo efeito referido por Garner *et al.*(2000).

Outros aspetos relevantes do uso de uma estrutura em mola são:

- A força da mola “espinal” após ser deformada tende a auxiliar o retorno à posição intermédia do atuador contraído após o seu devido arrefecimento.
- A possibilidade de produzir movimentos com mais graus de liberdade e não apenas um grau de liberdade. Dado que o sistema muscular da barbatana de um peixe permite também diversos graus de movimento, considerou-se que iria ao encontro ao sistema procurado.
- A segmentação da mola ambiciona um movimento mais harmonioso que três segmentos rígidos.
- O comportamento desconhecido para este tipo de aplicação.

O método de animação da barbatana consiste na mímica do sistema muscular da barbatana caudal, com isto entende-se que, para ter deformação para um bordo, o atuador desse mesmo bordo iria contrair através da passagem de corrente elétrica que, por efeito de Joule, iria aquecer a mola de Ni-Ti induzindo a transformação de martensite em austenite até atingir a sua forma contraída. Durante a alteração de fase desenvolvem-se forças que através da superfície da barbatana caudal permitem obter propulsão. Ao atingir a sua compressão máxima, é cortado o sinal elétrico para esse atuador através do autómato. Desta forma, a mola de liga Ni-Ti é arrefecida, o que permite a transformação de fase inversa. Com a atuação do atuador oposto, após o devido arrefecimento do anterior, a barbatana deforma-se para o outro bordo. O atuador que se encontra no estado martensítico é assim deformado até à sua posição de extensão máxima ficando pronto para um novo aquecimento.

Para estudar o efeito de um sistema de arrefecimento mais eficaz, procedeu-se também ao estudo das capacidades da mesma estrutura mas em que os atuadores tenham um sistema de arrefecimento ativo para estudar as suas vantagens ao nível da frequência dos atuadores.

## Construção

A Estrutura em “U” de suporte para os atuadores foi sujeita a testes virtuais de carga recorrendo ao *simulation study do SW2013* para determinar o comportamento da estrutura com uma espessura de 1,5 mm em aço inoxidável AISI 316. Os testes realizados permitiram prever as deformações da estrutura quando sujeitas à força dos atuadores e verificar as tensões máximas a que a estrutura estará sujeita. Os resultados realizados com 40 N foram positivos, não sendo verificadas deformações plásticas na estrutura como se pode analisar em pormenor no anexo D.

A seleção dos materiais da estrutura da barbatana não teve em consideração a redução de peso mantendo a resistência estrutural, pois iria aumentar em muito o preço final. Atendendo ao protótipo estar ainda numa fase muito inicial, optou-se por realizar a estrutura principalmente com materiais disponíveis nas oficinas existentes em diversas unidades de Marinha, Departamento de Propulsão e Energia (DPE) e Escola Naval (EN), permitindo reservar algum orçamento para outros equipamentos necessários à construção do protótipo.

A estrutura, como previamente referido, foi concebida para realizar ensaios pelo que se teve o cuidado de realizar uma estrutura que admitisse diversas posições das molas, assim como diversas distâncias entre segmentos.

Para a construção da estrutura proporcionou-se adquirir uma mola de espiras unidas com as características pretendidas: 600 mm de comprimento, 12,2 mm de diâmetro e 2 mm de diâmetro de arame de aço, Figura 3.8.

A estrutura em “U” de sustentação dos atuadores foi concebida numa chapa de aço de 1,5 mm de espessura cedida pelo DPE da Escola de Tecnologias Navais da Armada (ETNA). Foram traçadas as medidas de 4 retângulos 200 mm X 130 mm posteriormente cortados. A chapa foi limpa com lixa média e removidas as rebarbas existentes do corte com uma lima. Em seguida foram riscadas as linhas para quinar a chapa e marcadas as posições de furação da chapa. A parte superior e inferior do “U” ficaram com um comprimento de 25 mm após serem cuidadosamente quinadas na quinadeira para obter um “U” com ângulos de 90°.

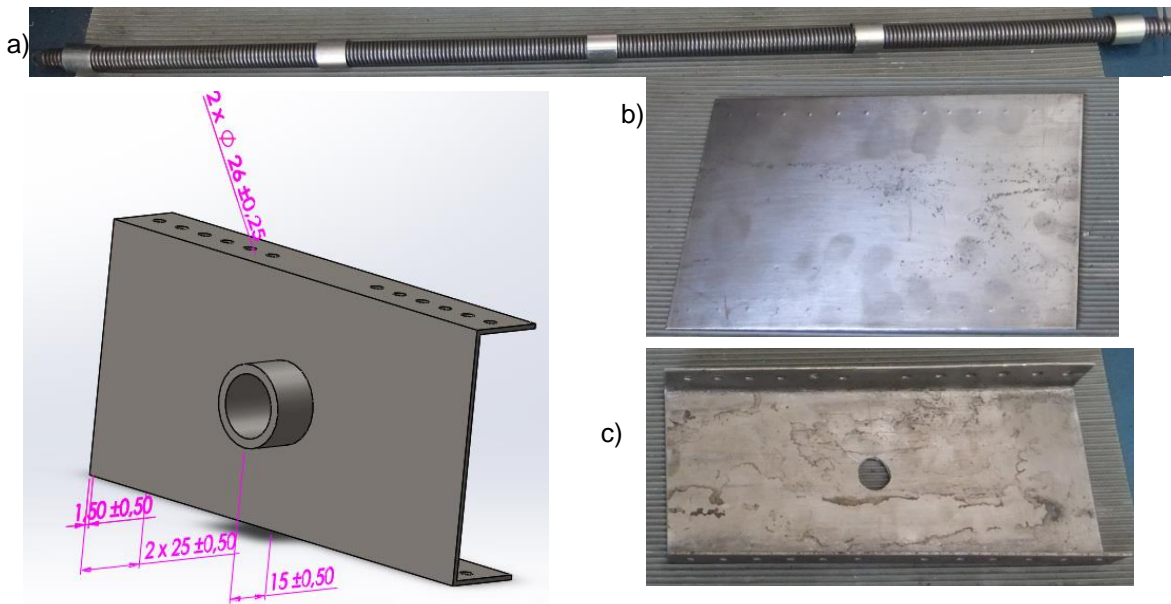
Os furos para acoplar as molas às chapas foram realizados com uma broca M5 a baixa rotação, posteriormente acabados com uma broca M12 para chanfrar o rebordo. Colocou-se em cada um destes buracos um rebite com rosca, em alumínio, para acomodar o parafuso de sustentação das molas de Ni-Ti.

O furo central para a passagem da mola foi aberto com uma broca M5 e expandido com uma broca de M12, posteriormente retificados com uma lima de perfil redondo até obter o diâmetro externo dos cilindros de forma a entrarem sem folga e assim facilitar a realização da soldadura entre os dois. Os cilindros para fixar a chapa à mola foram escolhidos com um diâmetro interno ligeiramente inferior ao diâmetro da mola para que estes possam entrar através da aplicação de um momento de torção na mola, reduzindo o diâmetro da mola graças às características elásticas do aço, permitindo encastrar os cilindros na mesma ao recuperar a

forma inicial. Através desse método é possível alterar o comprimento de cada segmento se necessário.

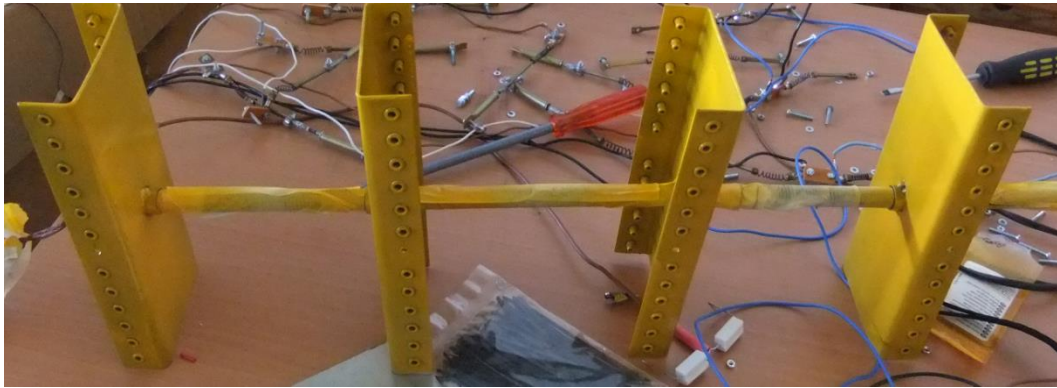
A soldadura de cada cilindro à sua estrutura em “U” requereu, primeiramente, a remoção da proteção de zinco para ligar os dois elementos. Sendo a chapa e o cilindro de apenas 1,5 mm, a soldadura não pode ser realizada a toda a volta em forma de anel já que haveria possibilidade de ocorrer deformação da peça e soldar inclusivamente a mola. Optou-se por isso por aplicar apenas dois pingos de solda, desfasados de 180° de cada lado da chapa, usando o método de soldadura por arco elétrico com elétrodo revestido de aço inoxidável, Figura 3.9.

As chapas foram fixas na mola distanciadas entre elas de 150 mm de forma paralela entre elas, Figura 3.10. Esta distância revelou-se ser adequada tanto para o uso de 2 atuadores em série por segmento como para o uso de apenas 1 atuador, aplicando um tensor para a regulação da distensão máxima da mola.



**Figura 3.9** – Estrutura “U” dos segmentos, SW2013.

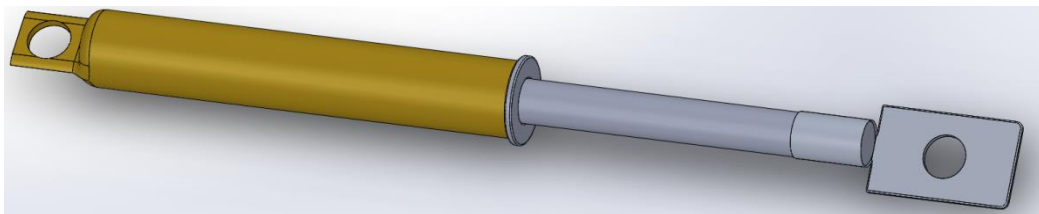
**Figura 3.8** – Fases da construção da estrutura; a) mola da estrutura com os cilindros para fixar a estrutura c); b) chapa cortada com a marcação dos portos de furação; c) chapa b) furada e quinada para estrutura “U”.



**Figura 3.10** - Estrutura após montagem.

### **Construção dos tensores.**

A necessidade de realizar um protótipo que fosse modelável influenciou a necessidade de construir um sistema que permitisse alterar o comprimento do atuador. A construção iniciou-se com o corte de um tubo de latão em varias secções de 50 mm com auxílio de um cortatubos, um dos lados do tubo foi esmagado para fazer um furo M3 e aparafusar à estrutura. Do outro lado foi colocado um rebite de parafuso. Foi cortado um varão roscado de 40 mm para introduzir no rebite e assim controlar a extensão do tensor. A conexão ao atuador foi soldada a prata ao varão. As características do extensor são um comprimento variável entre os 50 mm e os 75 mm, Figura 3.11.



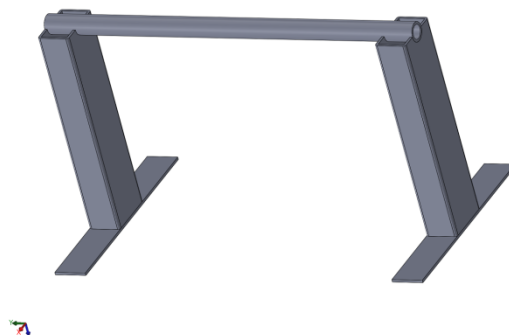
**Figura 3.11** – Tensor realizado em SW2013.

### **Construção do pórtico de suporte**

Para o protótipo poder ser empregue fora do seu meio de impulsão (meio aquático) teve que se construir uma estrutura para suportar o seu peso sem porém restringir de forma significativa o movimento ondulatório da estrutura e sempre de modo a causar o mínimo de atritos.

A estrutura de suporte consiste num pórtico, mostrado na Figura 3.12, construído a partir de uma viga de 700 mm de perfil quadrado furada a meio comprimento (350 mm) de modo a fazer um berço para a viga horizontal. Seguidamente, cortou-se essa viga a meio ficando o furo

em semicírculo. Foi soldada uma base de sustentação com 250 mm de comprimento aos dois pilares verticais para maior estabilidade.



**Figura 3.12** – Pórtico, SW2013.

Adquiriu-se um veio oco para a parte superior do pórtico. A sustentação da estrutura foi concebida através de fios de *nylon* com o mesmo comprimento, presos a cada uma das estruturas em "U" e ao veio, permitindo o isolamento elétrico do pórtico.

### 3.2.3 Sistema de arrefecimento

O sistema de arrefecimento, para estudar as possíveis vantagens de ter um circuito de arrefecimento direcionado para cada mola, foi estudado com a aplicação de uma ventoinha de 120 mm de diâmetro para cada segmento, com um fluxo de ar, fornecido pelo fabricante, de 80 m<sup>3</sup>/h montadas na parte inferior da estrutura mostrada na Figura 3.13.



**Figura 3.13** – Estrutura de suporte para as ventoinhas. A esquerda em desenho SW2013 e à direita após construção.

### 3.2.4 Construção e teste do circuito elétrico.

O sistema de energia para alimentar os atuadores e o programador foram pensados após a realização dos testes termomecânicos. Os dados obtidos permitiram ter uma noção da energia necessária para a realização de movimento dos atuadores com velocidade e força adequados para a barbatana. Como este sistema carecia de um controlo de corrente para cada atuador, houve a necessidade de realizar um controlador de corrente e um temporizador para abrir e fechar o circuito de forma sequencial e temporizada para cada atuador.

A fonte de energia para gerar o estímulo elétrico durante os ensaios na máquina de tração foi uma fonte de alimentação de intensidade e diferença de potencial variável.

A resistência da mola de arame Ni-Ti do atuador é aproximadamente  $0,3 \Omega$  no estado martensítico, medidos com um multímetro. Se lhe aplicarmos uma bateria de 12 V, a corrente de pico atinge cerca de 40 A no atuador recorrendo à equação

$$V = R * I \quad (3.1)$$

Para alimentar a estrutura da barbatana, foi necessário considerar o consumo energético máximo de 10 A por mola, somando um total de 80 A, (apenas podem trabalhar metade dos atuadores de cada segmento). A solução esteve na compra de uma bateria de automóvel de 12 V, com 44 Ah e 440 A de pico, que permite alimentar não só os atuadores, mas também o sistema de controlo e o sistema de arrefecimento, mantendo uma autonomia considerável.

Dado que a resistência elétrica proporcionada pelas molas é mínima, cerca de  $0,3 \Omega$  no estado martensítico, surgiu a necessidade de reduzir a intensidade de corrente elétrica. De outro modo ocorreriam movimentos bruscos pouco harmoniosos, movimentando instantaneamente a barbatana com acelerações que poderiam danificar tanto o atuador como os encastramentos, existindo também o risco de sobreaquecimento do atuador. A solução encontrada para reduzir a corrente foi a aplicação de resistências de potência bobinadas, cada atuador precedido de uma resistência correspondente a  $1 \Omega$ . Uma resistência de  $1 \Omega$  liberta, teoricamente, 90 W nessas condições, equação (3.2), pelo que por razões de dissipação térmica, optou-se por utilizar um dissipador de alumínio para encastrar as resistências.

O atuador será sujeito a uma intensidade de corrente não superior a 9,3 A e a diferença de potencial no atuador rondará os 2,8 V, sendo por isso a sua potência dissipada 26 W, equação (3.2).

$$P = \frac{V^2}{R} = R * I^2 = V * I \quad (3.2)$$

Legenda

- P – Potência (W)
- V – Diferença de potencial (V)
- R – Resistência ( $\Omega$ )
- I – Intensidade (A)

A intensidade de corrente utilizada não foi calculada para aumentar o tempo de vida da mola de Ni-Ti; foram apenas realizados diversos ensaios com diversas resistências até se encontrar uma resistência que proporcionasse um movimento suficientemente rápido mas sem acelerações que tornem o movimento pouco harmonioso.

Na cablagem elétrica optou-se pela ligação do negativo à massa metálica, dado que toda a estrutura é condutora, permitindo simplificar o número de cabos elétricos e ter mais manobrabilidade da estrutura. No que diz respeito ao isolamento dos terminais positivos da massa, para evitar curto-circuitos, após diversas tentativas com micas para transistors, ligações de plástico coladas no encastramento da mola com recurso a cola com base de cianoacrilato.

O uso de placas de baquelite entre o parafuso da chapa e o parafuso do atuador demonstrou-se fiável perante as temperaturas e tensões a que estava sujeito.

Os acessórios foram ligados diretamente à bateria pois funcionam com 12 V.

Para controlar os estímulos elétricos emitidos aos atuadores, de maneira a serem ativados sequencialmente e no momento certo, permitindo uma fase de arrefecimento e aquecimento adequados, desenvolveu-se um controlador de sinal. Devido ao curto espaço de tempo para a realização deste trabalho e porque existem no mercado controladores programáveis para esse efeito, optou-se por não construir um de raiz pois teria que ser testado, modelado e só posteriormente poder-se-ia operar de forma precisa. O controlo do sinal elétrico, temporizado através de temporizadores programados, foi realizado com o auxílio do autómato *Siemens LOGO!DM8 12/24RC*. Na análise dos produtos existentes no mercado para esse efeito, e tendo em consideração o preço e a sua modularidade, a escolha reverteu para este autómato.



**Figura 3.14** – Autómato *Siemens LOGO!DM8 12/24RC*

Este autómato funciona com uma alimentação de 12 V ou 24 V que alimenta a parte eletrónica de controlo “CPU” que recebe dados dos “Inputs” e da memória, executando nos “outputs” a abertura e fecho de relés e estes levam o estímulo elétrico aos atuadores. Os ciclos de oscilação térmica, que por si permitem a alternância de transformação direta (austenite-martensite) e inversa (martensite austenite) da liga Ni-Ti, podem ser provocados pelo estímulo de uma onda elétrica quadrada.

A onda quadrada tem que ter certos parâmetros controlados, dos quais:

- Um período ON e OFF controlados independentemente para cada atuador de Ni-Ti.
- Uma intensidade de corrente elétrica que seja suficiente para ativar a memória de forma dos atuadores, mas que não leve a uma subida de temperatura acima dos 120 °C.

A programação do autómato revelou-se fácil de modelar e bem adaptada às situações pretendidas, permitindo controlar com um único módulo os vários segmentos de atuadores de forma dependente e sequencial.

### Programação para 1 atuador

O programa utilizado para estabelecer a fase de aquecimento e de arrefecimento de forma controlada durante os ensaios na máquina de tração é muito semelhante ao programa final de controlo dos atuadores na estrutura.

Foram utilizados 1 *INPUT HIGH* para estabelecer o início do programa e um botão *INPUT* criado como *reset* permitindo parar a qualquer momento o ensaio ou reiniciá-lo. Ao ser ligado, o programa ativa um gerador de onda assíncrona, com temporizações estabelecidas correspondentes ao tempo ON/OFF do estímulo elétrico, para o atuador em ensaio, controlado através do solenoide do relé. O programa está desenhado na Figura 3.17.

### Programação do controlo da barbatana

A numeração dos atuadores abaixo facilita a compreensão do programa criado para o autómato, Figura 3.15.

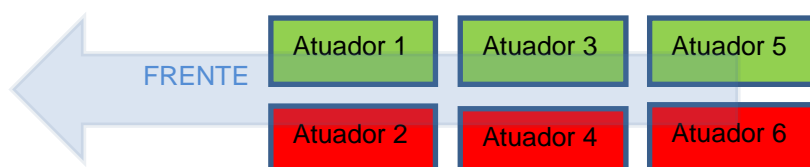
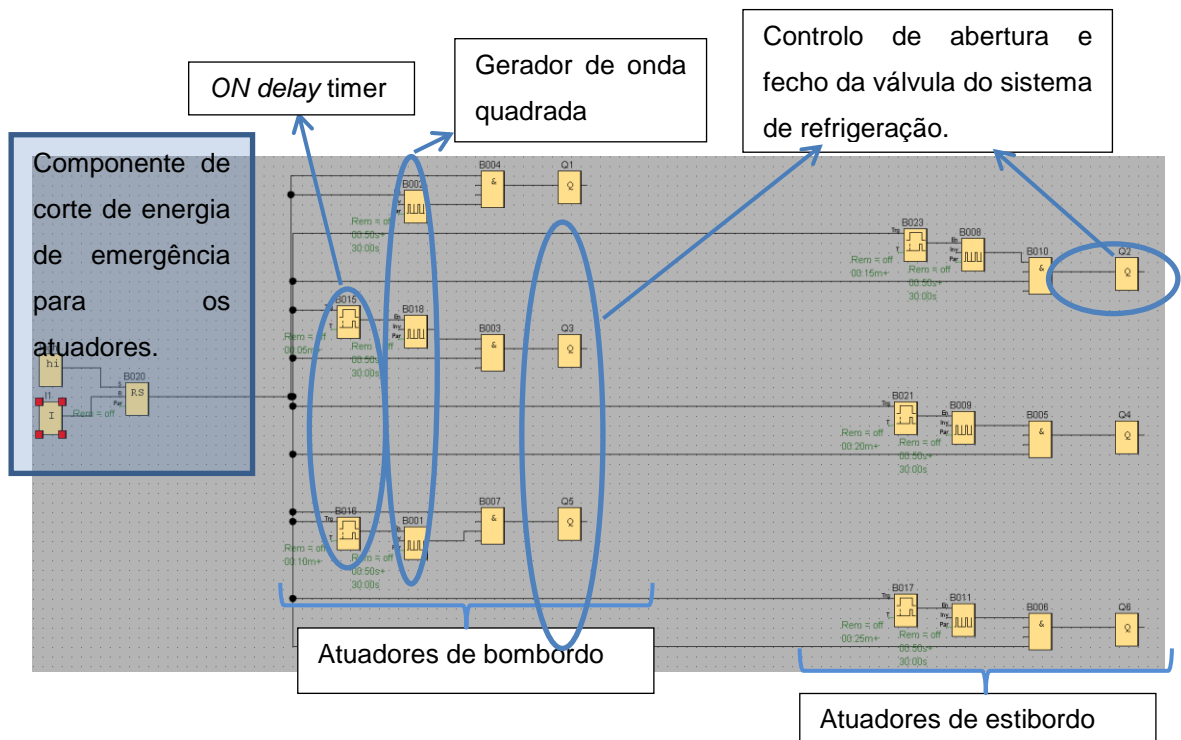
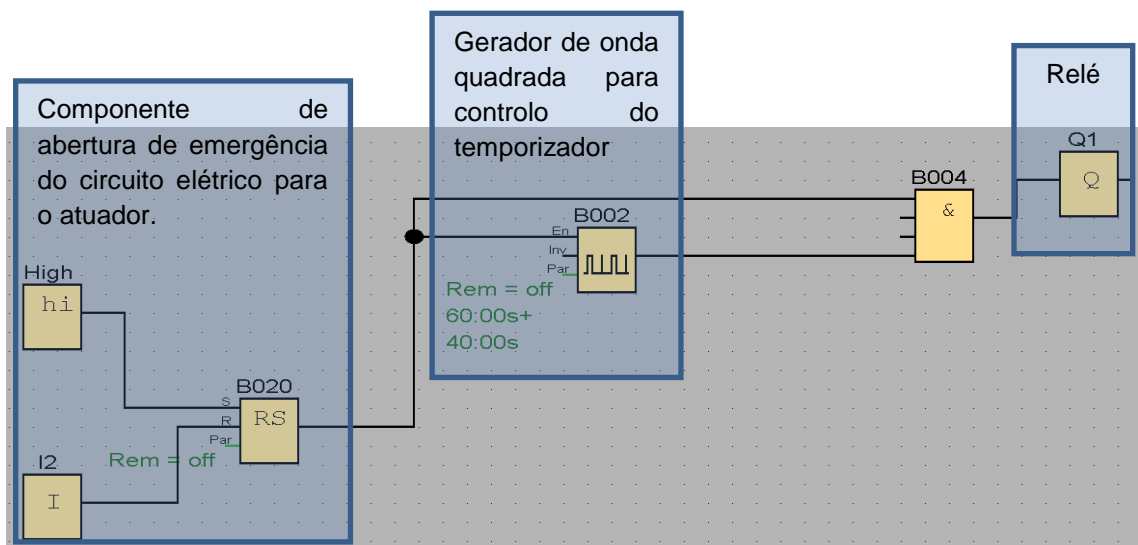


Figura 3.15 – Esquema da numeração dos atuadores

O programa de controlo da barbatana consiste, tal como no programa de controlo do estímulo elétrico realizado para os ensaios de tração, num sistema de paragem e início de programa através de um botão *INPUT*, dois geradores de onda para cada segmento da barbatana assim como dois *OUTPUTS* por segmento. Um *ON DELAY* para os atuadores de bombordo de cada segmento para atuar antagonicamente ao atuador do outro bordo. A partir do atuador 3 inclusive, cada segmento tem um *ON DELAY* para serem ativos de forma sequencial após o primeiro segmento.



**Figura 3.16** – Programa de controlo da temporização e abertura do sinal elétrico para os atuadores da barbatana.



**Figura 3.17** – Programa de controlo do atuador durante os ensaios de tração.

### 3.2.5 Caracterização da resposta mecânica de um segmento.

Determinar teoricamente o tipo de resposta que se pode esperar da estrutura foi uma das preocupações deste projeto. Através dos dados obtidos pelos ensaios de tração e as possíveis posições para os atuadores, realizaram-se os cálculos para determinar os momentos exercidos pelos atuadores na estrutura e os ângulos de inclinação de cada segmento da estrutura em relação à mediania para condições ideais. É de salientar que foi ignorado o valor da flecha da mola para estes cálculos.

Os atuadores na posição de menor comprimento têm 64,6 mm. Procurou-se não ultrapassar a extensão máxima estipulada de 20 mm de forma a prolongar a longevidade dos atuadores. Na posição intermédia, correspondente à posição reta da estrutura, o atuador não pode ter um comprimento superior a 74,6 mm; com esta medida garante-se que, quando totalmente contraído, o atuador antagónico não estende mais que 20 mm.

Na Tabela 3.2 são apresentados os resultados teóricos do binário e ângulo máximo obtidos para um segmento.

**Tabela 3.2** – Tabela de Forças e ângulos de deformação para um segmento da barbatana.

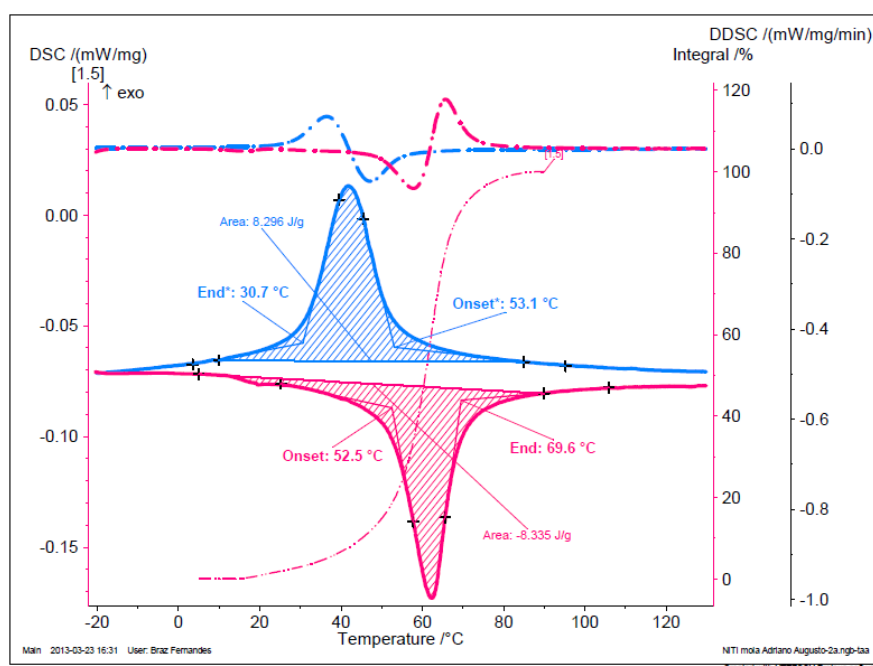
Distancia do atuador à linha de mediania [mm]	15	30	45	60	75
Ângulo máximo teórico [°] ( $Tg(a)=10/d$ )	34	18	13	9	8
Momento max. ( $F_{max} * d$ braço) [N.m]	0,54	1,08	1,62	2,16	2,7

## 4. Resultados e discussão de resultados.

### 4.1. Caracterização termomecânica das molas Ni-Ti.

#### 4.1.1 Análise DSC de uma mola (nova)

Os resultados obtidos por DSC da amostra de um atuador com poucos ciclos de utilização encontram-se no termograma da Figura 4.1, transcritos para a Tabela 4.1.



**Figura 4.1**– Resultados de ensaios DSC realizados sobre uma mola nova, antes de ser submetida a qualquer ciclo térmico ou mecânico: Termogramas e curvas derivadas para o ciclo de arrefecimento (azul) e para o aquecimento (vermelho).

**Tabela 4.1** – Temperaturas de transformação da mola nova (tal como recebida)

Temperaturas de transformação (°C)	
$M_s$	52,5
$M_f$	69,6
$A_s$	53,1
$A_f$	30,7

#### **4.1.2 Análise de resultados do ensaio DSC**

As transformações que se observam, como podemos notar na Figura 4.10, são unicamente de B2 diretamente para B19' durante o arrefecimento. Não é verificada, por este método, presença de Fase-R.

Os picos positivos e negativos no fluxo de calor, correlacionados com a temperatura, assinalam respetivamente as transformações exotérmicas (austenite-martensite) e endotérmicas (martensite-austenite).

### **4.2. Ensaio Mecânicos com travessão da máquina de tração fixo**

Os resultados dos ensaios realizados estão representados, pelos gráficos em Excel apresentados. No anexo A, por serem muitos dados, os resultados estão compactados em tabelas divididas pelo tipo de ensaio para obtenção de informação mais pormenorizada.

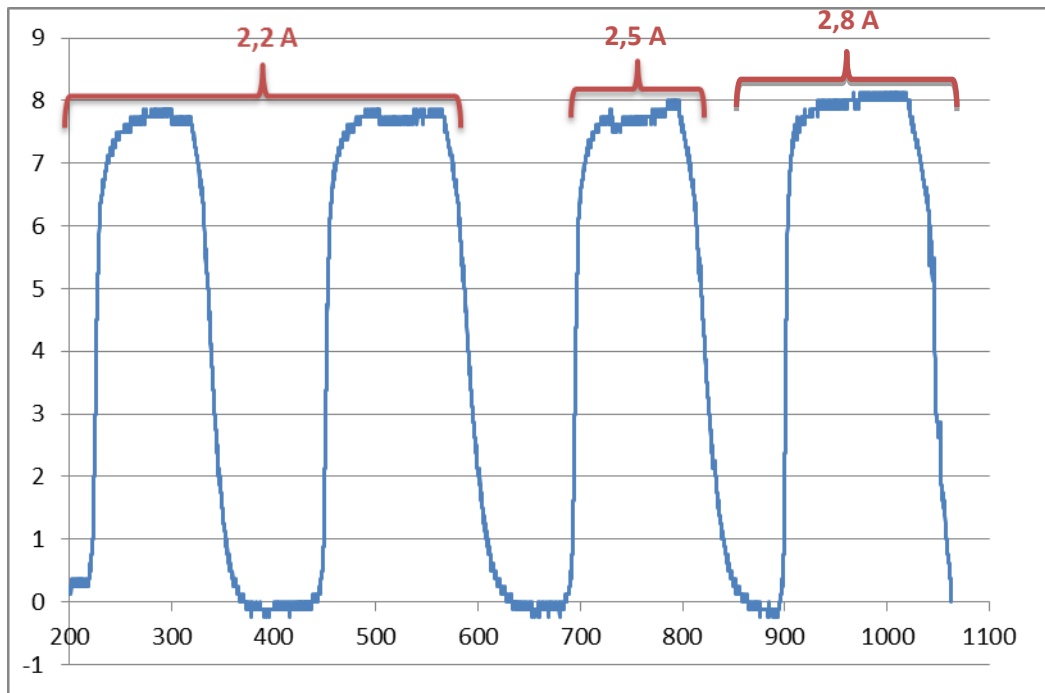
#### **4.2.1 Arrefecimento passivo**

Os resultados analisados em seguida correspondem aos ensaios de tração realizados, em primeira instância com o atuador Ni-Ti com invólucro (atuador sem alterações) e, posteriormente, sem invólucro (apenas com o arame Ni-Ti). Ambos os ensaios estiveram sujeitos a um arrefecimento por convecção natural.

##### **Ensaio com invólucro**

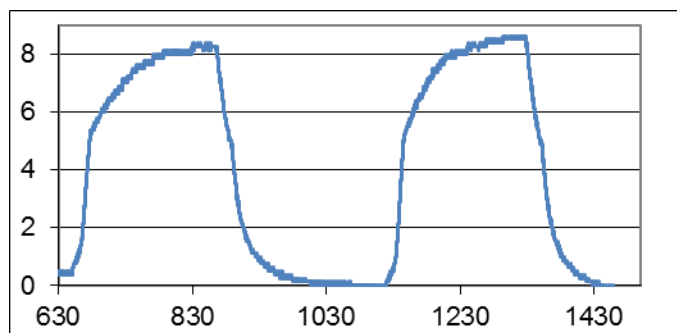
Os resultados dos ensaios para 10 mm com arrefecimento passivo revelaram um ligeiro aumento de força com o aumento da intensidade de corrente de 2,2 A para 2,5 A, com o respetivo aumento de força de 7,825 para 8,125 A. Após aumentar a intensidade de corrente para 2,8 A não foram verificadas variações de força.

O período de aquecimento e de arrefecimento não tiveram dados conclusivos, Figura 4.2.

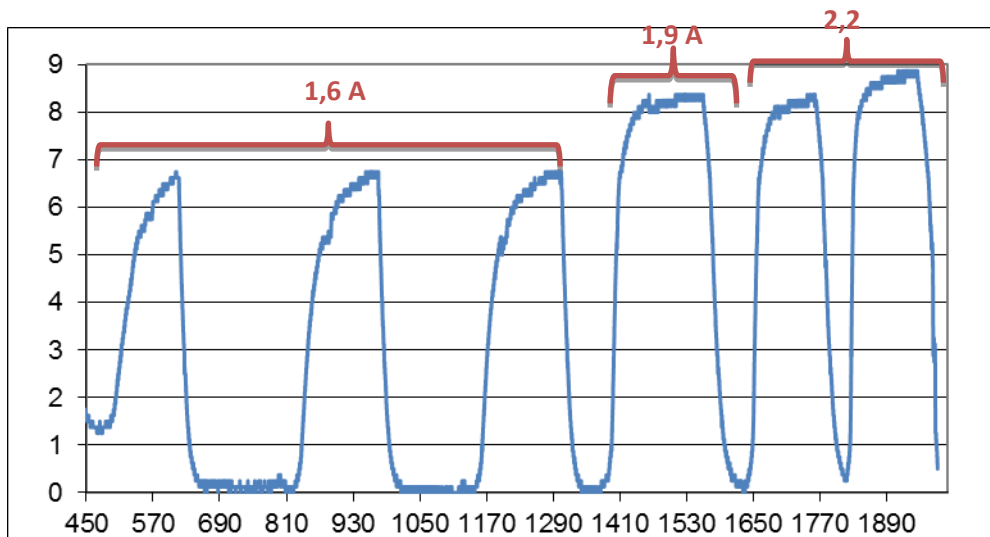


**Figura 4.2** – Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (10 mm), atuador e modelador.

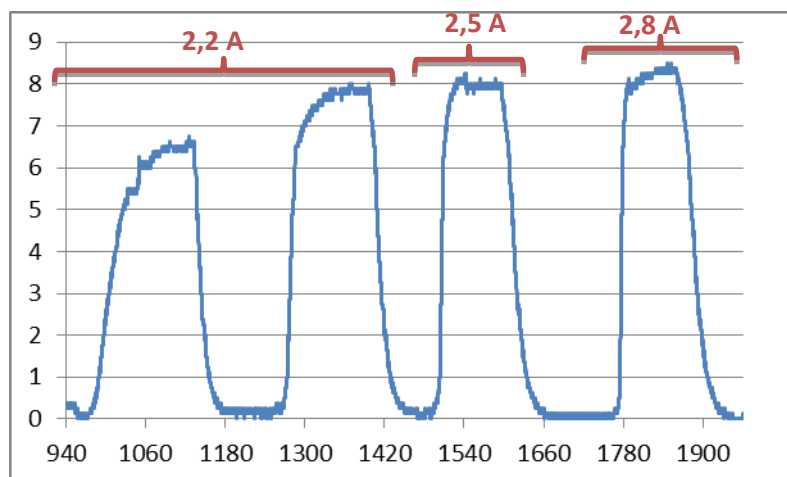
Nos ensaios de 15 mm de distensão da mola, Figuras 4.3, 4.4, 4.5, verificou-se uma força máxima sem grandes variações. Os tempos de aquecimento tiveram uma progressiva diminuição com o incremento de corrente. Os tempos de arrefecimento sofreram uma grande redução no ensaio com 1,9 A, passou de 180 s para 60 s.



**Figura 4.3** - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e 1,5 A.

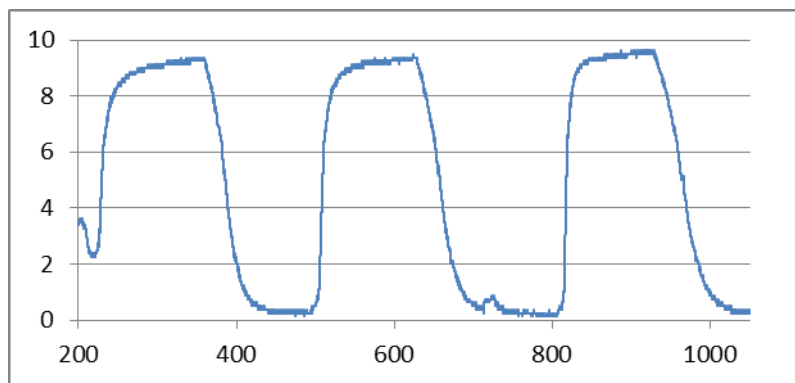


**Figura 4.4** - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e modelador.



**Figura 4.5** - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (15 mm), atuador e modelador.

Nos ensaios de 17,5 mm, realizados com 2,2 A, Figura 4.6, verificou-se uma força máxima que superou os 9 N com tempos de aquecimento na ordem dos 2 minutos e de arrefecimento pouco superiores a 2 minutos.

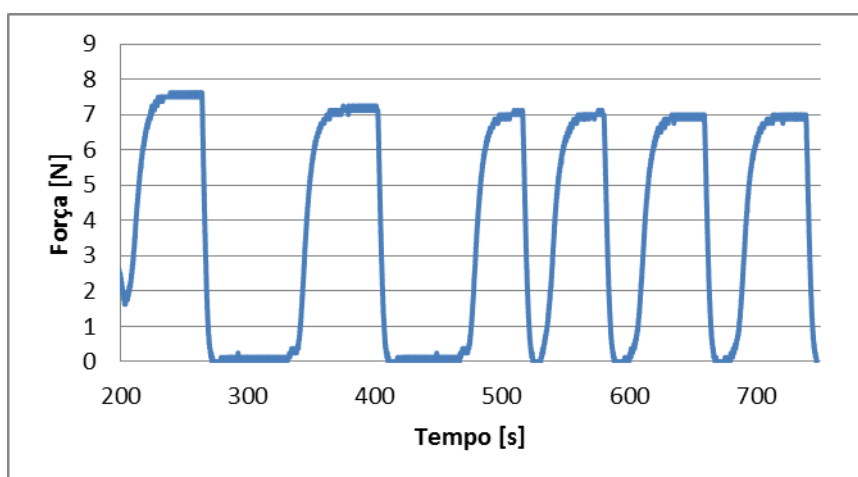


**Figura 4.6** - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (17,5 mm), atuador e modelador com 2,2 A.

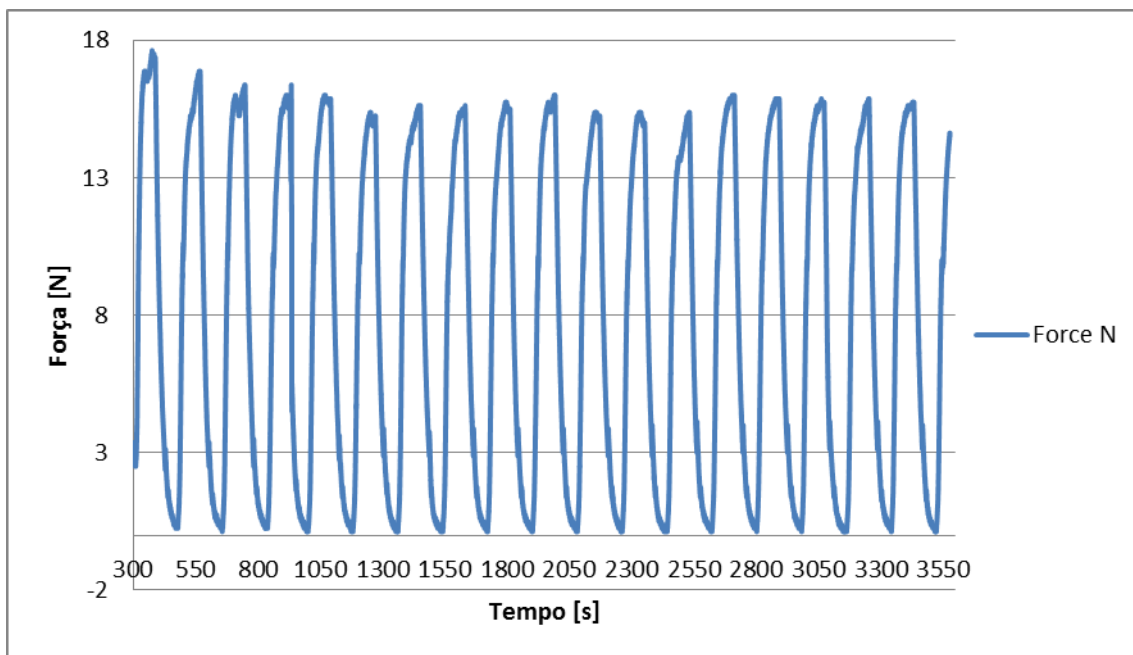
### Ensaio sem invólucro

Nos resultados obtidos nos ensaios com travessão fixo mas com o atuador descarnado, comparando a evolução da alteração do comportamento do atuador em três distâncias entre maxilas fixas, figuras 4.7 à 4.9, pela seguinte ordem: (12,5 mm; 15 mm e 17,5 mm), são caracterizadas por um grande incremento da força máxima no primeiro aumento da distensão, e uma ligeira diminuição na segunda. Respetivamente, ocorreu um aumento de 9 N (de 7 N para 16 N) e uma redução de 0,5 N (de 16 N para 15,5 N).

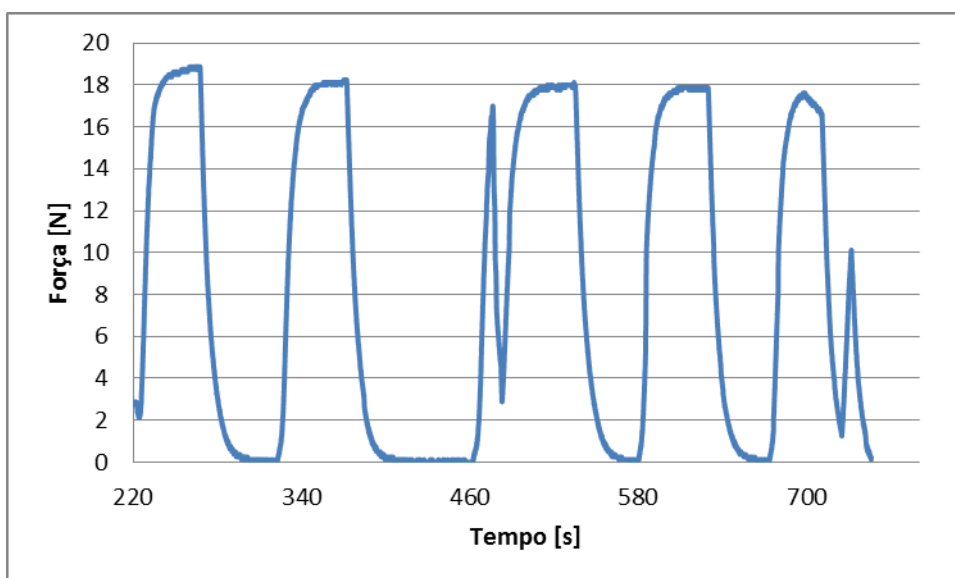
O tempo para atingir a força máxima aumentou com a distensão da mola na ordem da dezena de segundos.



**Figura 4.7** – Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (12,5 mm) mola de Ni-Ti nova descarnada 12,5 mm com 3,1 A.

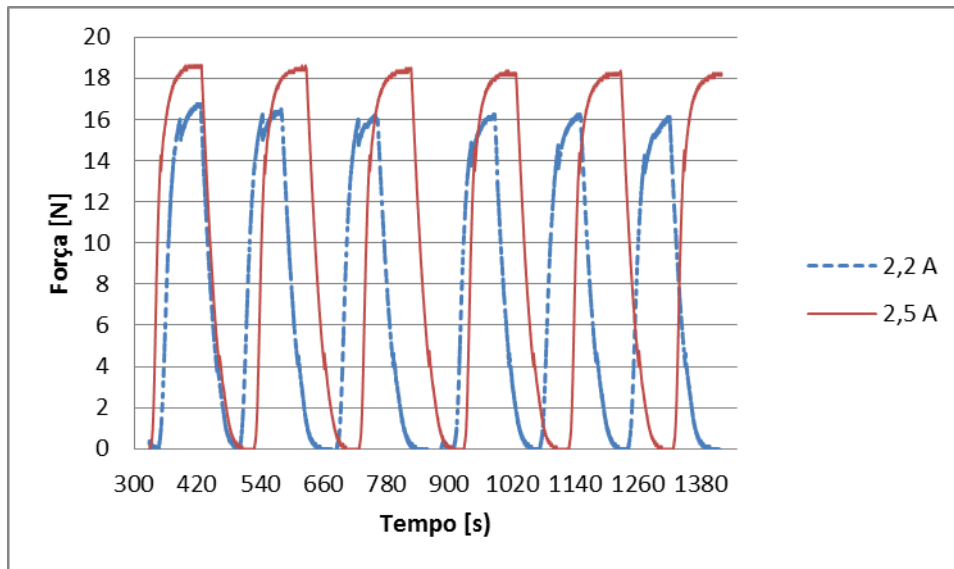


**Figura 4.8** - Série de dados obtidos na máquina de tração com travessão fixo (17,5 mm) com mola de Ni-Ti nova descarnada, 2,2 A e modelador, com 90 s de aquecimento e 90 de arrefecimento.



**Figura 4.9** – Série de dados obtidos na máquina com travessão fixo (17,5 mm) de tração com mola de Ni-Ti descarnada, arrefecimento forçado, modelador e 3,6 A

Na Figura 4.10 observam-se resultados de outro ensaio para 15 mm, com corrente de 2,2 A apresentou uma força máxima de aproximadamente 16 N, aumentando a corrente para 2,5 A, a força máxima progrediu para cerca de 18 N, com os respetivos tempos de aquecimento e arrefecimento de 80 s e 90 s para a tensão mais baixa e de 100 s para ambos os tempos da tensão mais alta.



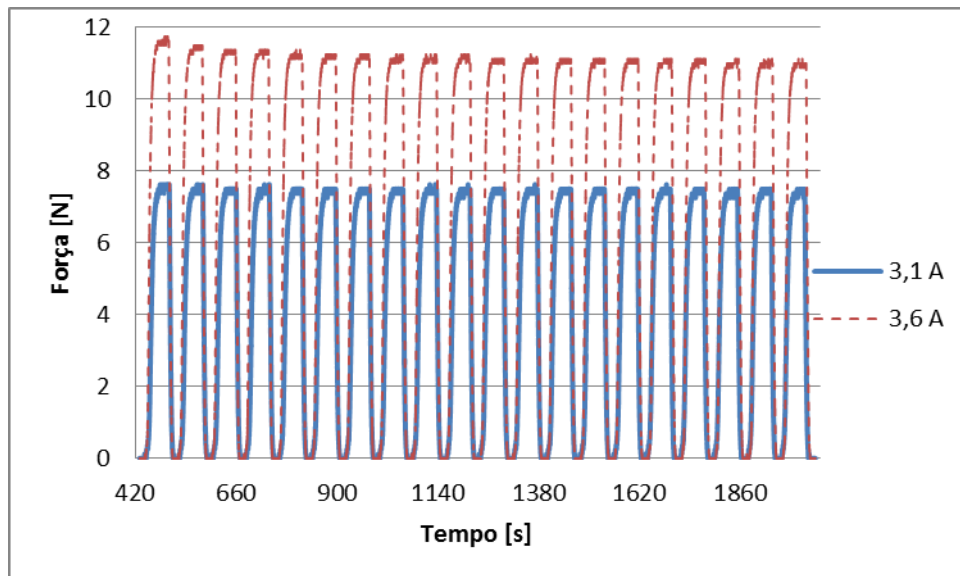
**Figura 4.10** – Gráfico de ensaio na máquina de tração. Comparação de ensaios executados através de modulador, sem cobertura, distensão da mola de 15 mm com travessão fixo e intensidades de 2,2 e 2,5 A com arrefecimento passivo.

#### 4.2.2 Arrefecimento ativo

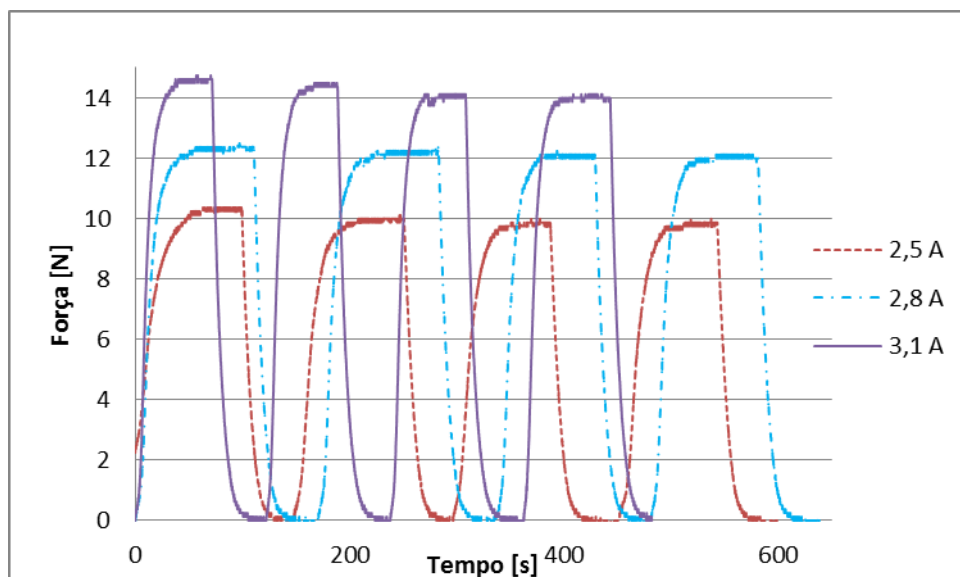
Os ensaios representados graficamente nas Figuras 4.11 e 4.12 dizem respeito a comparações de atuadores sujeitos a parâmetros idênticos excluindo a intensidade de corrente elétrica. Foi aplicado o método de arrefecimento ativo durante todo o ciclo.

Na Figura 4.11 encontra-se a representação relativa à análise para uma mola de Ni-Ti distendida 12,5 mm. No ensaio realizado com 3,1 A, registou-se uma força máxima por ciclo média de aproximadamente 7,75 N. Com uma corrente de 3,6 A a força máxima ascendeu a 11 N. No que respeita os tempos de arrefecimento e aquecimento ambos têm 55 s de fase de aquecimento e 25 s de fase de arrefecimento.

Na Figura 4.12 pode-se analisar o comportamento da mesma mola distendida a 17,5 mm e sujeita a diferentes intensidades de corrente. Em primeira análise, confirma-se o aumento da força do atuador de 10 N para 12 N com o aumento da corrente de 2,5 A para 2,8 A. Quando sujeita a 3,1 A, verifica-se uma força máxima de 14 N. Na análise dos tempos de estabilização da força não verificamos diferenças muito expressivas. Com um período de 95 s correspondentes a 55 s de aquecimento e 40 s de arrefecimento.

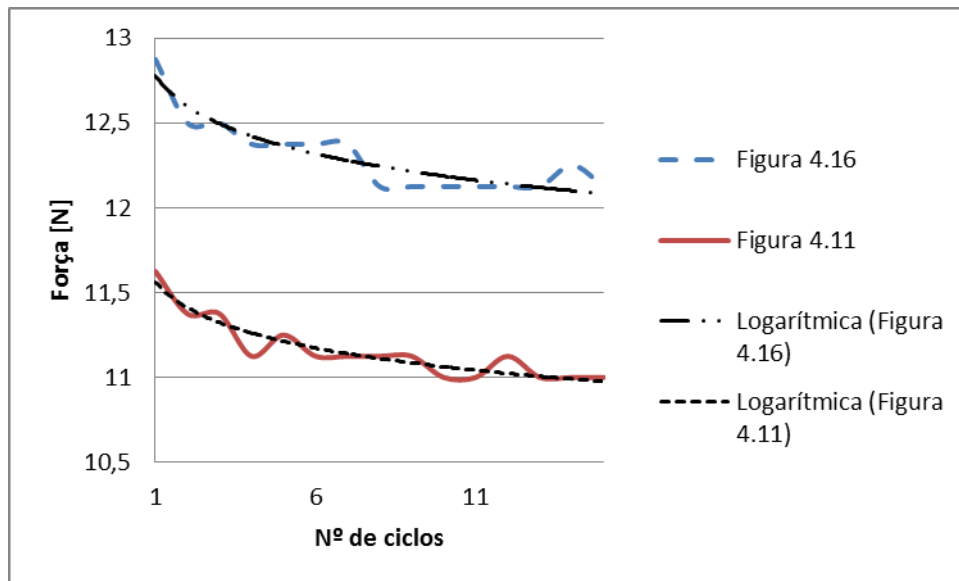


**Figura 4.11** – Gráfico obtido no teste de travessão fixo com mola de Ni-Ti descarnada, 12,5 mm de distensão da mola e corrente de 3,1 A e 3,6 A com arrefecimento ativo.



**Figura 4.12** – Gráfico comparativo de ensaio de travessão fixo (15 mm), executado com modulador, sem cobertura e intensidades de 2,5, 2,8 e 3,1 A com arrefecimento forçado.

O gráfico da Figura 4.13 representa um estudo da evolução da força ao longo dos primeiros ciclos a partir de dois ensaios realizados para a extensão de 12,5 mm e 15 mm. Ambos apresentam uma redução de força com tendência para estabilizar ao longo do tempo. No caso da extensão de 15 mm a queda de força é de 12,875 N para 12,125 N. Na extensão de 12,5 mm observa-se uma redução de 11,625 para 11 N.



**Figura 4.13** – Comparação da perda de força dos primeiros ciclos dos ensaios da Figura 4.11 e Figura 4.16 correspondentes a diferentes extensões, respetivamente 12,5 mm e 15 mm.

Durante os diversos ensaios registou-se a deformação não recuperável. Para a extensão de 17,5; 15 e 12,5 mm a memória de forma não recuperável rondou respetivamente os 0,93; 0,75 e 0,5 mm de comprimento.

### 4.2.3 Discussão de resultados dos ensaios mecânicos com travessão da máquina de tração fixo

O ensaio foi realizado com o cuidado de respeitar um limite de extensão máxima do arame de Ni-Ti de modo a nunca superar os 8 % de extensão máxima. Estipulou-se o valor de 2,5 mm de distensão da mola como limite máximo, dando-lhe uma margem de segurança justificada pela necessidade de um grande número de ciclos de vida útil da mola.

#### Os ensaios com invólucro

Os ensaios realizados com invólucro não podem ser considerados de travessão fixo pois, mesmo que o travessão estivesse fixo, a mola de retorno existente no exterior do atuador permite que a mola de Ni-Ti se deforme com a aplicação de corrente. Neste ensaio, a força máxima verificada corresponde apenas à distensão da mola de aço ( $F=k*\Delta L$ ). Tal leva a uma força máxima que ronda os 12 N, com a mola de Ni-Ti na extensão mínima.

Estes ensaios apresentaram períodos de aquecimento e arrefecimento com médias muito grandes para o período de batimento de uma barbatana caudal de um peixe de dimensões reduzidas.

## **Ensaio sem involucro**

Para os ensaios realizados apenas com a mola de Ni-Ti e arrefecimento por convecção natural, verificou-se que, no geral, a força máxima aumentou com a intensidade da corrente até um valor a partir do qual tende a estabilizar. A força máxima exercida é também dependente da distensão do atuador, já que se verificou que, com o aumento da distância entre as maxilas da máquina de tração, conseguia-se obter forças máximas superiores. O tempo de arrefecimento, assim como o de aquecimento, teve um ligeiro aumento tanto com a intensidade de corrente, como com o aumento da distensão da mola. Este comportamento pode ser justificado pelo aumento da força máxima.

O ensaio para uma distensão de 17,5 mm teve um comportamento inesperado, uma vez que apresentou uma força inferior ao ensaio equivalente para 15 mm. Esta alteração pode dever-se a um erro provocado por escorregamento nas garras ou temperatura inferior incitada por um abaixamento da corrente. Poderá também dever-se a deformações não recuperáveis da mola.

## **Arrefecimento ativo**

Nos ensaios realizados com o arrefecimento por convecção forçada, confirma-se que existe uma relação entre o aumento de intensidade de corrente e o aumento de força do atuador, tal como nos ensaios anteriores. Na Figura 4.12 verifica-se que este aumento de força é proporcional à corrente.

Numa visão ampla sobre os ensaios, observa-se que a força máxima exercida pelo atuador varia com o seu comprimento, ou seja, quanto maior é a distensão da mola de Ni-Ti, maior é a força máxima exercida. No geral, os ensaios com arrefecimento ativo obtiveram um comportamento semelhante aos ensaios de arrefecimento passivo, mas com tempos de ciclo térmico da mola de Ni-Ti muito menores. A maior dissipação térmica obrigou a aumentar a intensidades de corrente para obter a mesma força de atuação.

Foi verificado durante os ensaios que, no decorrer dos primeiros ciclos, ocorre o decréscimo da força máxima exercida pelo atuador tendendo a estabilizar em média após meia dúzia de ciclos. A perda é tanto maior quanto maior for a intensidade de corrente elétrica mas também quanto maior for a distensão da mola de Ni-Ti, tal como se verifica mais pormenorizadamente no gráfico Figura 4.13, havendo no entanto pequenas diferenças que podem dever-se a erros de leitura ou pequenas diferenças nas condições de ensaio.

Na análise dos ensaios realizados com arrefecimento forçado, pode-se observar os diversos resultados de força e de temporizações obtidos para as diferentes variáveis. Os tempos das fases de aquecimento e arrefecimento até aos patamares de força máxima e mínima mantiveram-se sem grande variação com a alteração da corrente. O seu valor esteve na ordem dos 50 s para o aquecimento e 25 s para o arrefecimento. Salienta-se no entanto

que, para a distensão da mola de Ni-Ti da ordem dos 17,5 mm, verificou-se um ligeiro aumento no tempo para atingir a força mínima durante o arrefecimento.

Na análise segundo a variação da intensidade da corrente elétrica verificou-se uma relação direta entre o aumento da intensidade e o aumento da força máxima do atuador para as mesmas condições. O tempo de arrefecimento, representado graficamente pelo tempo de redução da força aplicada na célula de carga, também diminuiu com o aumento da intensidade da corrente.

### **Ensaio de tração com travessão fixo**

Os resultados obtidos durante os ensaios de força de atuação com travessão fixo estão descritos de forma resumida na Tabela 4.2.

Verificou-se o aumento de força máxima tanto pelo aumento da distensão da mola como através do aumento da intensidade de corrente. A força máxima também foi negativamente afetada pelo arrefecimento por convecção forçada, exigindo maior corrente para atingir a mesma força.

O período de execução de um ciclo completo da mola, que se transcreve por uma fase de aquecimento até atingir a força máxima e um ciclo de arrefecimento até atingir força nula exercida na célula de carga da máquina de tração, foi marcado pela falta de linearidade. Contudo, existe uma tendência para aumentar tanto com a extensão como com o aumento de intensidade de corrente.

Nos ensaios em que se aplicou arrefecimento forçado verificou-se uma significativa melhoria nos tempos de arrefecimento, já os tempos de aquecimento não foram muito afetados. Assim sendo, o atuador completo revelou-se inadequado para os tempos de atuação pretendidos. O arrefecimento por convecção forçada permite reduzir eficazmente os tempos de atuação da mola de liga Ni-Ti em contacto com o ar, permite assim aproximar os resultados do protótipo num meio aquático.

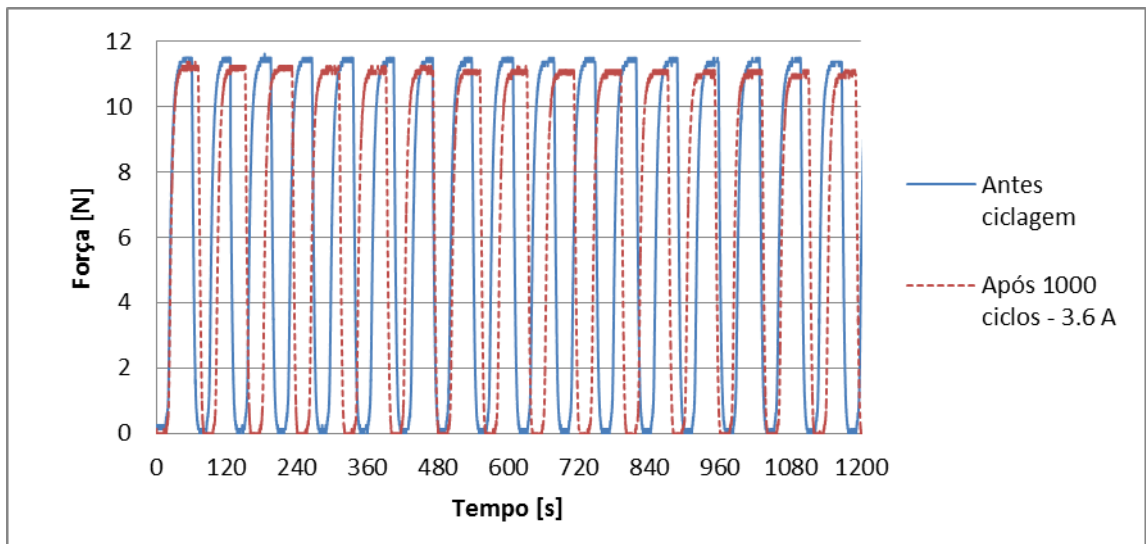
**Tabela 4.2** – Comparação de dados dos ensaios com travessão fixo

período	I[mA]	Fmax [N]	Fmin [N]	Extensão [mm]	Arrefecimento	Cobertura
80	3100	7,75	0	12,5	Ativo	S/ cobertura
80	3600	11	0	12,5	Ativo	S/ cobertura
170	2200	16	0	15	Passivo	S/ cobertura
200	2500	18,125	0	15	Passivo	S/ cobertura
65	3600	15,75	0,125	15	Ativo	S/ cobertura
180	2200	15,5	0,125	17,5	Passivo	S/ cobertura
180	2200	15,5	0,125	17,5	Passivo	S/ cobertura
140	2500	9,875	0	17,5	Ativo	S/ cobertura
150	2800	12,125	0	17,5	Ativo	S/ cobertura
110	3100	14	0	17,5	Ativo	S/ cobertura
105	3600	17,875	0	17,5	Ativo	S/ cobertura

#### 4.2.4 Ensaios de Fadiga

Os ensaios descritos nesta secção representam provas de longa duração, correspondendo a ciclos com temporizações constantes e com valores de corrente de onda quadrada com patamares estáveis ao longo dos ciclos. Os gráficos referidos como *antes ciclagem* expõem os primeiros ciclos do ensaio, servindo de comparação para a análise dos últimos ciclos do ensaio e assim determinar a evolução.

A Figura 4.14 expõe a evolução da força da mola distendida 12,5 mm *após 1000 ciclos* de atuação com 55 s de aquecimento (a 3,6 A) e 25 s de arrefecimento. O ensaio inicial teve uma força máxima estabilizada nos 11,375 N. Após a ciclagem verificou-se que tinha estabilizado nos 10,625 N.

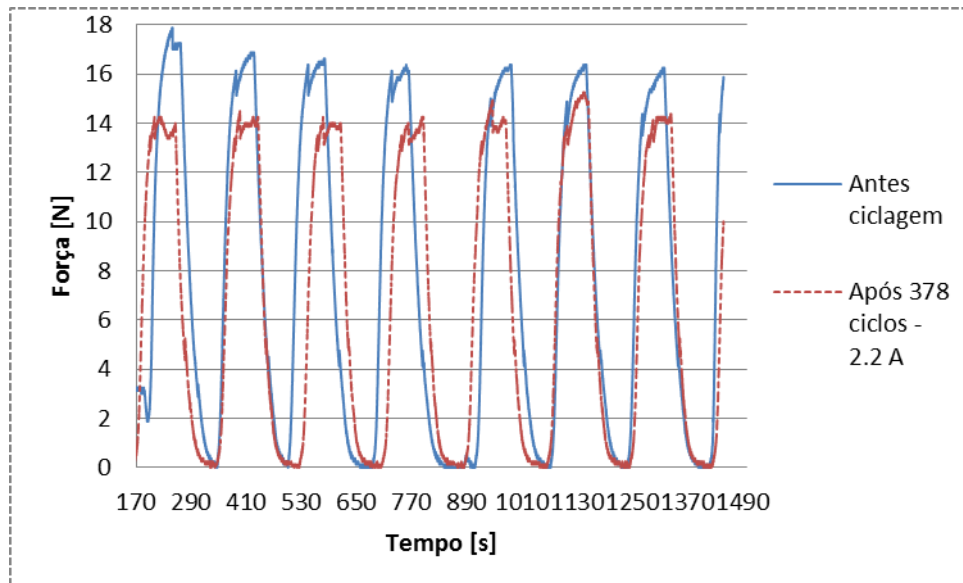


**Figura 4.14** - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 1000 ciclos de trabalho com intensidade de corrente de 3,6 A durante 55 s e um período de 80 s por ciclo (12,5 mm de distensão da mola) sem cobertura com arrefecimento forçado.

A Figura 4.15 expõe a evolução da força da mola distendida 15 mm após cerca de 378 ciclos de atuação com 90 s de aquecimento (a 2,2 A) e 100 s de arrefecimento. O gráfico da mola nova mostra uma ligeira curva de redução de força máxima tendendo a estabilizar nos 16 N de força na primeira dezena de ciclos. A força máxima é atingida no limite da temporização da fase ON.

Os dados retirados após a ciclagem anunciam uma degradação da força máxima disponível pelo atuador de quase 2 N. O atuador atinge mais rapidamente o patamar de força máxima no fim do ensaio.

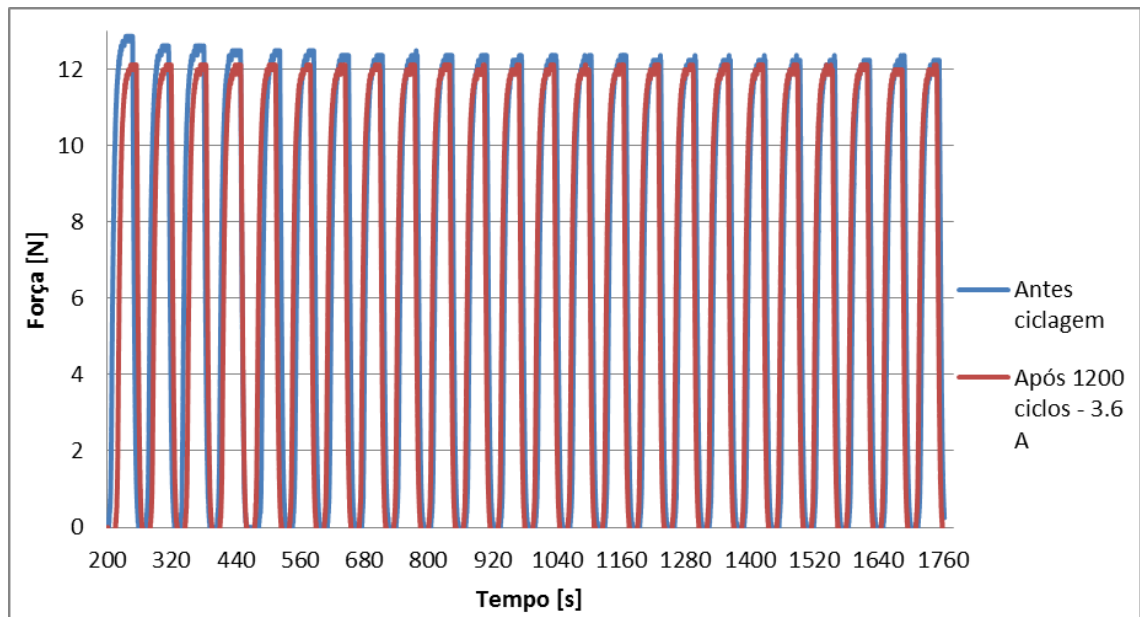
O ensaio após a ciclagem apresenta oscilações de força que sugerem que a mola teve algum escorregamento entre as garras.



**Figura 4.15** – Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 378 ciclos de trabalho sujeita a uma intensidade de corrente de 2,2A durante 90 s e um período de 190 s (15 mm) sem cobertura.

O gráfico da Figura 4.16, correspondente a um ensaio que decorreu com a aplicação de uma intensidade de corrente de 3,6 A, a mola de Ni-Ti distendida 15 mm e arrefecimento forçado.

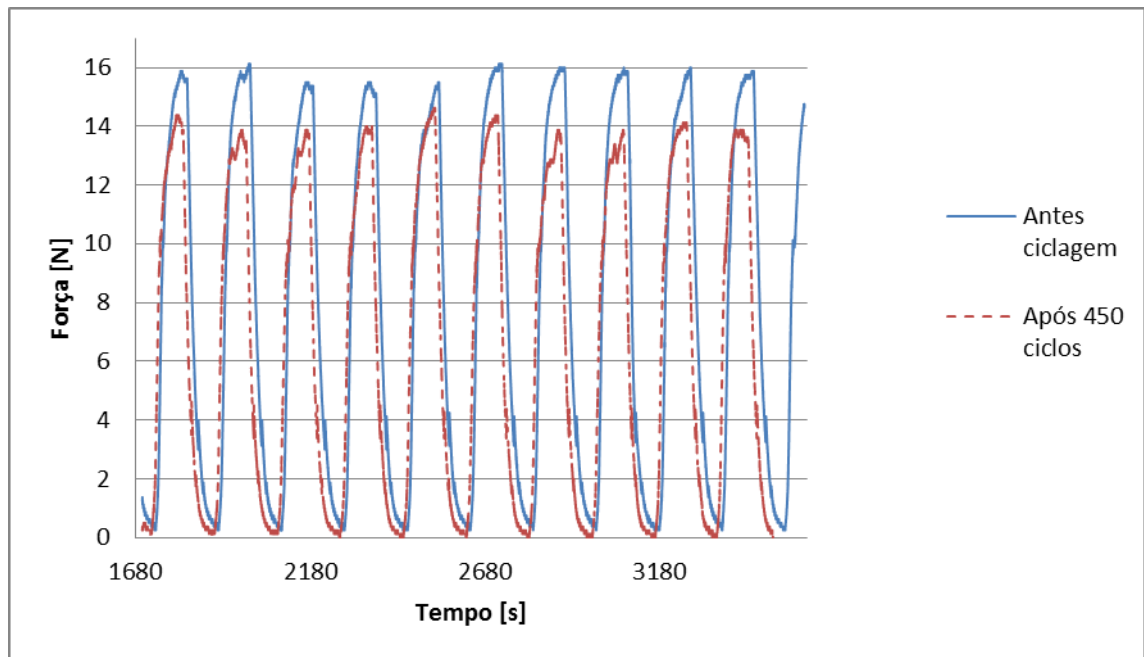
Verifica-se que a perda de força após os primeiros ciclos é reduzida mas mais relevante que a perda após a ciclagem pelo fenómeno de fadiga do EMF. A força, no ensaio inicial, iniciou com 12,625 N estabilizando aproximadamente nos 12,125 N. Verifica-se uma perda de força de 0,5 N. No fim dos 1200 ciclos já se verificou uma força máxima de cerca de 11,875 N traduzindo-se por uma perda total de 0,875 N, ou seja, cerca de 7%.



**Figura 4.16** - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 1200 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 3,6 A com ciclos de 40 s ON e 25 s OFF (15 mm) com arrefecimento forçado.

A Figura 4.17 transcreve o ensaio de fadiga realizado para 17,5 mm sujeito a arrefecimento por convecção natural. Para a intensidade de 2,2 A e ciclos com 90 s, tanto para o aquecimento como para o arrefecimento, apurou-se uma redução da força na ordem de 1,5 N (15,5 N para 14 N) após 450 ciclos.

Tanto os resultados obtidos antes da ciclagem como após a ciclagem, apresentaram oscilações em alguns dos ciclos que podem estar relacionadas com escorregamento entre garras.

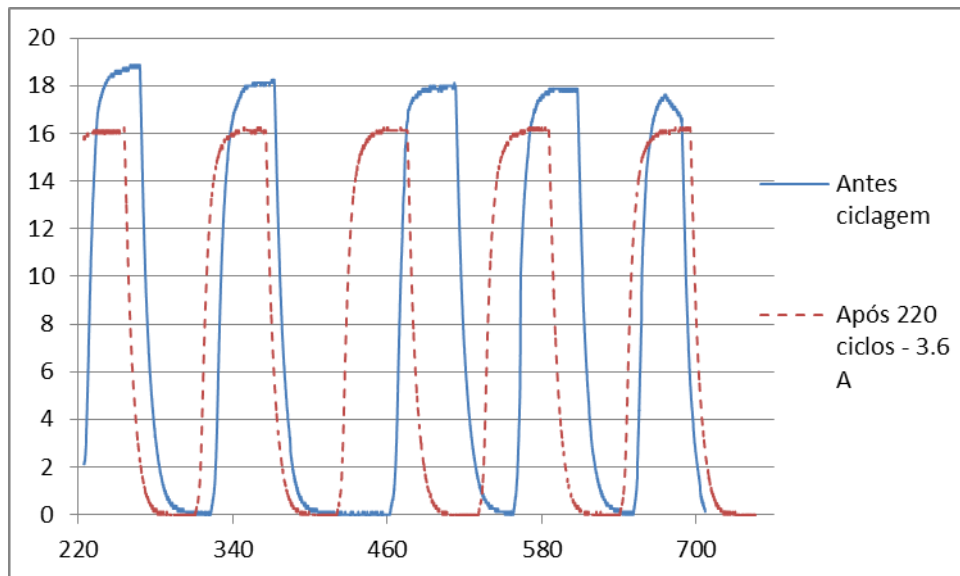


**Figura 4.17** - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 450 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 2,2 A durante 90 s e um período de 180 s por ciclo (17,5 mm) sem cobertura.

O ensaio da Figura 4.18 foi realizado para uma mola de Ni-Ti distendida 17,5 mm sujeita a ciclos de 55 s de aquecimento com 3,6 A e 55 s de arrefecimento por convecção forçada.

A força máxima obtida antes da ciclagem correspondeu a cerca de 18 N. Após 220 ciclos a força máxima sofreu uma redução de cerca de 2 N, caindo para 16 N.

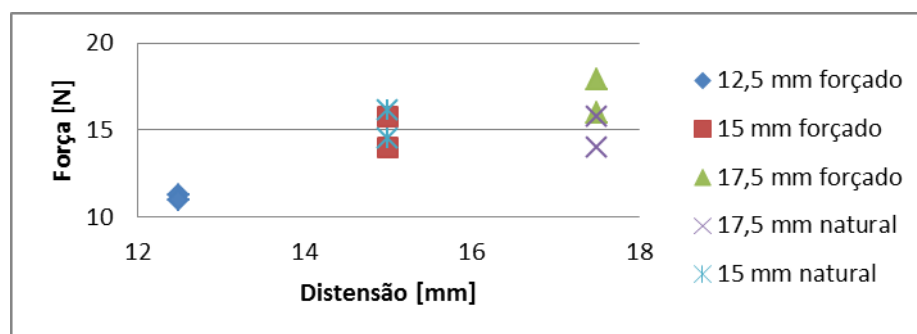
Os resultados mostram que a estabilização da força ocorreu sempre antes do fim da fase de aquecimento pelo que se poderia ter reduzido o tempo de aquecimento aproximadamente 15 s.



**Figura 4.18** - Comparação da resposta obtida por uma mola de Ni-Ti nos primeiros ciclos e após 220 ciclos de trabalho correspondentes a uma intensidade de corrente de 3,6 A durante 55 s e um período de 110 s por ciclo (17,5 mm) sem cobertura com arrefecimento ativo.

#### **Discussão de resultados dos ensaios mecânicos com travessão da máquina de tração fixo para estudar o fenómeno da fadiga.**

A primeira conclusão que se pode retirar de todos os ensaios é que a liga de Ni-Ti com memória de forma vai perdendo as suas características ao longo da ciclagem. Embora a diminuição de força tenha sido reduzida para o número de ciclos realizados, o valor pode assumir proporções elevadas com uma ciclagem muito superior correspondente a vários dias de uso contínuo.



**Figura 4.19** – Força da Mola de Ni-Ti antes e após ensaio (a força inferior corresponde à força após ciclagem).

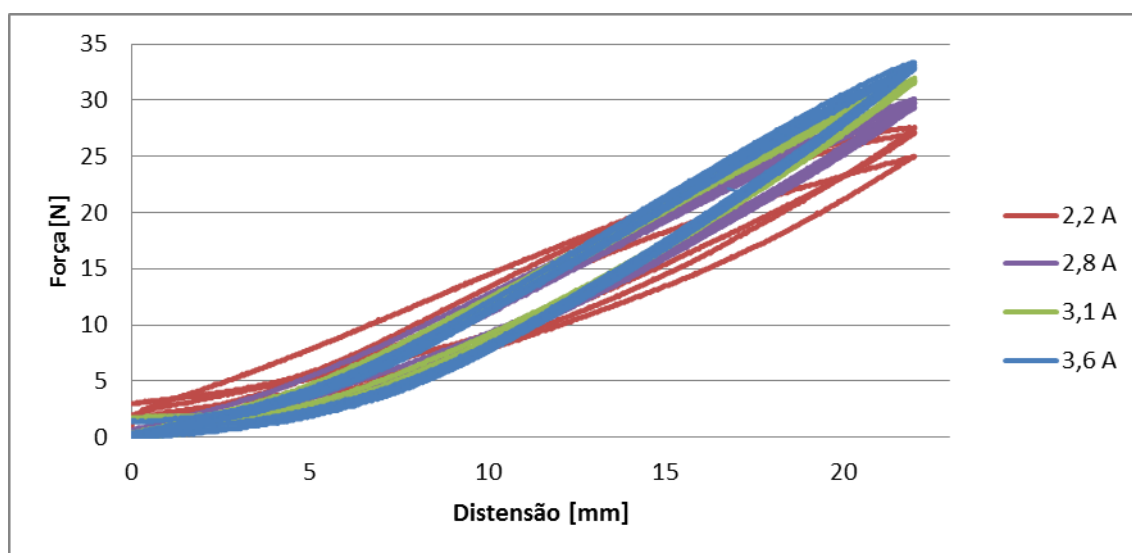
A Figura 4.19 mostra a redução de força após a ciclagem. A fadiga da mola é muito idêntica para a distensão da mola correspondente a 15 mm e 17,5 mm. A redução de força é também análoga nos diferentes métodos de arrefecimento.

O ensaio realizado com distensão de 12,5 mm foi o que demonstrou um melhor comportamento, não revelando redução de força máxima significativa.

#### 4.2.5 Ensaio de tração

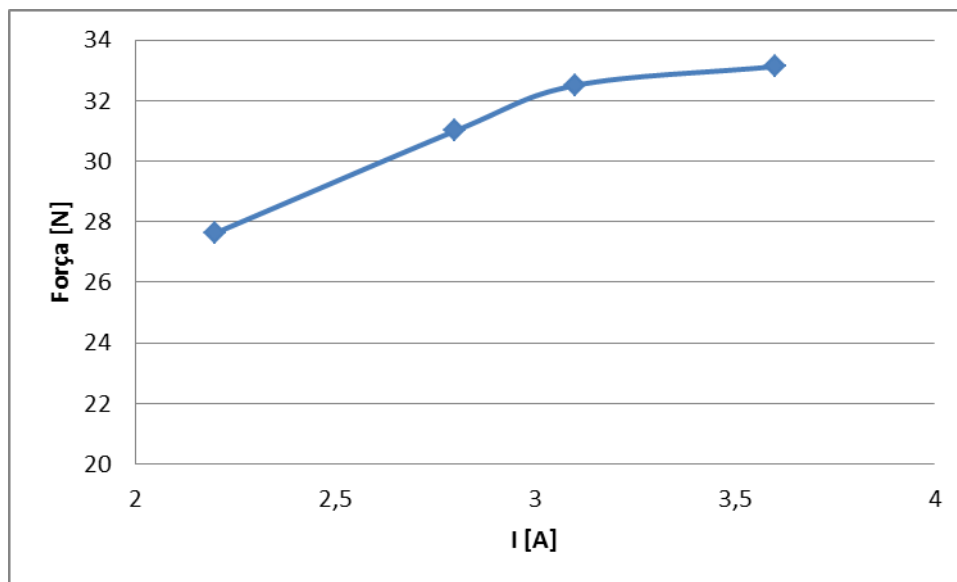
Nos ensaios realizados com distensão da mola variável e com a intensidade de corrente constante, estamos na presença do efeito superelástico da mola. É apresentado um gráfico onde são comparados os quatro ensaios realizados de maneira a que se possa ter a percepção do desenvolvimento da força. No anexo B são apresentados os diversos gráficos mais detalhados de onde foram retirados os dados para análise de resultados.

Nestes ensaios, a redução de força é sobretudo notória nos ciclos iniciais de cada ensaio. Ao longo dos ciclos, verifica-se uma perda total de 3 N para o ensaio com 2,2 A, uma perda de 1,625 N durante o ensaio a 2,8 A, uma perda de 1,75 N para o ensaio realizado com 3,1 A e uma redução de força de 1,375 N no ensaio realizado com 3,6 A. A Figura 4.21 permite uma visão geral sobre as forças do atuador ao longo do comprimento. O desenvolvimento da força ao longo do aumento da distensão da mola é elevado para os primeiros 5 mm, comprovado pelo pequeno declive da curva inicial. Após isso, ocorre um aumento da força necessária para a distensão de uma unidade de comprimento, comprovado pelo aumento do declive da curva. Verifica-se também nesta zona uma distensão muito superior da mola comparativamente à primeira fase.



**Figura 4.20** – Gráfico de resultados obtidos no teste de tração de extensão variável para 2,2 A, 2,8 A, 3,1 A e 3,6 A

A Figura 4.21 correspondente à evolução das forças máximas obtidas pelo atuador quando sujeitos a diferentes intensidades de corrente. Confirma-se que a força aumenta com o aumento da corrente, mas com tendência para estabilizar para correntes elevadas.



**Figura 4.21** – Evolução da força com a intensidade de corrente.

Foram adicionadas as linhas de tendência aos gráficos de relação entre a distensão da mola e a força. Esta linha permite nos saber de forma genérica a força expectável em função da distensão da mola. A linha de tendência, de um modo genérico subestima a força exercida pela mola na distensão e sobrestima a força obtida na contração da mola de Ni-Ti devido à histerese mecânica própria do fenómeno de superelasticidade. Corresponde, mesmo assim, a um bom indício da força expectável ao longo do curso de atuação.

As equações para cada um deles estão listadas na Tabela 4.3:

**Tabela 4.3** – Equações das linhas de tendências

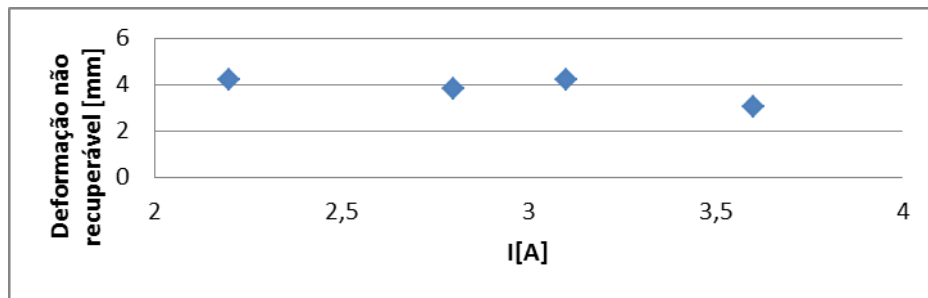
I[A]	Equação polinomial de força [N]	R <sup>2</sup>
2,2	$y = 1,1733x - 3,3446$	0,9176
2,8	$y = 1,411x - 4,6014$	0,9641
3,1	$y = 1,5148x - 5,403$	0,9639
3,6	$y = 1,5792x - 6,2696$	0,9547

#### 4.2.6 Discussão de resultados dos ensaios de tração.

No decorrer destes ensaios verificou-se a correspondência entre a força máxima do atuador e a corrente, assim como a correlação da força com a distensão da mola de Ni-Ti. Como se verificou na Figura 4.22, o aumento da força máxima com a intensidade tem tendência para estabilizar aproximadamente nos 35 N.

Os valores representados na Figura 4.23 correspondem à distensão em que a força cruza o eixo das abcissas no último ciclo de cada ensaio. Este valor diz respeito ao momento em que a mola deixa de exercer força na célula de carga, a deformação que aparece posteriormente é provocada pela máquina de tração, o que justifica o valor negativo da força, de notar que a força se encontra num estado transiente, pelo que em regime estático esse comprimento poderia ser inferior.

Este fenómeno corresponde à deformação não recuperável verificada na mola de liga Ni-Ti ao longo dos ciclos.



**Figura 4.23** – Deformação não recuperável obtido em cada ensaio em função da Corrente, dados originados dos gráficos em anexo (B).

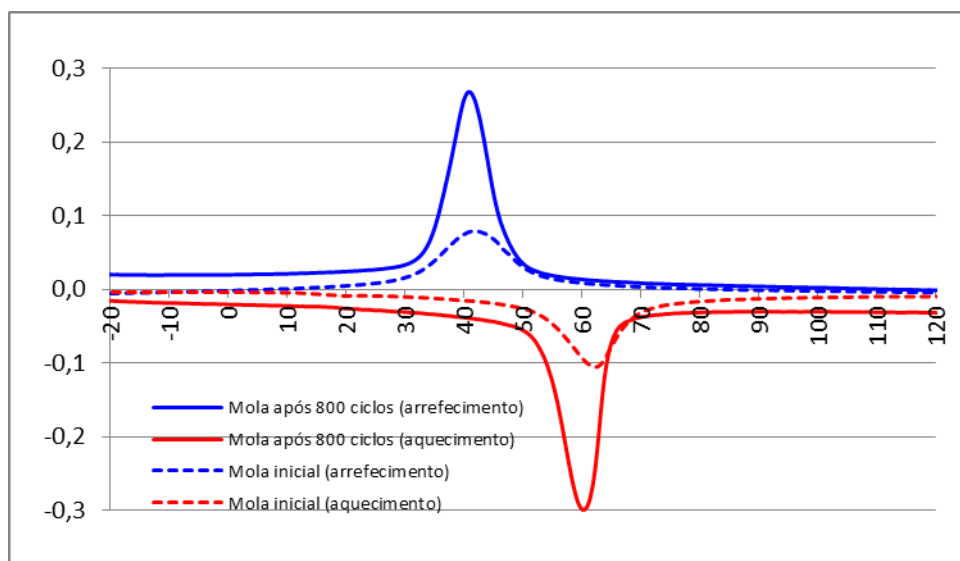
Ao longo dos sucessivos ciclos de extensão variável verifica-se uma perda consecutiva de força máxima realizada pelo atuador para cada intensidade de corrente. Essa diminuição vai sendo cada vez menor, com tendência para estabilizar nos primeiros ciclos. Este fenómeno corresponde à mesma perda de força que se verificou nos ensaios de travessão fixo na primeira meia dúzia de ciclos provocados pela reorganização de defeitos intersticiais da rede cristalina.

O aumento da tensão crítica para induzir martensite com o aumento da intensidade de corrente (correspondente ao aumento da temperatura da mola Ni-Ti) foi confirmado pelo aumento da força da mola através do aumento da distensão. Este fenómeno está de acordo com o fenómeno de superelasticidade.

### 4.3. Ensaio DSC de uma mola após utilização

No seguimento do capítulo 4.1 foi realizado um ensaio de uma das molas após ser sujeita a esforços de tração.

Na Figura 4.24 pode-se observar a comparação dos resultados DSC obtidos com a mola nova e após cerca de 1000 ciclos de transformações térmicas. Estes resultados mostram um grande aumento da energia total cedida durante a transformação martensítica, assim como um elevado aumento da energia total absorvida durante o processo inverso, como se pode verificar pelo aumento tanto da área dos gráficos, como pelo aumento do pico máximo.



**Figura 4.24** – Comparação dos resultados DSC obtidos com uma mola nova e uma mola com cerca de 1000 ciclos térmicos.

**Tabela 4.2**– Comparação entre as temperaturas de transformação para a mola nova e após cerca de 1000 ciclos

	Mola nova	Mola após cerca de 1000 ciclos
$M_s$	52,5 °C	53,2 °C
$M_f$	69,6 °C	64,8 °C
$A_s$	53,1 °C	47,6 °C
$A_f$	30,7 °C	33,9 °C

### 4.3.1 Discussão de resultados dos ensaios DSC

Quando comparados os dois ensaios DSC, conclui-se que os ciclos térmicos realizados terão provocado diversos arranjos estruturais com uma reorganização ou mesmo diminuição da densidade de defeitos estruturais na malha, próprios deste mecanismo de recuperação, traduzidos pelo aumento do fluxo térmico durante o ciclo de transformação, verificou-se um espraiamento das temperaturas de transformação.

Após os 1000 ciclos de transformação martensítica, apesar dos rearranjos estruturais ocorridos, a temperatura de  $A_f$  e  $M_s$  exibiram valores mais persistentes após a ciclagem. As temperaturas de  $A_s$  e  $M_s$  após ciclagem assumiram valores mais desviados das temperaturas da liga nova, no entanto esse desvio não é significativo para a aplicação dos atuadores.

### 4.3.2 Modelação de Mola de Ni-Ti

No seguimento do capítulo 2.4 - Modelação de uma Mola de Ni-Ti foi realizado um Excel para modelar um arame em forma de mola helicoidal com o comportamento pretendido e tendo em conta o espaço disponível para o atuador. As equações e gráficos para esta folha de cálculo foram obtidos a partir dos dados publicados por Ohkata e Suzuki (200).

Este capítulo encontra-se intimamente ligado ao capítulo 2.4 que corresponde a uma explicação pormenorizada da dedução das equações e a metodologia para a realização dos cálculos da tabela.

Primeiramente encontra-se uma legenda de cores, na Tabela 4.4, que facilita a compreensão da folha de Excel.

Na Tabela 4.5 da folha de Excel, é necessária a introdução dos dados referidos para determinar as características da mola de Ni-Ti:

- Informações sobre as características da liga a ser utilizada;
- O índice de mola;
- A força a que a mola estará sujeita;
- O comprimento de trabalho da mola;
- A deformação máxima (pretendida para maximizar o tempo de vida da mola);

Obteremos assim as características físicas da mola constituída pela liga com as características, a carga de trabalho e curso pretendidos.

Se se verificar que a mola tem que ser limitada nas suas dimensões por trabalhar num sítio pouco espaçoso, a tabela de limitação de diâmetro permite jogar com as dimensões da mola mantendo as características de força pretendidas. Para tal, ter-se-á que introduzir:

- Informações sobre tensão de corte da liga;
- O índice de mola;
- A força a que a mola estará sujeita;

- O comprimento de trabalho da mola;
- O diâmetro da mola pretendido;
- A deformação por distorção;

Obtém-se o valor de  $kC^3$  que depois de introduzido no gráfico Figura 4.25 nos permite obter o valor do índice de mola. Como já se sabe o valor do diâmetro do arame apenas temos que deduzir o valor do diâmetro da mola.

A Tabela 4.7 é específica para a construção de atuadores que têm retorno por mola, permitindo obter o comportamento pretendido do atuador com a aplicação de uma mola de Ni-Ti e uma mola de retorno adequadas para o comportamento pretendido. Para isso, na área de introdução de dados tem que se inserir os valores correspondentes:

- A força a que o atuador estará sujeito (forças externas ao conjunto de molas do atuador).
- Comprimento de ação.
- Deformação máxima da mola de retorno.
- Diferença máxima das deformações da mola de retorno.
- Tensão máxima exercida pelo atuador na fase de alta temperatura.
- Tensão máxima exercida pela mola de retorno em todo o curso.
- Módulo de distorção da mola de retorno.
- Tensão máxima da mola.
- Diâmetro da mola.

Os resultados que se obtêm permitem determinar as características da mola de retorno.

**Tabela 4.4** – Legenda das tabelas Excel.

Legenda

Introdução de dados	Diâmetro pretendido	Dimensões da mola
---------------------	---------------------	-------------------

**Tabela 4.5** – Tabela de dimensionamento da mola de Ni-Ti.

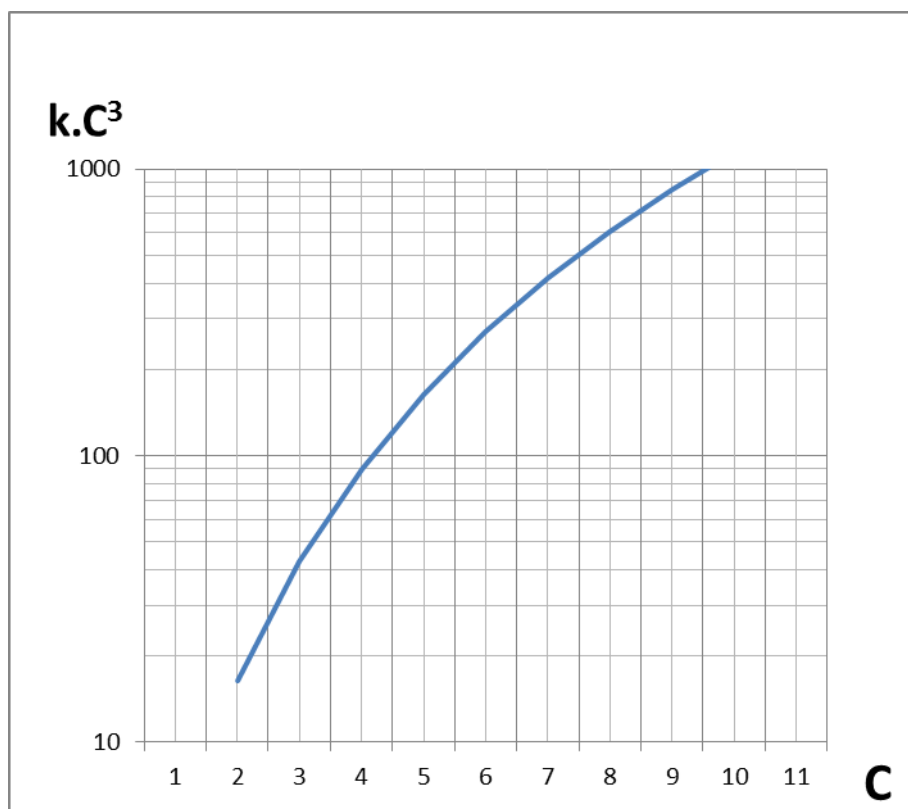
DADOS	
Tensão de corte ( $\tau_{max}$ ) [MPa]	120
Módulo de corte (GL) [MPa]	8000
Módulo de corte fase de alta temp. (GH) [MPa]	23000
Índice da mola (C)	6
Carga na mola (P[N])	10
comprimento de ação (S) [mm]	5
Atuador Ni-Ti	
Diâmetro da mola (D) [mm]	7,6
Número de espiras activas (n)	3,58
diâmetro do fio (d) [mm]	1,3
Deflexão ( $\delta$ ) max.	4,354926511
Deformação por corte/distorção max. ( $Y_H$ )	0,0052
Deformação por corte/distorção min. ( $Y_L$ )	0,0150
Deformação por corte/distorção ( $Y_S$ )	0,0098
fator de correção de tensão (K)	1,2525
Calculo com uma deformação para maximizar vida do atuador	
deformação por corte/distorção máximo ( $Y_{max}$ )	0,0100
número de espiras activas (n)	7,32
Deformação por corte/distorção ( $Y_S$ )	0,0048

**Tabela 4.6** – Tabela de limitação do diâmetro.

Limitação diâmetro	
Diâmetro da mola (D) [mm]	8
Tensão de corte ( $\tau_H$ ) [MPa]	120
Carga na mola (P[N])	10
Índice da mola (C)	6
Comprimento de Ação (S) [mm]	5
Deformação por corte/distorção ( $Y_S$ ) [%]	0,004782609
$kC^3$	301,6
n	6,93

**Tabela 4.7** – Tabela de construção de atuador de duplo efeito com retorno por mola.

Atuador	
Mola de Ni-Ti	
P1 [N]	3,93
Comprimento de Ação (S) [mm]	3,0
Deformação máxima da mola de retorno/ distorção Max (X''Y)	0,0145
Diferença de formação por corte da mola de aço entre as posições a alta e baixa temp. (B'X'') (ys)	0,0035
Deflexão máxima ( $\delta_{max}$ ) [mm]	12,4
Pmax [N]	7,85
Tensão de corte atingido com o peso (atuador) (XX'') [MPa]	100
Tensão exercida pela mola de retorno (XX') [MPa]	50
Constante da mola (K)	0,6319
Dados do material constituinte da mola de retorno	
Módulo de distorção (G) [MPa]	67570
Tensão max. ( $\tau$ ) [MPa]	340
Diâmetro da mola (D) [mm]	8
Fator de correção de tensão	1,2
Diâmetro do fio (d) [mm]	0,82656011
Nº de espiras	12,18490244



**Figura 4.25** – Relação do  $k.C^3$  com o índice de mola (Ohkata & Suzuki, 2008).

### 4.3.3 Caracterização do comportamento da barbatana.

Após a construção da estrutura e montagem das molas de Ni-Ti, Iniciaram-se os testes à estrutura com temporizações de 1 s, aumentando gradualmente até obter o tempo necessário para a recuperação da forma inicial da mola. Este processo permitiu evitar sobreaquecimentos da liga Ni-Ti provocado por um tempo de passagem de corrente muito grande. Recorreu-se ao processo inverso para o tempo de arrefecimento, para evitar que os atuadores antagónicos atuassem sem que os anteriores tivessem arrefecido, tendo-se iniciado os testes com 60 s. Após obter o tempo de aquecimento correto procedeu-se à obtenção do tempo de arrefecimento. Com isto obtivemos tempos mínimos de atuação:

**Tabela 4.8** - Tempos mínimos de atuação da barbatana

Th [s]	TI [s]	Arrefecimento
1	30	Convecção natural
1	18	Convecção forçada

Constatou-se, como era previsto, que a amplitude do movimento é extremamente pequena. Não podendo ser solucionado este problema com a construção de atuadores à medida, a solução mais viável foi a alteração de um segmento para permitir adaptar 2 molas em série e assim aumentar o curso do atuador para o dobro. Nesse sentido a primeira ideia consistiu na alimentação das molas também em série. Esta solução revelou-se inadequada já que as molas não atingiam as temperaturas de transformação ao mesmo tempo. A solução passou por colocar as molas eletricamente em paralelo.

Como foi verificado nos ensaios da máquina de tração, a força da mola tem um crescimento constante ao longo do tempo antes de atingir a fase de estabilização em que o declive da curva diminui.

## **5. Conclusões e proposta para desenvolvimentos futuros**

### **5.1. Conclusões**

Neste trabalho foi estudada a capacidade dos atuadores com molas de Ni-Ti para a propulsão submarina, direcionada para AUV's. Estas LMF são os atuadores mais promissores para o desenvolvimento de músculos artificiais. As conclusões retiradas revêem-se na aplicação destas ligas num sistema de propulsão biomimético de um peixe carangiforme.

#### **5.1.1 Caracterização da mola de liga Ni-Ti**

Neste sentido, os ensaios as molas de Ni-Ti realizados permitiram obter conhecimentos essenciais sobre as características espectáveis para a sua utilização no protótipo de barbatana. Para esta caracterização, os ensaios realizados foram ensaios térmicos através do DSC, ensaios termomecânicos realizados na máquina de tração com travessão fixo e corrente variável e ensaios de tração com corrente constante.

#### **Ensaio DSC**

Os resultados obtidos no DSC permitiram deduzir as temperaturas críticas de transformação de fase da liga Ni-Ti e verificar as fases presentes durante o ciclo térmico.

Quando comparados os dois ensaios DSC conclui-se que os ciclos térmicos realizados terão provocado diversos arranjos estruturais com uma reorganização ou mesmo diminuição da densidade de defeitos estruturais na malha, próprios de este mecanismo de recuperação, traduzidos pelo aumento do fluxo térmico durante o ciclo de transformação. Após os 1000 ciclos de transformação martensítica, apesar dos rearranjos estruturais ocorridos, a mola não sofreu alterações notáveis na gama de temperaturas de transformação. Esta característica permite saber que o comportamento do atuador, no que respeita a temperatura de atuação não deverá sofrer grandes variações com o decorrer da sua utilização.

#### **Ensaio Termomecânicos**

Os ensaios na máquina de tração com travessão da máquina fixo, ensaios de ciclagem de longa duração (fadiga) e ensaios de tração no seu conjunto permitiram estudar o comportamento da mola variando diversos parâmetros.

A força verificada nos ensaios de travessão fixo correspondente à tensão criada pela deformação da mola através fixação da mola com uma dada distensão permitiu correlacionar a força com a distensão da mola. Essa força é tanto maior quanto maior for a distensão. A

distensão da mola tem que ser cuidadosamente pensada pois quanto maior for também menor será o tempo de vida da mola.

No decorrer dos ensaios na máquina de tração verificou-se que o aumento da força pode ser obtido através do aumento do efeito de joule estimulado por uma corrente superior.

O gráfico da força em função do tempo de um atuador mostra que a evolução da força é constante ao longo do tempo até atingir a curva de estabilização de força, em que o declive da curva vai reduzindo até atingir o patamar de força máxima. Se o interesse estará em obter atuações rápidas pode sacrificar-se alguma força para obter um período de aquecimento muito inferior.

Durante os ensaios verificou-se alguma deformação não recuperável. Não tendo sido um valor significativo, se o número de ciclos for muito maior este valor pode ser maior.

### **5.1.2 Programa Excel de modelação de atuadores Ni-Ti**

Produziu-se um programa que permitisse modelar um atuador com as características dimensionais pretendidas. Em trabalhos futuros pode ser utilizado para determinar a forma da mola de Ni-Ti adequada à obtenção da força necessária e com dimensões admissíveis ora a sua aplicação.

### **5.1.3 Protótipo de barbatana**

A estrutura da barbatana realizada para os ensaios mostrou-se eficaz para promover o movimento ondulatório. a frequência de movimento obtida para a convecção natural e forçada fica muito abaixo do necessário, mas a possibilidade de aplicar atuadores de arame mais fino mas em maior número e um sistema de arrefecimento por água, iria permitir não só reduzir a corrente necessária para cada atuador mas também reduzir o tempo de atuação.

No controlo da potência de propulsão, verificou-se que o controle do aquecimento por efeito de joule permite variar a frequência de batida da barbatana. Este fenómeno pode ser útil para controlar a velocidade do AUV, em contrapartida com a redução de carga da bateria, a potência transmitida aos atuadores irá cair ao longo do tempo. É essencial produzir um estabilizador de corrente através da limitação da mesma para os atuadores.

O consumo verificado nas molas de Ni-Ti de 0,8 mm é extremamente elevado, (26 W por atuador), sendo fundamental reduzir este consumo de modo a permitir uma aproximação ao consumo dos motores dos AUV's convencionais.

## 6. Bibliografia

- Alexander, C., & Sadiku, M. (2008). *Fundamentos de Circuitos Elétricos*. (A. Griesi, Trad.) México: Mc-Graw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Castilho, W. S., & da Silva, E. P. (2011). Algumas Aplicações das Ligas com Memória de Forma. *Sinergia*, 99-108.
- Chu, W.-S., Lee, K.-T., Song, S.-H., Han, M.-W., Lee, J.-L., Kim, H.-S., et al. (2012). Review of a Biomimetic Underwater Robots Using Smart Actuators. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 13(7), 1281-1292.
- Dinalloy.Inc. (s.d.). *Ni-Ti Alloys Physical Properties*. Obtido em 25 de 02 de 2013, de <http://www.dynalloy.com/>
- Fernandes, F. M. (2013). Ligas com Memória de Forma.
- Follador, M., Cianchetti, M., Arienti, A., & Laschi, C. (2012). A General Method for the Design and Fabrication of a Shape Memory Alloy Active Spring Actuators. *SMART MATERIALS AND STRUCTURES*.
- Garner, L., Wilson, L., Lagoudas, D., & Rediniotis, O. (2000). Development of a Shape Memory Alloy Actuated Biomimetic Vehicle. *Smart Mater. Struct.*, 9(5), 673-683.
- Gupta, P. K., Seena, P., & Rai, R. N. (2012). STUDIES ON SHAPE MEMORY ALLOYS –A REVIEW. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, III(I), 378-382.
- Hervey, R. A. (1994). *Submarines/Naval Vessels, Weapons Systems and Technology Series* (Vol. 7). London: Brassey's (UK).
- Huang, W. (1998). *Shape Memory Alloys and their Application (tese de doutoramento)*. Cambridge: University of Cambridge.
- Humbbeck, J. (1999). Non-Medical Applications of Shape Memory Alloys. *Materials Science and Engineering*, 134-148.
- Jackson, C. M., Wagner, H., & Wasilewski, R. (1972). *55-Nitinol - The Alloy With a Memory: Its Physical Metallurgy, Properties, And Applications*. Washington, D.C.: NASA.
- Jordan, L., & Rocher, P. (2010). *Les Alliages Nickel-Titane (Ni-Ti)*. Obtido em 01 de Setembro de 2013, de [umvf.univ-nantes: http://umvf.univ-nantes.fr/odontologie/enseignement/chap16/site/html/cours.pdf](http://umvf.univ-nantes.fr/odontologie/enseignement/chap16/site/html/cours.pdf)
- Kauffman, G., & Mayo, I. (1997). The story of Nitinol: The serendipitous discovery of the metal and it's applications. *volume 2*, 1-21.
- memry. (12 de 03 de 2013). Obtido de memry: <http://memry.com/nitinol-iq/nitinol-fundamentals/>
- Ohkata, I., & Suzuki, Y. (2008 ). The Design of Shape Memory Alloy Actuators and their Applications. In L. D. C., *Shape Memory Alloys*: (p. 435 ). Springer.

- Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical Metallurgy of Ti-Ni-Based Shape Memory Alloys. *Science*, 50(5), 511-678.
- Otsuka, K., & Wayman, C. (2002). *Shape Memory Materials*.
- Preston, A. (1998). *Submarine Warfare*. London: Brown Books.
- Rediniotis, O., Wilson, L., Lagoudas, D., & Khan, M. (2000). Development of a Shape-Memory-Alloy Actuated Biomimetic Hydrofoil. *Smart Mater. Struct.*, 9.
- Shinjo, N. (2005). *Investigations Into the use of Shape Memory Alloy for Biomimetic Propulsion of Underwater Vehicules*. Florida: Florida Institute of Technology.
- Smith, W. (1998). *Principios de Ciência e Engenharia dos Materiais* (3ª ed.). Lisboa: McGRAW-HILL.
- Suleman , A., & Crawford, C. (2009). *Studies on Hydrodynamic Propulsion of Biomimetic Tuna*. InTech.

## 7. ANEXOS

### 7.1. Anexo A

**Tabela 7.1** – Dados retirados de todos os ensaios realizados com atuador completo e arrefecimento passivo.

C/ cobertura C/ arrefecimento passivo					
T <sub>h</sub> [s]	T <sub>i</sub> [s]	I [mA]	F <sub>max</sub> [N]	F <sub>min</sub> [N]	Distensão da mola [mm]
109	60	2200	7,825	0	10
122	77	2200	7,825	0	
108	69	2500	8,125	0	
116	46	2800	8,125	0	
216	166	1500	8,25	0	15
172	160	1500	8,625	0	
180	180	1600	6,65	0	
180	180	1600	6,675	0	
180	180	1900	8,375	0,125	
120	60	1900	8,375	0,25	
120	60	2200	8,875	-----	
109	56	2200	6,5	0	
105	62	2200	7,875	0	
74	63	2500	8	0	
88	87	2800	8,375	0	
100	114	2200	9,25	0,25	17,5
128	167	2200	9,375	0,375	
117	121	2200	9,625	0,25	

**Tabela 7.2** – Dados de ensaios sem cobertura e arrefecimento passivo.

<b>S/ cobertura C/ arrefecimento passivo</b>					
<b>T<sub>h</sub> [s]</b>	<b>T<sub>i</sub> [s]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>Fmin [N]</b>	<b>Distensão da mola [mm]</b>
–	15	3100	7,5	0	12,5
58	17	3100	7,125	0	
56	17	3100	7	0	
56	17	3100	6,875	0	
–	–	2200	–	–	15
–	–	2200	–	–	
80	90	2200	16,25	0	
80	90	2200	16,00	0	
100	100	2500	18,38	0	
100	100	2500	18,13	0	
90	90	2200	15,5	0,125	17,5

**Tabela 7.3** – Dados de todos os ensaios sem cobertura e com arrefecimento ativo

<b>S/ cobertura C/ arrefecimento Ativo</b>					
<b>T<sub>h</sub> [s]</b>	<b>T<sub>i</sub> [s]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>Fmax [N]</b>	<b>Fmin [N]</b>	<b>Distensão da mola [mm]</b>
55	25	3100	7,75	0	12,5
55	25	3600	11	0	
40	25	3600	15,75	0,125	15
40	25	3600	14	0,125	
52	45	3600	17,875	0	17,5
70	40	2500	9,875	0	
60	40	2800	12,125	0	
55	40	3100	14	0	

**Tabela 7.4 – Dados de todos os ensaios de fadiga<sup>1</sup>**

<b>Ensaio de ciclos para estudo de fadiga</b>						
<b>Estado da mola</b>	<b>T<sub>h</sub> [s]</b>	<b>T<sub>i</sub> [s]</b>	<b>I [mA]</b>	<b>F<sub>max</sub> [N]</b>	<b>F<sub>min</sub> [N]</b>	<b>Distensão da mola [mm]</b>
<b>Novo</b>	55	25	3600	11,25	0	12,5
<b>Após 1000 ciclos</b>	55	25	3600	11	0	
<b>Novo</b>	90	100	2200	16,125	0,125	15
<b>Após 378 ciclos</b>	90	100	2200	14,5	0,125	
<b>Novo</b>	40	25	3600	15,75	0,125	
<b>Após 1200 ciclos</b>	40	25	3600	14	0,125	
<b>Novo</b>	90	90	2200	15,75	0,125	17,5
<b>Após 450 ciclos</b>	90	90	2200	14	0,125	
<b>Novo</b>	55	55	3600	17,875	0	
<b>Após 220 ciclos</b>	55	55	3600	16	0	

<sup>1</sup> - Escritos a vermelho - (convecção natural) e a preto - (convecção forçada).

## 7.2. Anexo B

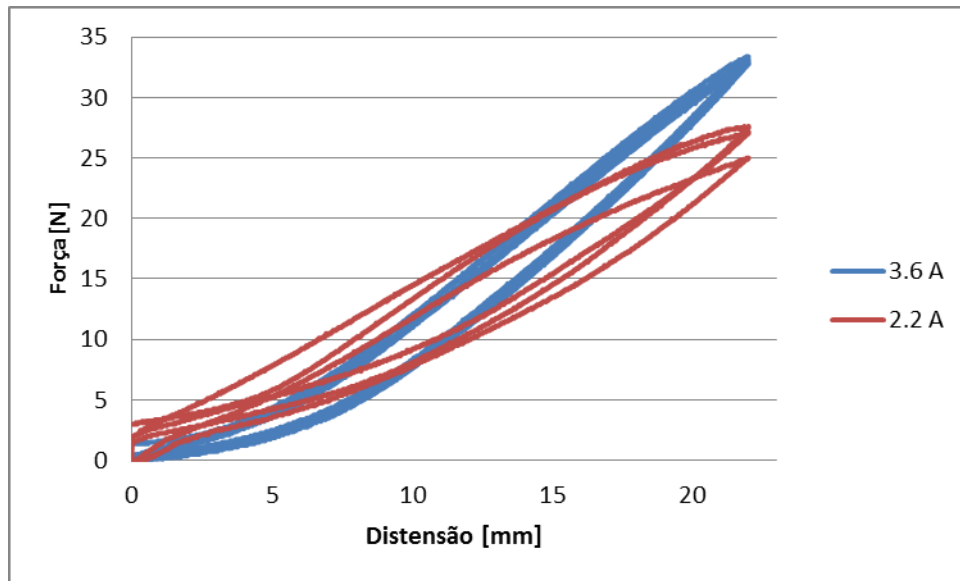


Figura 7.1 – Gráfico de resultados obtidos no teste de tração de extensão variável para 2,2 A e 3,6 A

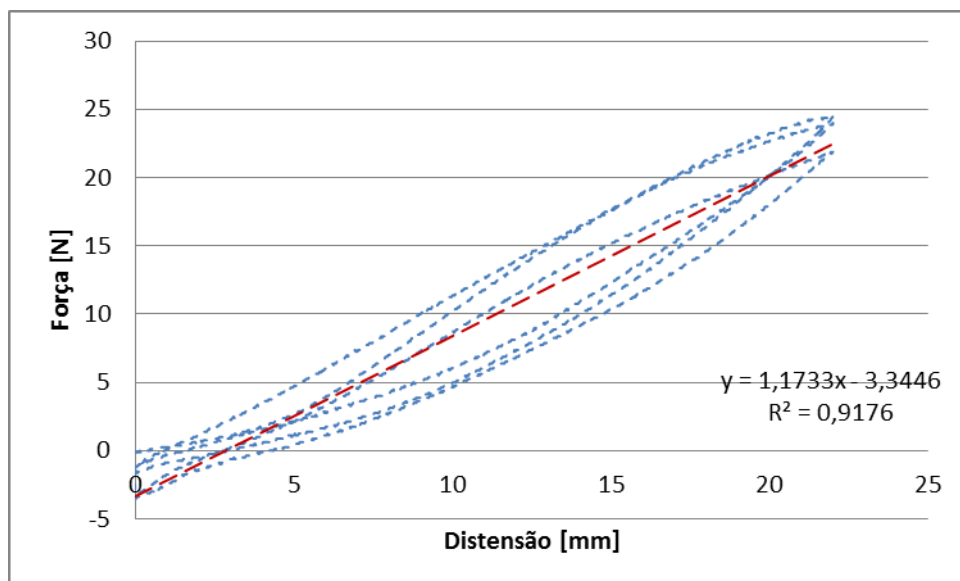
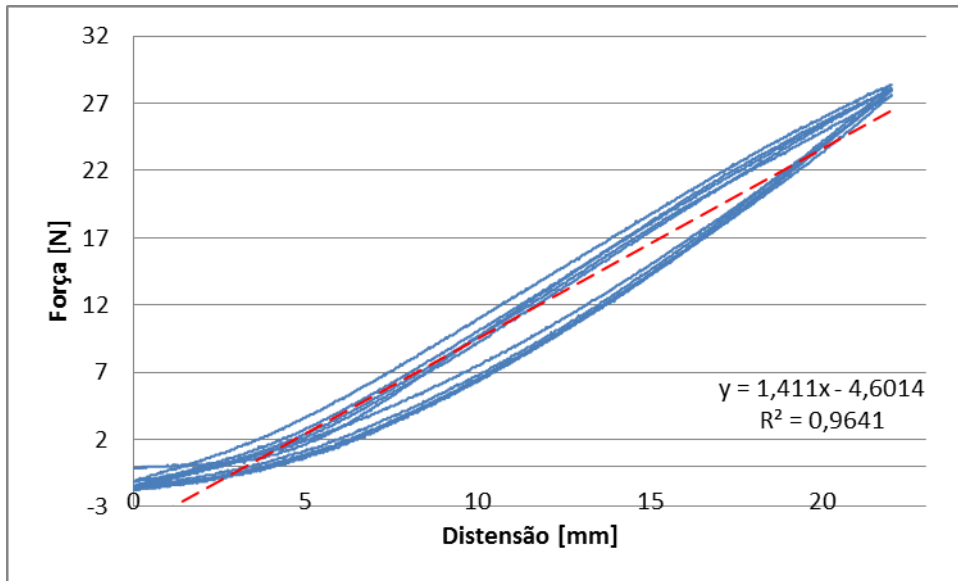
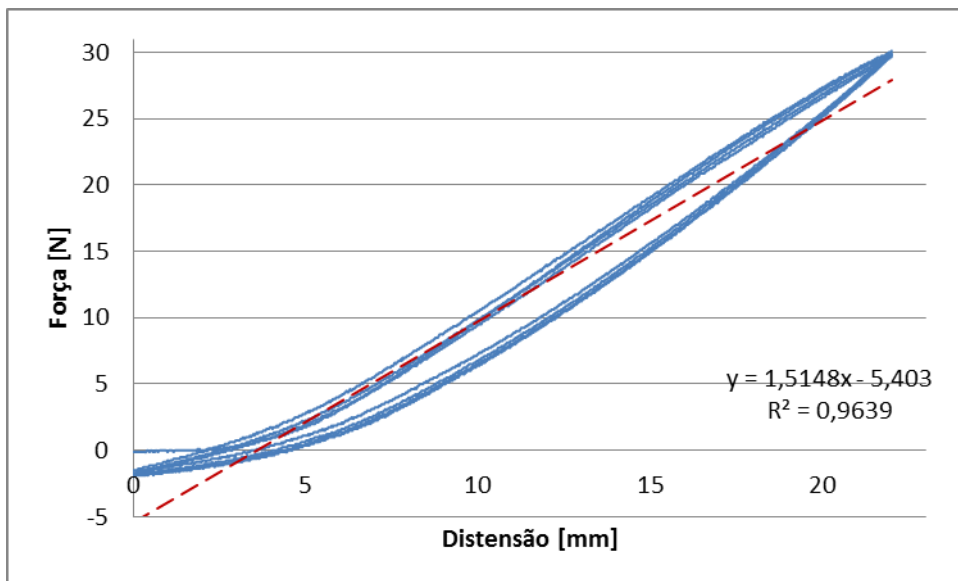


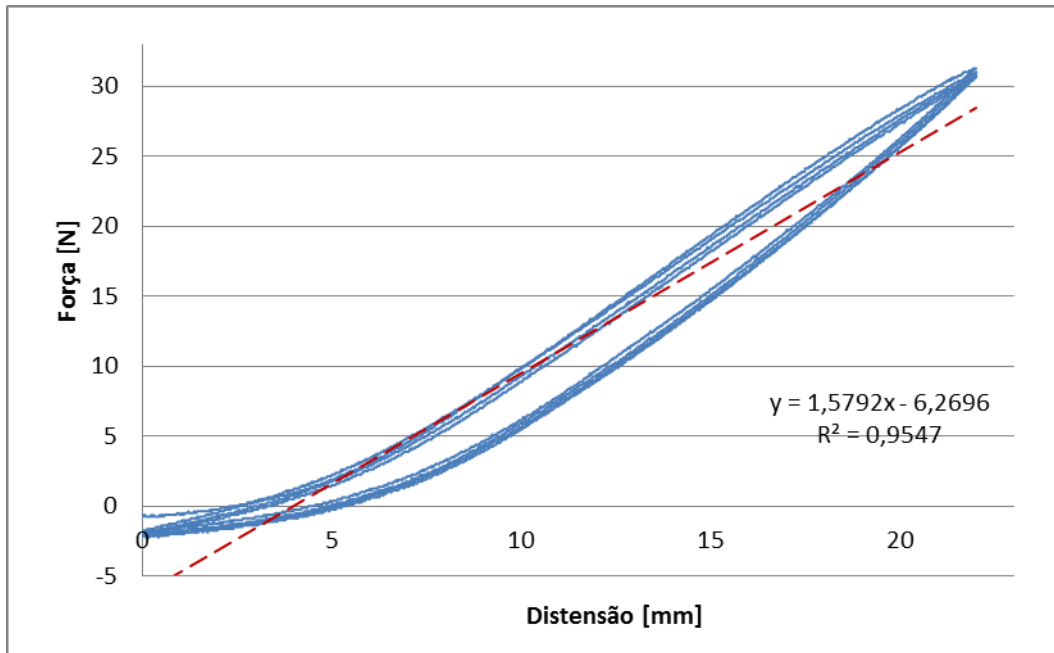
Figura 7.2 – Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 2,2 A.



**Figura 7.3** - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 2,8 A.



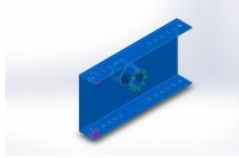
**Figura 7.4** - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 3,1 A.



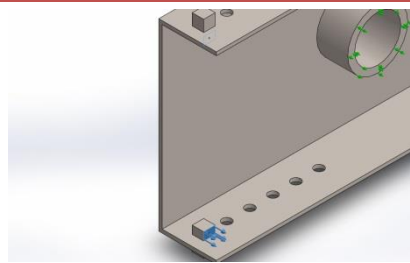
**Figura 7.5** - Ensaio de tração com distensão variável de 0 a 22 mm com corrente constante de 3,6 A.

### 7.3. Anexo C

**Tabela 7.5** – Propriedades do material da estrutura

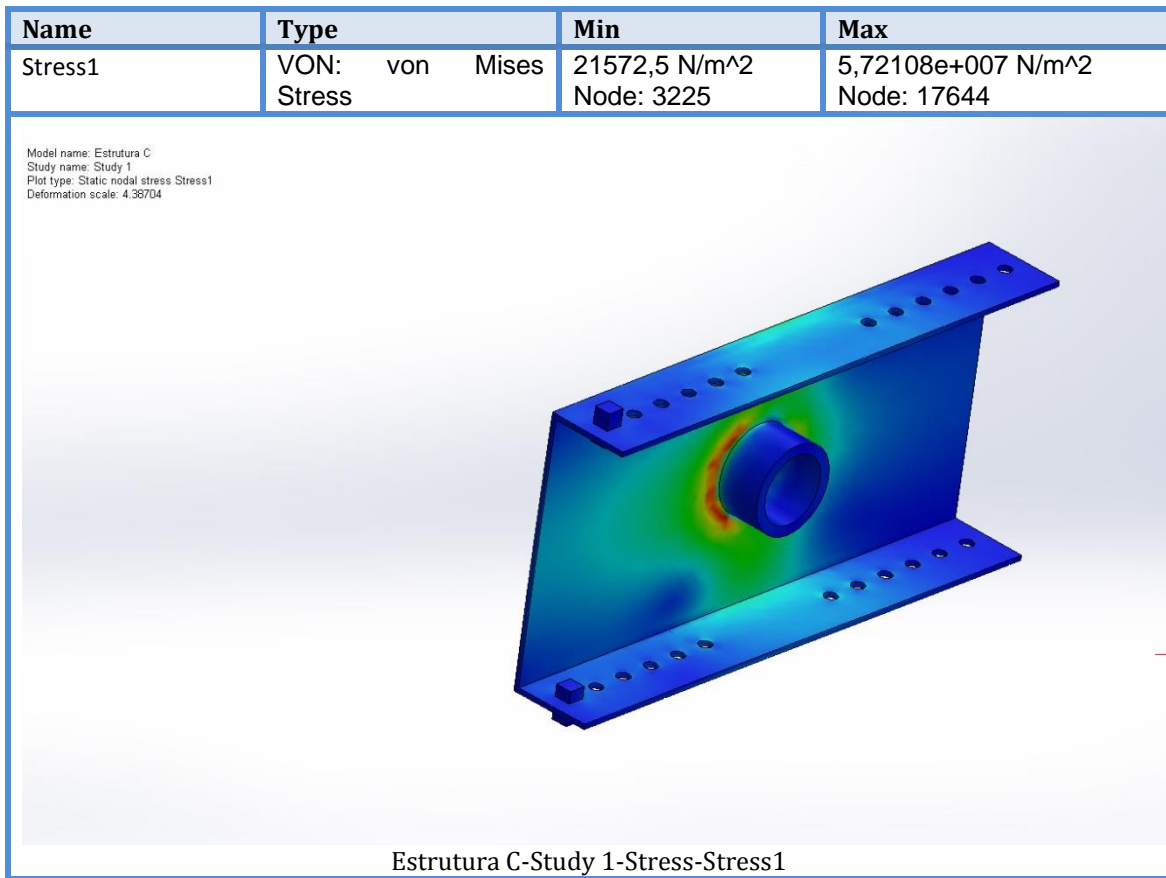
Model Reference	Properties	Components
	<p>Name: <b>AISI 316 Stainless Steel Sheet (SS)</b></p> <p>Model type: <b>Linear Elastic Isotropic</b></p> <p>Default failure criterion: <b>Max von Mises Stress</b></p> <p>Yield strength: <b>1,72369e+008 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Tensile strength: <b>5,8e+008 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Elastic modulus: <b>1,93e+011 N/m<sup>2</sup></b></p> <p>Poisson's ratio: <b>0,27</b></p> <p>Mass density: <b>8000 kg/m<sup>3</sup></b></p> <p>Thermal expansion coefficient: <b>1,6e-005 /Kelvin</b></p>	<p><b>SolidBody 1(Boss-Extrude5) (Estrutura C)</b></p>

**Tabela 7.6** – Carga aplicada na estrutura

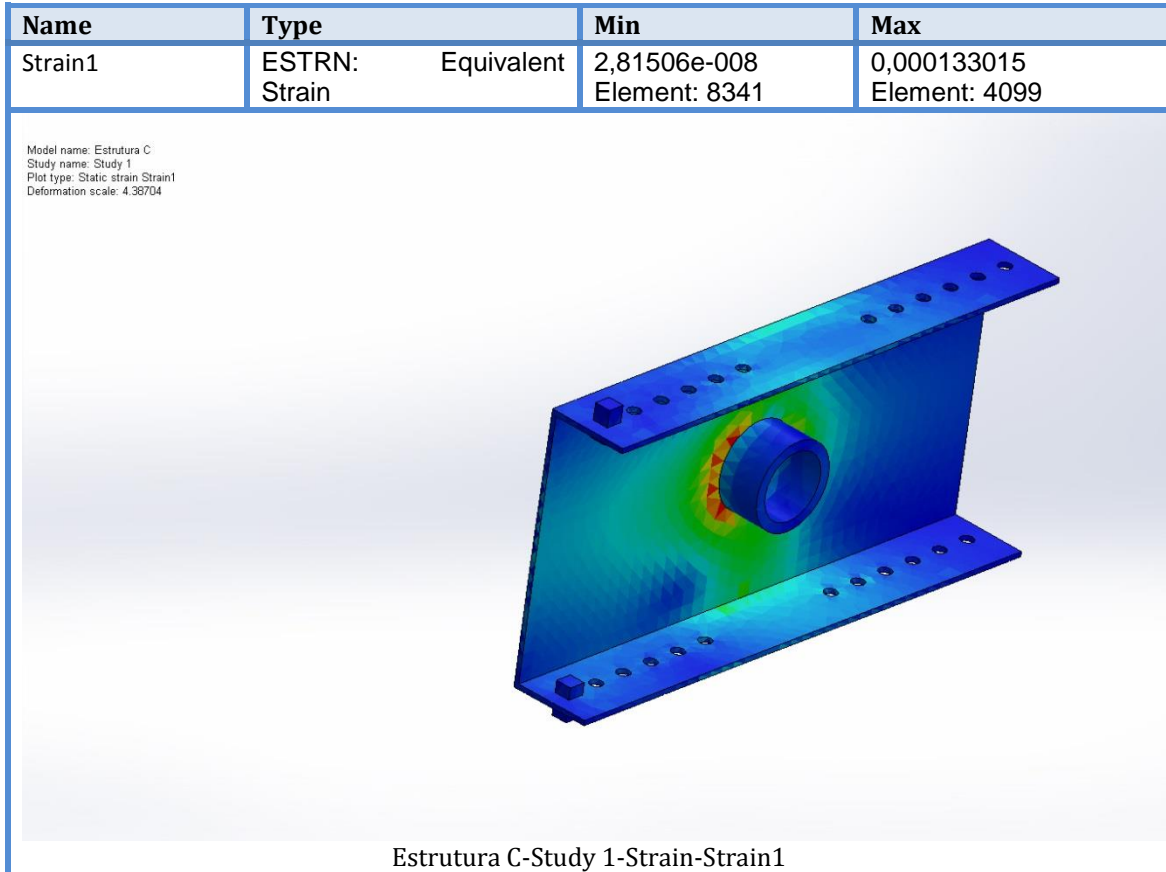
Load name	Load Image	Load Details
Force-1		<p><b>Entities 2 face(s)</b></p> <p><b>Type: Apply normal force</b></p> <p><b>Value: -40 N</b></p>



**Tabela 7.7 – Concentração de tensões na peça**



**Tabela 7.8** – Deformações verificadas na peça



#### 7.4. Anexo D

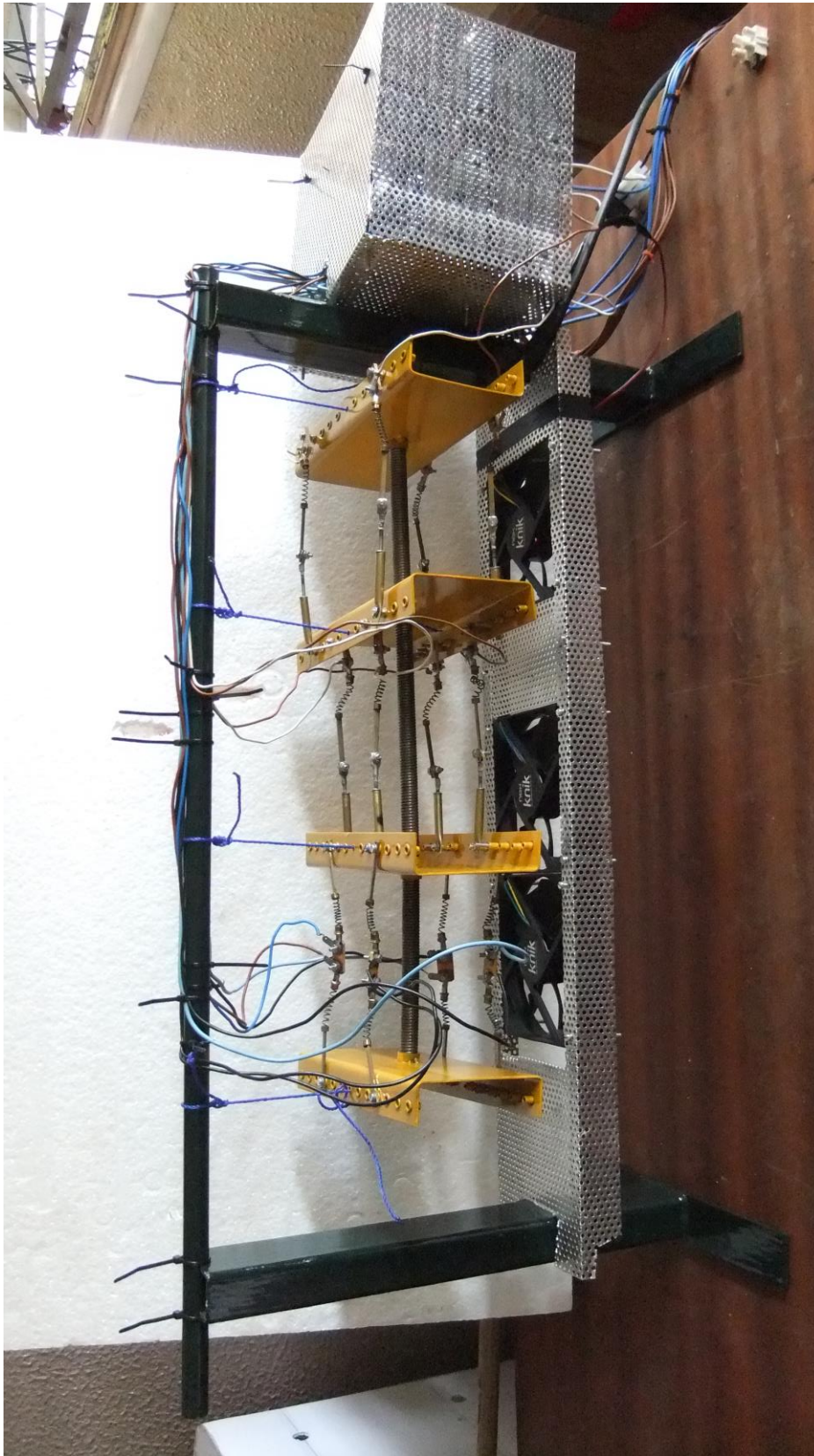


Figura 7.6 – Protótipo de estrutura de barbatana para propulsão submarina.

Construção de um protótipo de um sistema de propulsão submarino recorrendo a ligas com memória de forma.