

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

**Implementação de sistema de caracterização de fadiga  
em ligas de memória de forma submetidas a ciclos  
termomecânicos**

**Alunos: Rodrigo Borges Paixão**

**Rodolfo Bianco Rentes**

**Prof. Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco**

**Prof. Co-orientador: Paulo Pedro Kenedi**

**RIO DE JANEIRO**

**Novembro, 2014**

## AGRADECIMENTOS

Registramos nossos agradecimentos aos nossos familiares que sempre nos incentivaram e apoiaram durante os anos da graduação. Agradecemos especialmente aos professores Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco e Paulo Pedro Kenedi, além de ter nos orientado e ter tornado possível esse trabalho, foram fundamentais em nossa formação acadêmica. Agradecemos também ao CEFET/RJ e ao CNPQ que nos proporcionaram espaço físico (LACTM) e material para a viabilização do estudo.

# SUMÁRIO

<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Motivação.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Justificativa.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Objetivos.....</b>	<b>4</b>
<b>1.4. Organização do trabalho.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO 2 - LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1. Comportamento da estrutura cristalina.....</b>	<b>8</b>
<b>2.2. Comportamentos Característicos das Ligas com Memória de Forma.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.1. Efeito de memória de forma.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2.2. Efeito de Pseudoelasticidade.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3. Características elétricas.....</b>	<b>13</b>
<b>2.4. Fadiga.....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.1. Fadiga em ligas de memória de forma.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4.2. Fadiga funcional em ligas de memória de forma.....</b>	<b>18</b>
<b>CAPÍTULO 3 –Aplicações.....</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Na área médica.....</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Na indústria.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.1 Indústria do óleo e gás.....</b>	<b>23</b>
<b>3.2.2. Atuadores tipo mola.....</b>	<b>24</b>
<b>3.2.3. Aeroespacial.....</b>	<b>25</b>
<b>3.2.4. Construções civis.....</b>	<b>26</b>
<b>3.2.6. Robótica.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2.7. Outras aplicações.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1. Descrição.....</b>	<b>31</b>
<b>4.1.1. Concepção e modificação da estrutura para análise de fadiga.....</b>	<b>33</b>
<b>4.1.2. Modificação da estrutura.....</b>	<b>35</b>

4.1.3 Adaptações no suporte do fio.....	36
4.1.4 Instrumentação .....	36
4.1.5. Utilização de fonte de energia programável.....	38
4.2.Ciclos.....	41
4.3. Fio utilizado .....	42
<b>CAPITULO 5 – DADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>45</b>
5.1. Avaliação de características e repetibilidade do sistema .....	45
5.2 Verificação da mudança de propriedades elétricas do fio.....	48
5.3 Preparação do ciclo de fadiga .....	50
5.4. Opção de redução no tempo dos ciclos.....	55
5.5. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 490 MPa (81,3% carregamento máximo de trabalho) .....	57
5.6. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 660 MPa (carregamento máximo de trabalho) .....	58
5.7. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 800 MPa (carregamento máximo de trabalho) .....	60
5.8. Teste de fadiga clássica.....	61
5.9. Influência da Tensão na Fadiga Funcional.....	63
<b>CAPITULO 6 – CONCLUSÃO.....</b>	<b>64</b>

## RESUMO

O presente trabalho visa estabelecer uma metodologia experimental que proporcione a aquisição de dados para o desenvolvimento de estudos envolvendo a fadiga em fios com memória de forma submetidos a ciclos térmicos de atuação.

A metodologia apresentada consiste na utilização de um dispositivo que permite a análise de deslocamento do fio através da aplicação simultânea de carregamentos mecânicos constantes e ciclos de corrente elétrica que, por efeito joule, aquecem um fio de SMA, o qual experimenta em seguida uma etapa de resfriamento por convecção.

As curvas de evolução da corrente e deslocamento aqui citadas através do sistema desenvolvido permitiram a análise de diferentes comportamentos, não apenas o rompimento do fio, mas também a fadiga funcional, que se dá quando as perdas de propriedade do fio já não garantem mais a sua utilidade funcional.

## **ABSTRACT**

The present work aims to establish an experimental methodology to provide data acquisition for development of studies involving fatigue on shape memory alloy wires submitted to thermal cycles.

The presented methodology is based on a device that allows the displacement analysis on a wire, when mechanical and electrical stresses are imposed simultaneously. The mechanical stress act on the wire, then the wire is heated by joule effect.

The current and displacement curves obtained on the developed system, allow to study different behaviors, not only the wire rupture, but also the functional fatigue, that begins when the wire properties does not execute the original wire work.

.

## CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

### 1.1.Motivação

As ligas de memória de forma (*Shape Memory Alloy* - SMA) consistem em um grupo de materiais que possuem a capacidade de retornar à sua configuração inicial quando submetidos a um ciclo termomecânico adequado. As transformações da estrutura cristalina são responsáveis por este comportamento e são induzidas tanto por uma variação de tensão quanto pela variação de temperatura. Estes materiais têm sido estudados para diversas aplicações devido às propriedades especiais que possuem a memória de forma e pseudoelasticidade. As SMAs que têm capacidade de “recuperar” grandes deformações, que em alguns casos podem alcançar valores de até 7% como no caso da liga Ni-Ti, conhecida comercialmente como Nitinol, sendo esta a mais utilizada atualmente [1]. Tal habilidade motiva diversas aplicações destas ligas em aplicações como a aeroespacial, óleo e gás, biomecânicas e entre outros.

Aplicações tais como fios atuadores e *muscle wires* vêm tendo destaque em diversas áreas de pesquisa. Atualmente, muito se acredita no potencial de tais ligas quanto à robótica e à substituição de motores e válvulas solenoides que são pesadas e geram bastante ruído. Sabendo-se que os elementos de SMA estão submetidos a ciclos de operação, o estudo da fadiga se torna fundamental para o dimensionamento desses elementos. Deve-se atentar sempre ao fato da fadiga funcional, muitas vezes acontecer antes da fadiga estrutural, onde haverá o completo rompimento da liga. A fadiga funcional se dá quando a liga perde suas características a ponto de não exercer mais a função a que foi projetada. No caso das ligas de memória de forma, sabe-se que ocorre uma diminuição da variação de deslocamento após series de carregamentos termomecânicos, bem como a perda da memória de forma quando submetida a temperaturas excessivas [32]

O presente estudo visa estabelecer um procedimento experimental simples e de custo reduzido, que permita obter dados experimentais com precisão suficiente para que se possa avaliar o comportamento a fadiga em fios de SMA submetidos a ciclos térmicos e com carregamento mecânico constante. A metodologia apresentada, baseada no procedimento experimental desenvolvido pelo professor Dimitri C. Lagoudas da

Texas A&M University nos EUA [11], consiste na utilização de um dispositivo que permite a análise de deslocamento do fio através da aplicação simultânea de carregamentos mecânicos constantes e ciclos de corrente elétrica que, por efeito joule, aquecem um fio de SMA, o qual experimenta em seguida uma etapa de resfriamento por convecção.

Para a realização do experimento, adaptou-se o dispositivo, composto por uma estrutura metálica desenvolvida no CEFET/RJ [8], com o objetivo de aumentar as taxas de carregamento cíclico térmico, através da redução do tempo associado à etapa de resfriamento por convecção com a incorporação de um reservatório para que o fio possa permanecer submerso em fluido não condutor durante o processo. Para a etapa de aquecimento do fio utilizou-se uma fonte de corrente elétrica que permite controlar a corrente aplicada no fio através de um controle do tipo *on-off*. Um transdutor de deslocamento potenciométrico e um módulo de aquisição de dados são utilizados para obter os dados de corrente e deslocamento ao longo do tempo. Um circuito simples composto por resistores foi utilizado para que se pudesse obter correntes controladas, de forma a preservar não só o fio, mas todos os componentes do sistema.

## **1.2. Justificativa**

A análise experimental se justifica devido ao comportamento singular e complexo das ligas de memória de forma. A descrição do comportamento deste material requer a inclusão de diversas variáveis, como, por exemplo, o percentual de Austenita e Martensita presente que influencia em, além do próprio comportamento termomecânico envolvendo as variáveis de tensão, deformação e temperatura, diversos outros aspectos como a resistividade elétrica [26]. Este material apresenta ainda efeitos como a perda das propriedades associadas aos efeitos de memória de forma em algumas situações de carregamentos cíclicos de temperatura e/ou tensão.

Estudos apontam que a perda de capacidade de um atuador gerar trabalho após repetidos ciclos de ativação (mudança de fase) e a perda de capacidade de atuação devido ao aquecimento contínuo ou excessivo, são dois fatores cruciais para o tempo de



vida funcional de fios de memória de forma. Também associado ao número de ciclos, existe uma diferença do calor necessário para a transformação da liga. Como mostram as Figuras 1 e 2. [27].

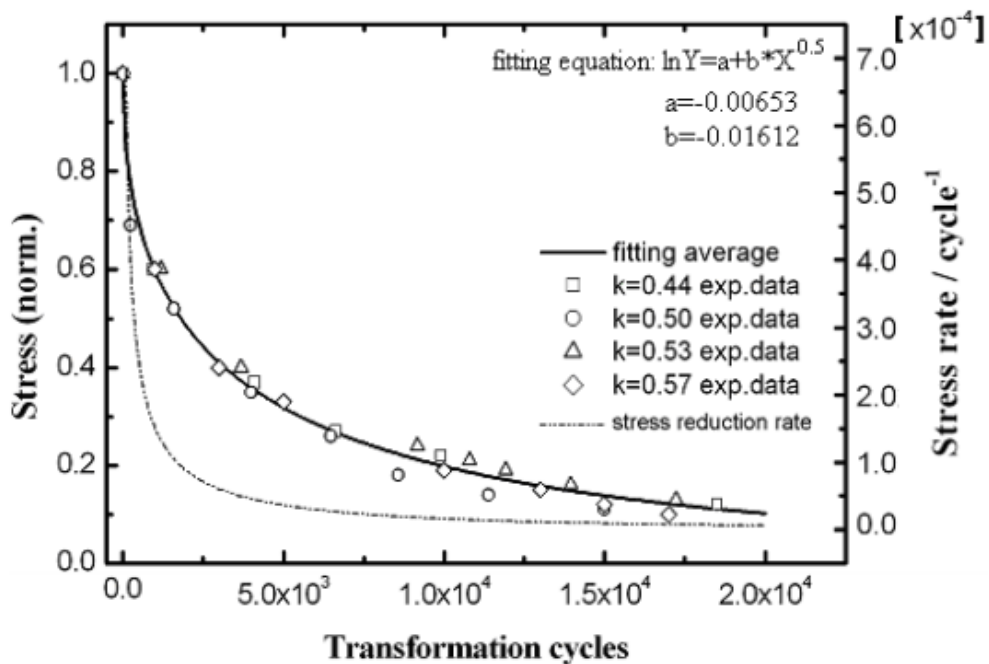


Figura 1 – Variação da capacidade de gerar tensão mecânica por numero de ciclos [26]

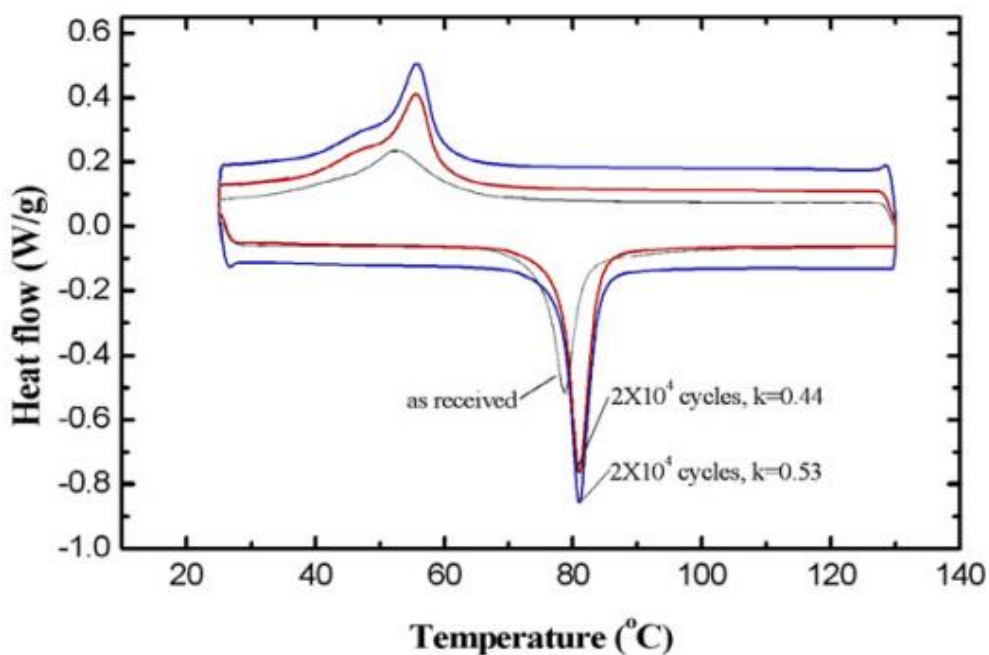


Figura 2 – Relação da variação da temperatura com os ciclos [26]

Como a maioria dos materiais, as ligas de memória de forma, apresentam claras modificações estruturais quando submetidas aos diversos ciclos de fadiga. A Figura 3 [27] mostra a visão por um microscópio eletrônico de um fio de memória de forma, submetido a ciclos de transformação de fase.

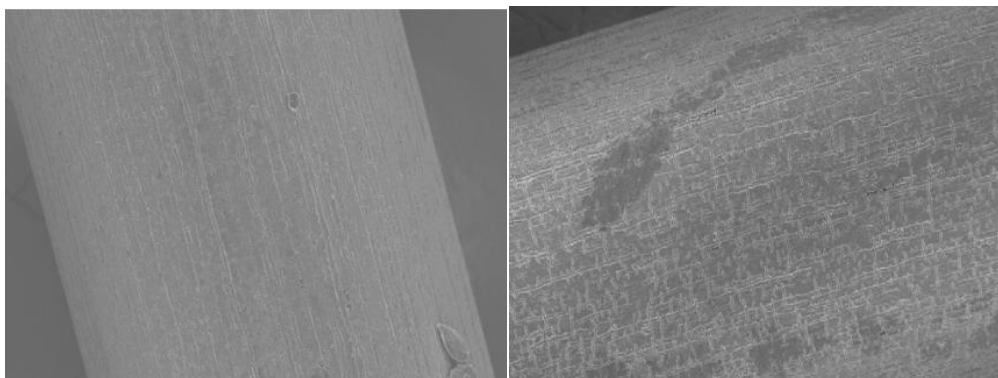


Figura 3 – Micrografia do fio antes (esquerda) e depois dos ciclos termomecânicos

A figura 3, mostra o fio com uma alta densidade de micro trincas (5 a 10 microns), devido ao carregamento termomecânicos cíclicos. Com a grande irregularidade da liga, aumenta-se o nível de tensão residual e com isso eleva-se o risco de falha nessas regiões. Outro ponto a ser observado é a elevação do nível de corrosão nas áreas afetadas, impactando diretamente na vida em fadiga do material. [11]

Portanto, o presente trabalho visa contribuir para que futuros estudos mais aprofundados, resultados confiáveis, e corpos de prova ideais para análises microscópicas possam ser desenvolvidos para estudar o comportamento de ligas com memória de forma submetidas a carregamentos de fadiga.

### 1.3. Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo estabelecer condições experimentais e aquisição de dados que descrevam os diferentes comportamentos da liga de memória de forma submetida à fadiga termomecânica, incluindo fadiga funcional. O experimento tem como base manter fios de memória de forma tensionados por um carregamento

constante (peso morto) e induzir a fadiga através da variação cíclica da deformação promovida pela oscilação de temperatura. Esta por sua vez, é obtida através de um carregamento cíclico composto de 2 etapas: (1) aquecimento induzido por efeito Joule através da aplicação de corrente elétrica pelo fio e (2) resfriamento induzido por convecção em meios líquido ou ar. Captando os dados de deslocamento do fio, com auxílio de um transdutor de deslocamento, e a variação de corrente é possível observar o comportamento da liga ao longo do tempo quando submetida a diversos regimes de trabalho.

## **1.4. Organização do trabalho**

No Capítulo 2, são abordadas questões teóricas sobre a estrutura cristalina, características e peculiaridades das ligas em questão. Expõe-se os principais efeitos como a pseudo-elasticidade e a memória de forma e suas aplicações.

Em seguida, o Capítulo 3 aborda brevemente o cenário atual das ligas de memória de forma em relação à fadiga e às aplicações, pois são aspectos fundamentais do presente trabalho e do experimento que será realizado numa segunda etapa.

No Capítulo 4 descreve-se o procedimento experimental desenvolvido, os elementos e as modificações aplicadas ao um dispositivo para permitir o desenvolvimento de ensaios de fadiga em fios de SMA.

Os resultados obtidos experimentalmente são apresentados no Capítulo 5, juntamente com os questionamentos que o presente trabalho se propõe.

Por fim, são apresentadas as conclusões e ponderações sobre os dados obtidos e as possibilidades para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 - LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

As ligas de memória de forma são ligas que possuem comportamentos característicos como a memória de forma, para o qual um dispositivo retorna a uma configuração inicial depois de sofrer uma deformação residual induzida por um carregamento mecânico, com a aplicação de um carregamento térmico; a pseudo-elasticidade, que é a característica da liga desenvolver elevadas deformações com a aplicação de um carregamento mecânico que são recuperadas com a retirada do carregamento. Estes processos ocorrem devido a transformações de fase microestruturais do material. Outra característica interessante de tais materiais, sua boa resistência à corrosão [8]

Diferente das ligas de Fe-C, que a fase martensítica possui uma estrutura tetragonal de corpo centrado (TCC) e a fase austenítica, cúbica de face centrada (CFC), onde o carbono precisa migrar dentro da estrutura, nas ligas de memória de forma não existe migração de átomos na microestrutura. A transformação ocorre apenas pela reorganização dos átomos. Isso faz com que esse efeito nas ligas SMA não dependa do tempo, sendo um processo não-difusivo que depende apenas de um estímulo termomecânico adequado. Esses estímulos podem resultar em uma estrutura de martensita maclada, quando induzida por temperatura, e a não maclada, induzida por tensão (trativa ou compressiva). Com o aumento da temperatura, retorna-se à forma cúbica, austenítica.

## 2.1. Comportamento da estrutura cristalina

O comportamento da estrutura cristalina em relação aos estímulos termomecânicos pode ser representado pela sequência mostrada nas figuras 4 e 5 e a relação entre a variação do comprimento de um elemento de SMA associada a um processo de transformação de fase e temperatura mostrada na Figura 5.

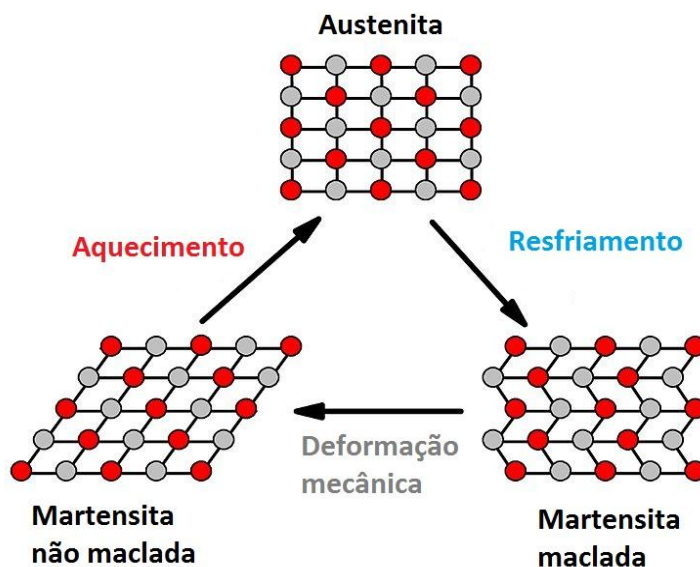


Figura 4: Deformação da estrutura cristalina em uma liga de memória de forma [25]

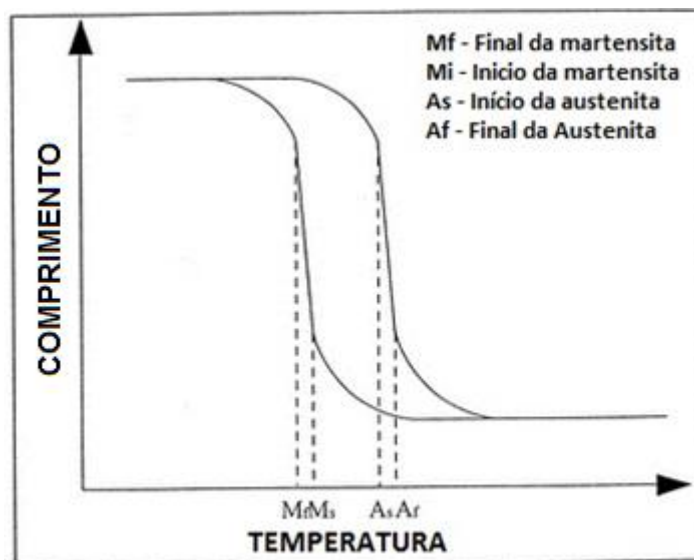


Figura5: Variação do comprimento de um elemento de SMA associada a transformação de fase *versus* curva de temperatura para um carregamento constante.

## 2.2. Comportamentos Característicos das Ligas com Memória de Forma

### 2.2.1. Efeito de memória de forma

O Efeito de Memória de Forma (E.M.F.) refere-se à habilidade de certos materiais de retornar a uma configuração, uma determinada forma, mesmo que grandes deformações (além das deformações elásticas) ocorram. Em ligas de memória de forma ocorre uma transformação martensítica que gera a deformação através de um mecanismo chamado “maclação”, abaixo da temperatura de transformação martensítica [8]

Esta deformação (reversível) sofre então um processo de reversão quando a estrutura de Martensita maclada se transforma em uma matriz Austenítica por aquecimento. Logo, Este efeito está relacionado com a transformação cristalograficamente reversível da Martensita.

O efeito memória de forma bidirecional, ou de duas vias (*two-way*), pode ser definido como a propriedade que certos materiais adquirem, após serem submetidos a um processo termomecânico denominado “treinamento”.

Tal efeito consiste em oscilar entre formas definidas, podendo apenas retornar a uma posição inicial, ou oscilar entre duas formas determinadas para seu estado martensítico e austenítico.

Caso a liga somente recupere sua deformação após o aquecimento, então se chama unidirecional ou de uma via (*one-way*).

Caso oscile entre as formas definidas para as respectivas estruturas cristalinas, chama-se bidirecional ou sentido duplo.

Este fenômeno está baseado, cristalograficamente, na movimentação interna dos contornos de variantes ou intervariantes da Martensita. A Figura 6 esquematiza todo o processo memória de forma.



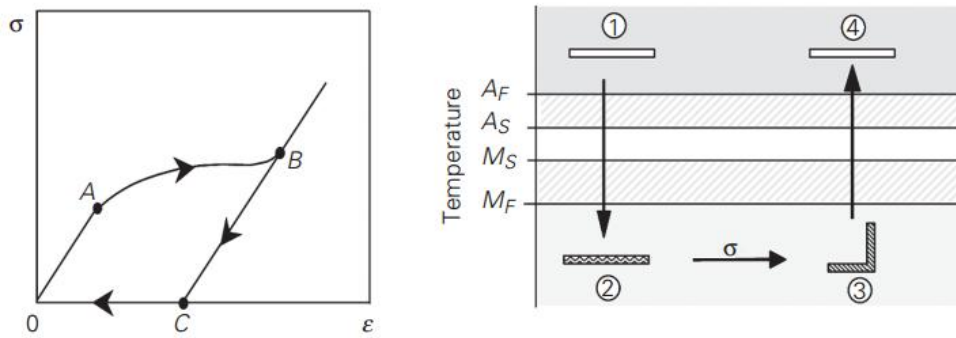


Figura 6: Efeito de memória de forma unidirecional [12]

A Figura 6 mostra do lado esquerdo, a curva de tensão-deformação de uma liga de memória de forma que se encontra em uma baixa temperatura, abaixo da temperatura  $M_f$  (temperatura na qual apenas a Martensita é estável num estado livre de tensão). Então, submete-se a amostra a um carregamento mecânico para que a tensão alcance o ponto A (um valor crítico de tensão). Com isso, ocorre a transformação entre as fases Martensíticas, atingindo assim o ponto B. Ao retirar o carregamento, percebe-se no ponto C, que ainda há uma deformação residual. Essa deformação residual será recuperada devido ao efeito de memória de forma ao se aquecer a amostra. Este caso representa o efeito de memória de forma unidirecional.

Para efeito bidirecional, a estrutura martensítica e Austenítica têm formas diferentes e determinadas. Essa determinação de forma seria fruto do “treinamento da liga” que consiste em posicionar a liga nas posições desejadas durante suas respectivas fases. Neste caso, não é preciso um carregamento externo para tencionar a amostra, apenas a variação de temperatura já é capaz de gerar a variação de forma, como mostra a figura 7.

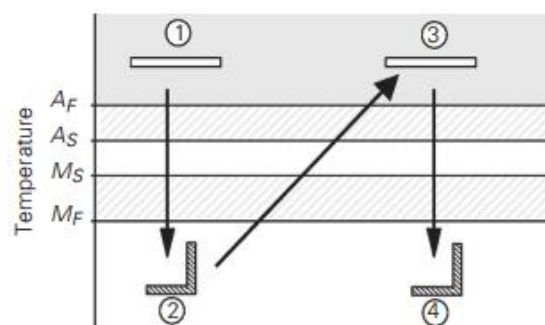


Figura 7: Efeito de memória de forma bidirecional[12]

### 2.2.2. Efeito de Pseudoelasticidade

Este é um efeito isotérmico por natureza, se dá pelo armazenamento de energia potencial. Neste caso a transformação de fase reversível é induzida por tensão trativa ou compressiva. Contrariamente ao E.M.F., a pseudoelasticidade não ocorre com a mudança de temperatura. Os aspectos do comportamento termomecânico (E.M.F) estão associados à formação de Martensita ou à sua reorientação por movimento das interfaces Austenita-Martensita e Martensita-Martensita. O deslocamento destas interfaces pode ter um caráter reversível ou irreversível. Quando o movimento é reversível (exemplo: quando as tensões aplicadas são inferiores ao limiar de reversibilidade), a deformação macroscópica será o resultado de uma deformação elástica.

Pode-se entender esse comportamento ao se observar a Figura 8, onde o trecho *DA*, representa a fase elástica do material (estado austenítico) sob tração. Posteriormente, o trecho *AB* representa a deformação induzida por transformação de fase (estado martensita trativa). Após a remoção do carregamento tem-se o estado marternsitico sem tração, então observa-se a recuperação da deformação induzida pela transformação de fase *BC* promovida pela mudança de fase para o estado austenítico, ocasionando o retorno à configuração original. Por isso, chamamos o efeito de Pseudoleasticidade.

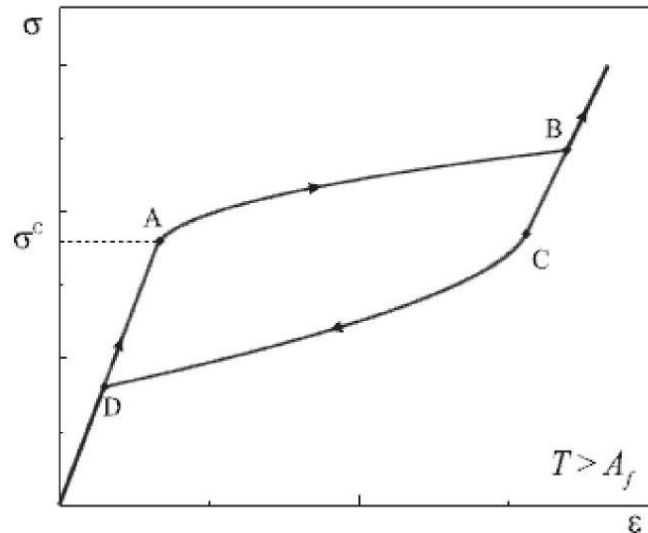


Figura 8: Efeito de pseudoelasticidade [24]

### 2.3. Características elétricas

Os atuadores de SMA são muitas vezes acionados através da aplicação de uma corrente elétrica que aquece o material por efeito joule. Quando submetidos a temperaturas elevadas podem sofrer danos permanentes. Com isso, deformações permanentes podem ser geradas como consequência ou a perda dos efeitos característicos.

Como a temperatura está diretamente ligada à densidade de corrente imposta ao fio, deve-se seguir cuidadosamente as restrições do fabricante para que se tenha um uso prolongado do material. A Tabela 1. Apresenta dados que podem ser utilizados para auxiliar na escolha dos parâmetros de um atuador de SMA.

Diameter Size inches (mm)	Resistance ohms/inch (ohms/meter)	Pull Force* pounds (grams)	Cooling Deformation Force* pounds (grams)	Approximate** Current for 1 Second Contraction (mA)	Cooling Time 158°F, 70°C "LT" Wire *** (seconds)	Cooling Time 194°F, 90°C "HT" Wire *** (seconds)
0.001 (0.25)	36.2 (1425)	0.02 (8.9)	0.012 (5)	45	0.18	0.15
0.0015 (0.38)	22.6 (890)	0.04 (20)	0.024 (12)	55	0.24	0.20
0.002 (0.050)	12.7 (500)	0.08 (36)	0.048 (22)	85	0.4	0.3
0.003 (0.076)	5.9 (232)	0.18 (80)	0.11 (48)	150	0.8	0.7
0.004 (0.10)	3.2 (126)	0.31 (143)	0.19 (86)	200	1.1	0.9
0.005, (0.13)	1.9 (75)	0.49 (223)	0.29 (134)	320	1.6	1.4
0.006 (0.15)	1.4 (55)	0.71 (321)	0.43 (193)	410	2.0	1.7
0.008 (0.20)	0.74 (29)	1.26 (570)	0.76 (342)	660	3.2	2.7
0.010 (0.25)	0.47 (18.5)	1.96 (891)	1.18 (535)	1050	5.4	4.5
0.012 (0.31)	0.31 (12.2)	2.83 (1280)	1.70 (768)	1500	8.1	6.8
0.015 (0.38)	0.21 (8.3)	4.42 (2000)	2.65 (1350)	2250	10.5	8.8
0.020 (0.51)	0.11 (4.3)	7.85 (3560)	4.71 (2136)	4000	16.8	14.0

Tabela 1: Características elétricas [2]

De acordo com estudo feito pelo departamento de física de Milão [28] em diferentes ligas, incluindo um fio Ni<sub>25</sub>Ti<sub>50</sub>Cu, as características elétricas das ligas de memória de forma variam de acordo com a sua fase e deformação. De acordo com o estudo, as variações chegam a cerca de 17% dependendo do tipo situação imposta, como nas Figuras 9, 10 e 11.

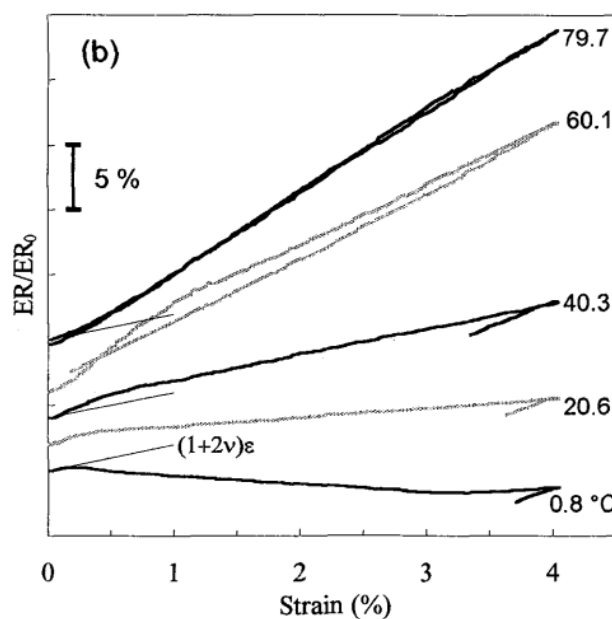


Figura 9 – Variação das propriedades elétricas com deformação [28]

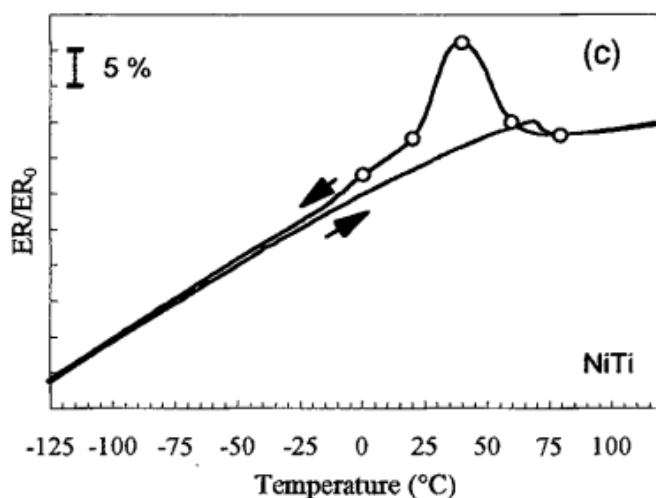


Figura 10 – Variação das propriedades elétricas com a temperatura [28]

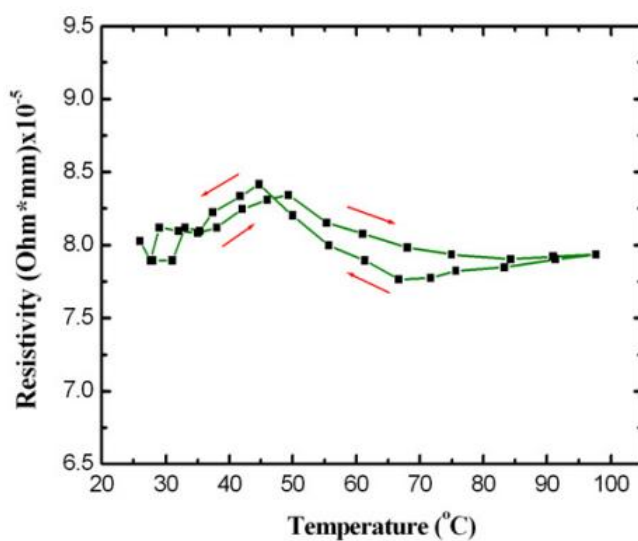


Figura 11 – Variação de resistência elétrica com a temperatura

Estas variações não terão influência considerável nos testes feitos neste trabalho. A resistência do fio utilizado é de  $8 \Omega$  por metro em uma amostra de 100 mm, o que resulta em uma variação de 17% em  $0,8 \Omega$ . Para que este efeito seja reduzido utilizou-se um circuito composto por resistores que foi colocado em série, apenas para proteger o sistema e controlar melhor a corrente, com resistência muito superior. Porém, este estudo irá levar em conta essas variações a fim de confirmar experimentalmente o que outros estudos já apontam e assim verificar a precisão do procedimento.

## **2.4. Fadiga**

O fenômeno de Fadiga é muito conhecido na indústria mecânica, pois é o responsável pela maior parte das falhas de componentes mecânicos. Caracterizada quando componentes mecânicos estão sujeitos a carregamentos cíclicos, a falha por fadiga é de natureza catastrófica, pois pode ocorrer sob um nível de tensões inferior ao limite de resistência do material e até mesmo ao seu limite de escoamento, sem aviso prévio.

O dano gerado pelo carregamento de fadiga, afeta a microestrutura do material. Dependendo do tipo do carregamento, esses danos são acumulados e o componente pode ser levado a uma falha por fadiga, ocasionando a separação física do material. No caso das ligas de memória de forma, esse tipo de fadiga é relevante, porém deve-se atentar para a fadiga funcional, que é o ponto em que a fadiga afetará a microestrutura a ponto que a deformação induzida por transformação de fase não esteja mais sendo funcional.

### 2.4.1. Fadiga em ligas de memória de forma

Os dados de fadiga em ligas de memória de forma encontrados na literatura podem ser divididos em altos ciclos, com baixas tensões e elevados número de ciclos e baixos ciclos de fadiga; resultado de carregamentos termomecânicos cíclicos baseados em tensão mecânica constante e variações de temperatura induzidas por efeito Joule [4] ou deformação constante [5]. A análise de trincas após um ciclo termomecânico pode fornecer informações importantes sobre como se dá o acumulo de dano na estrutura. Segundo Lagoudas [11], quando a liga é submetida a um ciclo termomecânico severo, não se pode mais ser considerada a condição semi-estática. Nesse caso, têm-se dois tipos de danos, o chamado “clássico” e outro onde surgiram trincas devido ao alto nível de tensões.

Aspectos da fratura clássica aparecem em amostras submetidas a ciclos termomecânicos, podem ser observadas propagações claras das linhas de fadiga ao longo da amostra. Já o rompimen é caracterizado por trincas circulares, na parte mais exterior da amostra que já apresentam um tamanho mais elevado, se tornando um grande concentrador de tensão [3]. Como se vê na Figura 12.



Figura 12: Análise de amostras de peças com falha por fadiga [3]

Tratando-se de fadiga em fios de memória de forma, deve-se atentar à fadiga funcional, termo este usado por HUMBEECK & STALMANS (1998). Esta ocorre quando a liga já não tem capacidade de exercer sua função de projeto, ou seja, mesmo sem romper, ocorre a perda das características da liga, gerando por exemplo a

diminuição nos deslocamentos oriundos dos ciclos de temperatura ou das características de memória de forma.

Os estudos sobre fadiga em fios de liga de memória de forma [28] mostram que a quantidade de ciclos de transformação e a exposição prolongada a altas temperaturas são dois fatores cruciais para a vida útil de fios como atuadores. Em relação à questão do número de ciclos, tal estudo comprova que a capacidade de atuação do fio diminui de maneira exponencial, tendo sua capacidade máxima até cerca de 2000 ciclos, sua meia vida em 4000 ciclos e sendo totalmente ineficiente com cerca de 20.000 ciclos. Essa ineficiência se dá ao fato de que a liga não consegue mais gerar tensão o suficiente para servir como atuador. O estudo citado, parte dos mesmos princípios usados no presente trabalho, podendo então servir como parâmetro comparativo.

Com um estudo mais aprimorado sobre a fadiga funcional em ligas de memória de forma submetidas aos carregamentos termomecânicos, pode-se obter uma garantia maior sobre a aplicabilidade devido ao melhor entendimento do quanto tempo a liga se mantém funcional, com isso, tem-se a expansão de seu uso comercial.

#### **2.4.2 Fadiga funcional em ligas de memória de forma**

Existem alguns fatores que afetam a vida útil das ligas de memória de forma, em relação à sua capacidade de realizar o trabalho para o qual foram projetadas. Ou seja, quando submetidas a certas condições, as ligas perdem parte de suas propriedades, tornando-se menos funcionais.

Gráficos tensão X deformação com temperatura constante, seguidas de uma volta por transformação estrutural, ilustram o grau do efeito que as tensões de pico tem em relação às suas características de pseudoelasticidade. Quando mais elevadas as tensões aplicadas, mais rápido ocorrem as perdas da super-elasticidade da liga. Desaparecendo em torno de 20 ciclos a 930 MPa.



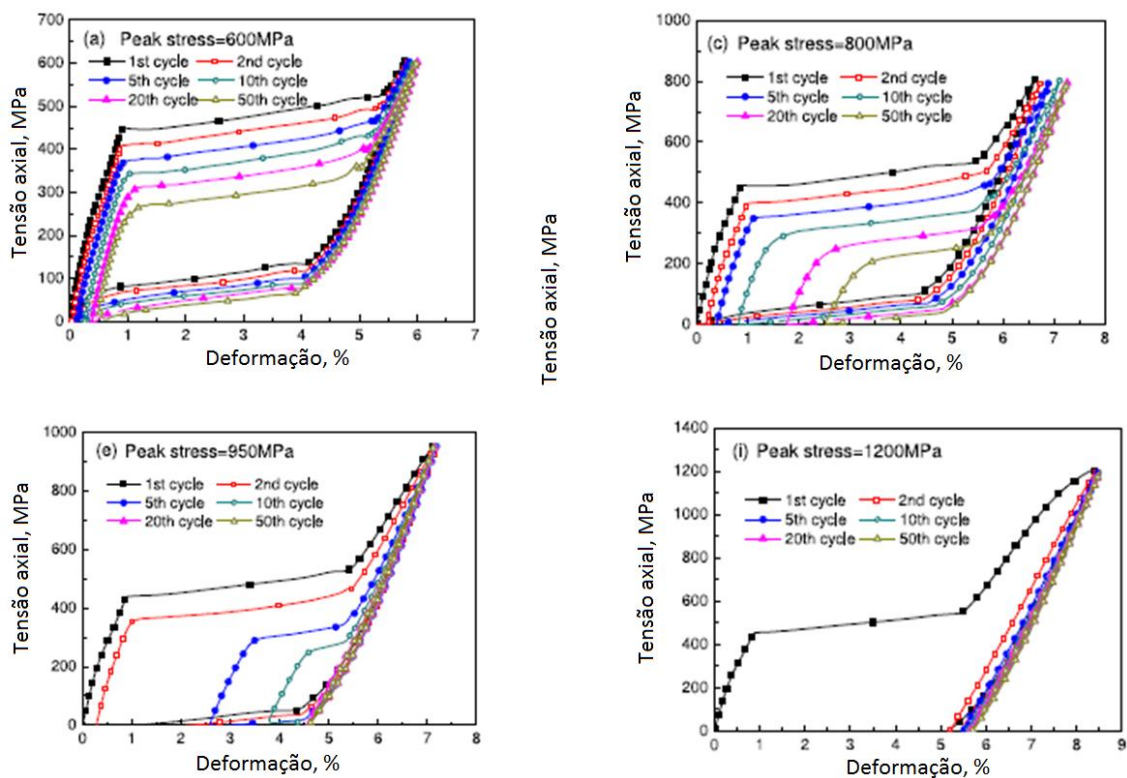


Figura 13: Curvas tensão x deformação – Perda das características pseudoelásticas [30]

Outro aspecto principal funcional da liga pseudoelástica, é sua capacidade de gerar trabalho a partir da transformação de fase. Estudos [30] indicam que junto com a perda do efeito de pseudoelasticidade, devido a aplicação de tensões de pico elevadas, surge também a perda da capacidade de dissipação de energia.

As curvas da Figura 13 podem também ser traduzidos como a perda da capacidade de retornar ao seu estado inicial. A Figura 14 apresenta esta informação de uma outra forma, relacionando a dissipação de energia com o valor do pico de tensão, mostrando a evolução da fadiga funcional.

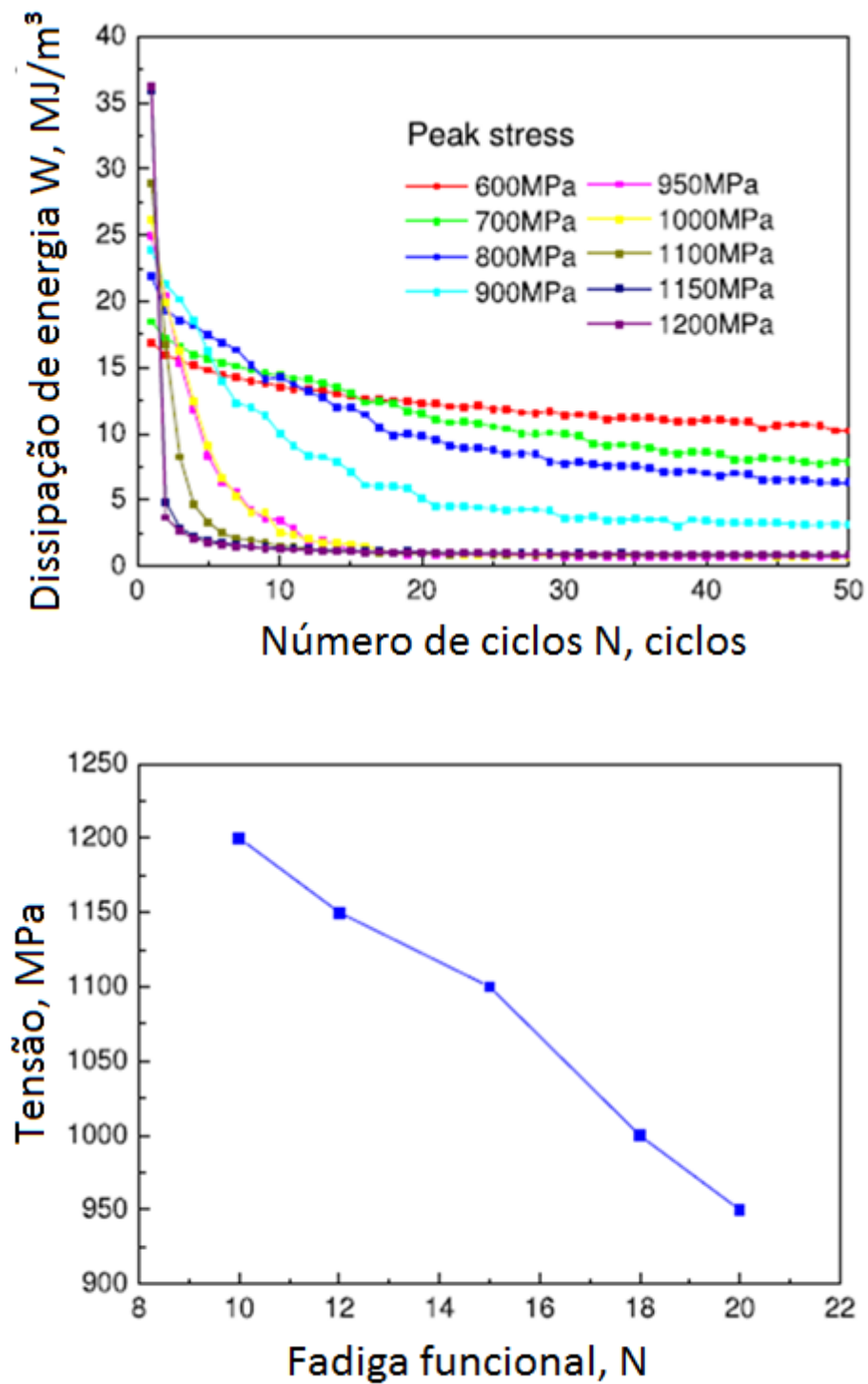


Figura 14: Fadiga funcional associada à perda de capacidade de dissipar energia [30]

## CAPÍTULO 3 –Aplicações

No final dos anos 70, observou-se uma primeira aplicação de memória de forma bem sucedida na indústria aeroespacial. Foi usada em uma aeronave F-14 da marinha dos Estados Unidos, uma “luva” para conectar dois tubos (Figura 19). Essa demonstração de uso da liga em um dispositivo hidráulico de alta pressão, levou a produção de mais de um milhão de dispositivos nos anos seguintes [7]. Essa pode ser considerada a primeira aplicação comercial realmente expressiva das ligas.

As ligas de memória de forma começaram então a ser fortemente exploradas quanto a sua aplicação na área da médica. Houveram algumas investidas para produção de óculos, antenas de telefones celulares, dispositivos automotivos, mas que não alcançaram um destaque expressivo no mercado.

Entretanto, devido à sua boa resistência à corrosão e suas características especiais, como a pseudoelasticidade e a memória de forma, tais ligas vêm ganhando espaço quanto a outras aplicações.

### 3.1 Na área médica

Componentes feitos com ligas de memória de forma vêm sendo amplamente utilizados em aplicações biomédicas, tais como:

**Aparelhos ortodônticos:** Fios de aparelhos ortodônticos utilizam as propriedades de memória de forma das ligas, para que quando ativadas pela temperatura corporal, passem a exercer uma determinada tensão sob os dentes, como mostrado na Figura 14.



Figura 14: Aplicação ortodôntica de SMA[4]

**Cateteres (Stents) para veias e artérias:** Estruturas metálicas feitas a base de ligas SMA são utilizadas para desbloquear e manter abertas veias e artérias entupidas, ilustrado na Figura 15.

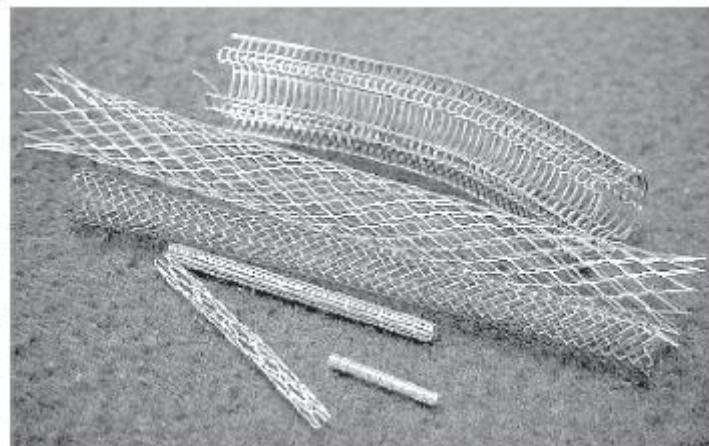


Figura 15: Cateter de SMA [14]

**Próteses e grampos:** Itens para substituir ou fixar ossos fraturados ou danificados também são feitos em ligas SMA devido à baixa rejeição das ligas Ni-Ti pelo organismo humano. Outro aspecto interessante no caso dos grampos, é que devido aos efeitos da liga, quando em contato com a temperatura do corpo humano, os grampos se mantêm sempre tensionados, garantindo assim, melhor recuperação de uma fratura, como exemplificado na Figura 16.

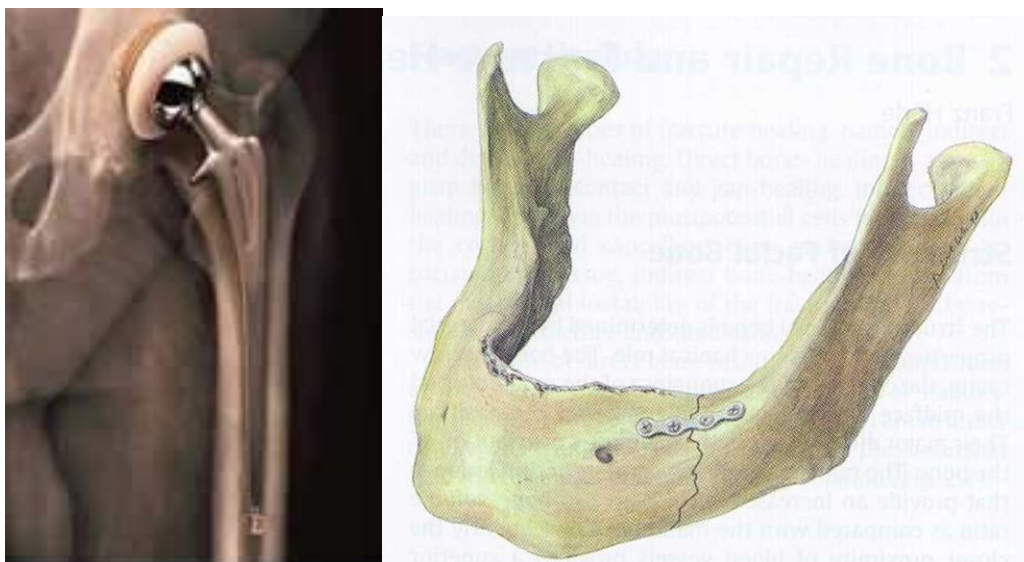


Figura 16: Próteses ósseas de SMA [6]

### 3.2 Na indústria

As aplicações das ligas SMA na indústria são em sua maioria voltadas para baixas frequências de operações. Tais ligas trabalham melhor em baixas frequências, mas com a grande vantagem de serem compactos e da sua pouca necessidade de manutenção, o que se torna principalmente vantajoso quando se trata de manutenções em grandes profundidades no mar. Outras vantagens são a alta resistência a corrosão, atuação controlável e alta vida em fadiga. [18]

#### 3.2.1 Indústria do óleo e gás

A crescente demanda da indústria de óleo e gás em todo o mundo, contribuíram muito para a evolução da tecnologia nesse campo. As ligas de memória de forma têm um grande potencial a ser explorado, devido a sua alta resistência a corrosão e superelasticidade. As SMAs podem ser usadas até mesmo em águas ultra profundas como uma excelente alternativa para atuadores, quando comparado aos tradicionais pneumáticos, hidráulicos e motorizados. Conectores e elementos de fixação com capacidade de “auto-torque” são outra possibilidade [18].

Uma possível aplicação se dá nas arruelas de liga de memória de forma, que atuam como pré-tensionadores. Coloca-se a arruela pré-comprimida entre a cabeça do

parafuso e o flange e ao ser aquecido, expande-se. Com isso, o parafuso será tensionado sem ser submetido as tensões de cisalhamento presentes no método original que envolve o aperto promovido por um torque [24].

### 3.2.2. Atuadores tipo mola

Diferentes tipos de atuadores vêm sendo desenvolvidos, aproveitando as características especiais das SMAs. Um dos elementos mais comuns, dentre os estudados e projetados, são os do tipo mola.

Pode-se observar que o atuador ilustrado na figura 17, que possui uma mola de SMA, que irá se contrair quando ativada termicamente, e forçará o retorno do pistão à sua posição inicial, fazendo com que o mesmo volte a se deslocar por dentro do cilindro, sempre que acionado.



Figura17: Atuador tipo pistão de SMA [13]

Outros modelos veem sendo projetados, com o intuito de desenvolver um protótipo de maior eficiência ou apenas voltado para um fim em particular.

Um exemplo é o modelo desenvolvido por Grant e Hayward, que se baseia em discos posicionados paralelamente, de forma a poderem ficar empilhados, com uma mola passando pelos seus centros. A força gerada pela mola, é capaz de causar a

transformação martensítica. Os fios de liga com memória de forma, são fixados aos discos em ângulos, com o intuito de que a deformação gerada possa ser maior.

O resultado foi um atuador compacto de 17 mm de diâmetro e 30 mm e pesando apenas 6 gramas de comprimento, capaz de gerar 4 N de força, e uma deformação máxima de 2,5 mm.

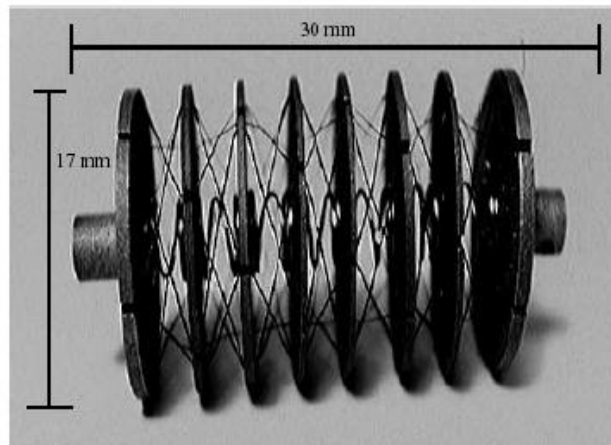


Figura 18: Atuador de SMA de Grant e Hayward[14]

### 3.2.3. Aeroespacial

Primeira aplicação de larga escala na indústria aeroespacial, foi a luva para conexão de micro tubos de alta pressão, utilizados em caças da marinha dos Estados Unidos, como ilustrado na Figura 19.

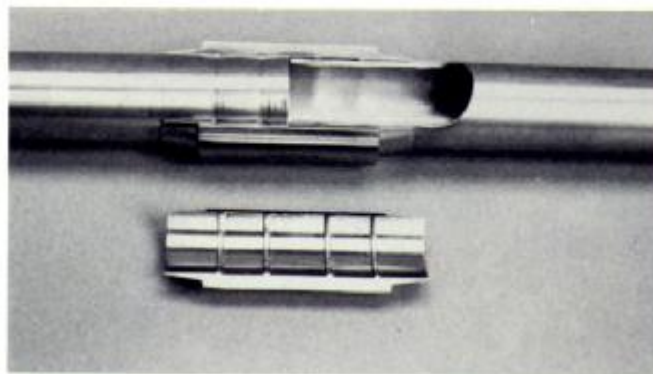


Figura 19: Elemento de fixação de micro tubos [7]



O controle de flaps através de atuadores baseados em fios de memória de forma, como mostrado na Figura 20 já é uma possibilidade real de aplicação devido à redução de peso que pode trazer principalmente para aeronaves não tripuladas. Outra possibilidade é a utilização de flaps parcialmente feitos por ligas SMA, onde a própria estrutura seria responsável pelo seu movimento, dependendo apenas da passagem de corrente elétrica, como mostrado na Figura 21.

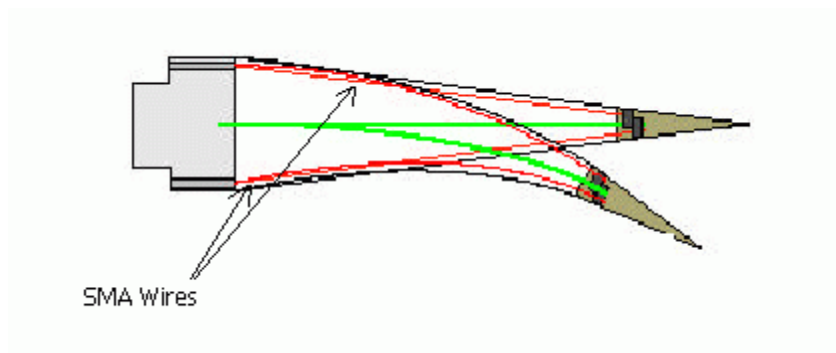


Figura 20: Funcionamento de flap com SMA [15]



Figura21: Atuadores compactos de liga de memória de forma para flaps [16]

### 3.2.4. Construções civis

Os materiais pseudoelásticos vêm sendo testados em modelos de pontes e outras estruturas onde são submetidos a uma série de terremotos biaxiais e os resultados tem mostrado que além de serem realmente efetivos na redução de deslocamentos permanentes, tais materiais têm reduzido consideravelmente o dano a regiões



plastificadas e melhoraram consideravelmente os resultados em relação a construções convencionais. [16]

Atualmente, diversos estudos vêm surgindo a visando modelar ligas de memória de forma para compor o concreto armado, melhorando assim a desempenho da estrutura quando submetida a impactos em série ou tremores do solo.

Estudos mostram que as estruturas tradicionais de concreto, sofrem uma grande fragilização com o primeiro impacto. Então, com a chegada de impactos menores posteriores, a estrutura que já está previamente comprometida, não suporta o acúmulo de dano. Então, neste mesmo estudo, foi apresentado um novo tipo de dispositivo de SMA, com a habilidade de reagir melhor ao impacto principal, devido às propriedades pseudoelásticas. Resultados numéricos também indicam que as estruturas com ligas SMA tem vantagem na dissipação de energia e no acúmulo de pequenos danos residuais [20].

### **3.2.5. Geologia**

A geologia aproveita a força gerada na transformação de fase das ligas de memória de forma para separar e abrir fendas em rochas de formas controladas.

O método ilustrado na Figura 22 mostra a portabilidade e simplicidade do processo, além de garantir também, um bom alcance para pequenas frestas.

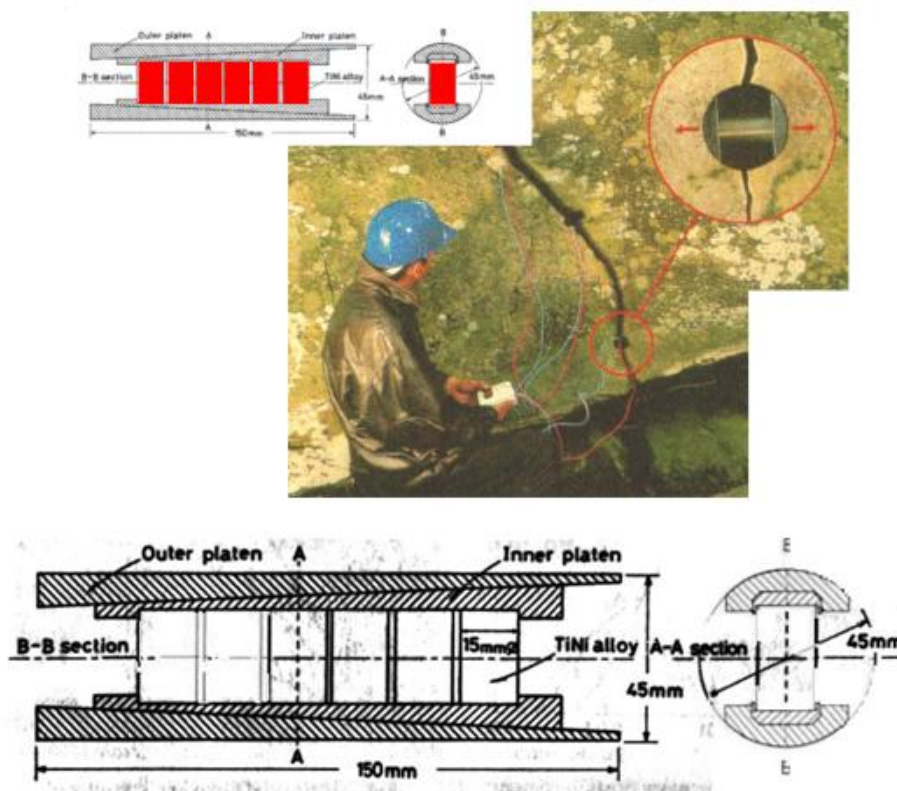


Figura 22 – Método de fissuração de rocha por ligas SMA [22]

### 3.2.6. Robótica

Atuadores a partir de fios de SMA vêm sendo amplamente estudados para a utilização na robótica. Sua principal vantagem é reduzir o peso e aumentar a mobilidade no sistema.

Alguns atuadores utilizam como indutor de mudança de fase do material a variação de temperatura promovida por uma placa com efeito Peltier. Efeito este, que gera um gradiente de temperatura em duas junções de dois materiais condutores diferentes quando submetidos a uma corrente elétrica [23].

Diversos tipos de protótipos já foram projetados, como mostrado na Figura 23, inclusive popularizando os fios de memória de forma como *WireMuscles*.

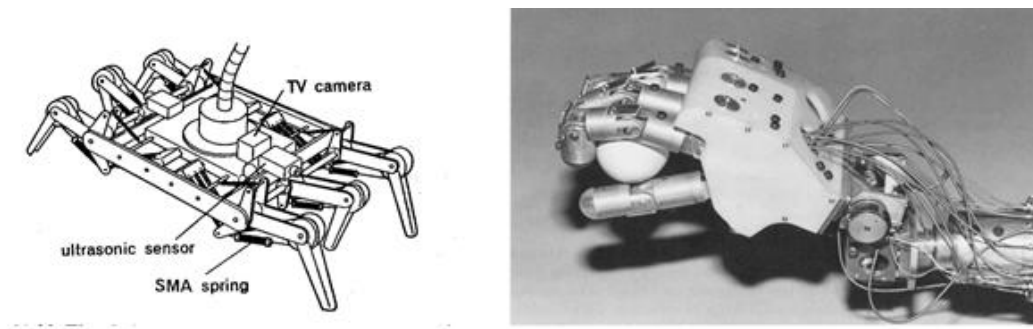


Figura 23 – Aplicações das SMA na robótica [22]

### 3.2.7. Outras aplicações

Alguns itens de uso comum, como os óculos mostrados na Figura 24, vêm sendo fabricados com ligas de memória de forma com o intuito de ganhar mercado devido às propriedades especiais da liga como o efeito de pseudoelasticidade.

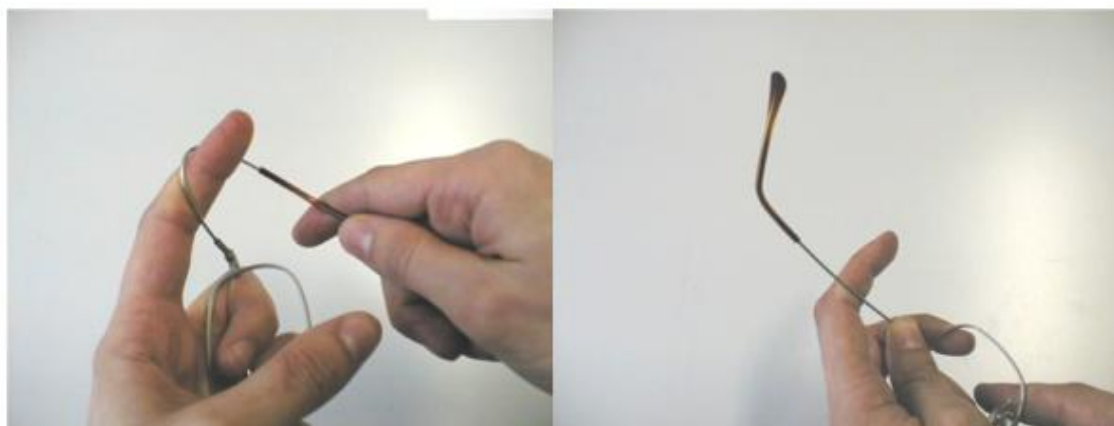


Figura 24: Armação de óculos em SMA [7]

Diversos estudos sobre ligas de memória de forma para a indústria envolvem principalmente elementos utilizados em válvulas e atuadores. Oferecendo as vantagens de sensibilidade à temperatura, boa resistência a corrosão e eliminando a obrigatoriedade do uso de motores e atuadores mais complexos e pesados.

## **CAPÍTULO 4 – Procedimento experimental**

O procedimento experimental a ser desenvolvido será baseado em um dispositivo desenvolvido pelo grupo do Prof. Dimitri C. Lagoudas na Texas A&M University [11], mostrado na Figura 25. A proposta é modificar uma estrutura previamente existente no CEFET/RJ e então realizar uma série de ensaios onde um fio martensítico de liga de memória de forma estará submetido a carregamentos termomecânicos. Tais carregamentos consistem em um “peso morto”, que irá manter uma tensão mecânica constante no fio, e uma variação cíclica de corrente, que por efeito joule irá aquecer o fio.

Inicialmente o fio encontra-se num estado onde apresenta 100% de Martensita maclada. Com a aplicação do carregamento mecânico de “peso morto” se deforma, passando por uma transformação total ou parcial para Martensita não-maclada tratada. Ao ser aquecido, o fio contrai devido à sua transformação para Austenita. Com o resfriamento, ocorre nova transformação de fase da Austenita para Martensita não-maclada tratada.

O experimento visa garantir e detalhar os tempos de aquecimento, atrelados a níveis de corrente e tempo de aplicação, bem como o tempo de resfriamento atrelado ao meio em que o fio está submetido.

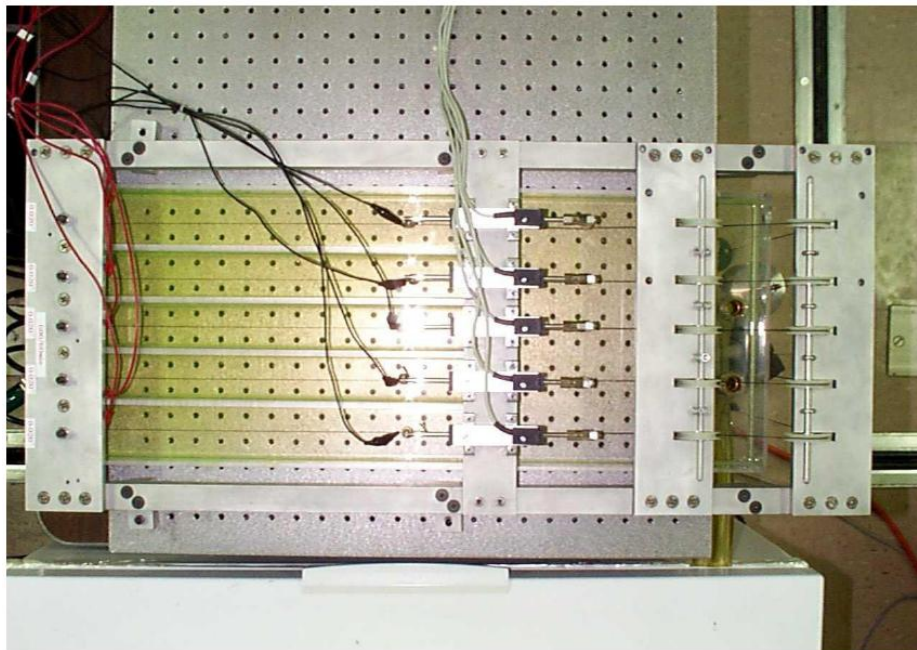


Figura 25: Dispositivo para análise de fadiga desenvolvido na Texas A&M [3]

#### 4.1. Descrição

O dispositivo experimental induz fadiga nos fios de SMA submetendo-os a ciclos termomecânicos, podendo gerar uma transformação da estrutura cristalina total ou parcial, como mostrado na Figura 4.

Com a passagem de corrente elétrica, aplicada através de ciclos do tipo *on-off*, controlada pela fonte programável (ICEL PS-7000), induz-se a elevação da temperatura do fio por efeito Joule. As etapas de aquecimento e resfriamento são acompanhadas através do deslocamento do fio medido por um transdutor de deslocamento potenciométrico da GEFTRAN (Modelo PY-1-25) 150 mm de curso máximo acoplado a um sistema de aquisição de dados SPIDER 8 600Hz da HBM com o auxílio do programa Catman da HBM de coleta de dados. O mesmo sistema é utilizado para obter os dados de variação de corrente ao longo do tempo. Com isso, poderão ser gerados gráficos da evolução no tempo do deslocamento, e da corrente elétrica.

Assim, induz-se a transformação cristalina da estrutura através da aplicação de um carregamento termomecânico composto pela aplicação de corrente elétrica controlada por uma fonte de corrente programável (efeito Joule) e pelo uso do peso morto, de modo a obterem-se as transformações ilustradas na Figura 4

Levando-se em conta o tamanho original do fio, temos que o aumento da temperatura gera um deslocamento (diminuição no tamanho do fio) no transdutor menor ou igual ao que foi gerado pelo carregamento mecânico. Ou seja, quando o peso morto gerar uma deformação de por exemplo 1%, este será o valor máximo que também poderá ser recuperado. Com os dados de deslocamento e corrente, pode-se monitorar o intervalo de tempo necessário para que haja a transformação máxima dentro de cada ciclo. É importante frisar, que a transformação máxima do ciclo, não é obrigatoriamente a transformação máxima da liga que é de aproximadamente 6% em relação à deformação, pois depende do valor da carga de peso morto aplicada.

#### 4.1.1. Concepção e modificação da estrutura para análise de fadiga

Foi utilizada fixação dos fios de memória de forma a estrutura metálica desenvolvida inicialmente para o projeto final de graduação em engenharia mecânica da aluna Fernanda de Souza Royse em 2007, no CEFET/RJ [8].

O dispositivo mostrado na Figura 26, com dimensões de 700 mm de comprimento, 102 mm de altura e 500 mm de largura, tem como objetivo servir de suporte para os conjuntos formados por: Fio de memória de forma, peso morto, transdutor, roldanas e linha de multifilamento.

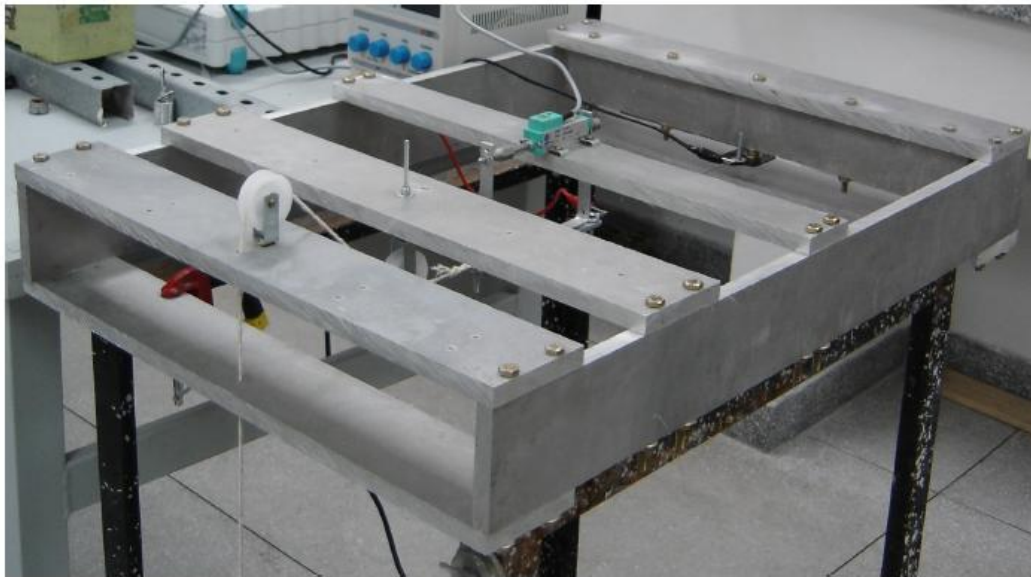


Figura 26 (a) : Dispositivo original para análise de fadiga [8]





Figura 26 (b) : Dispositivo para análise de fadiga após modificações

Tomando como base o dispositivo original, foram feitas modificações no intuito de possibilitar a imersão do fio em fluido refrigerante, similar ao realizado no trabalho do grupo do professor Dimitri C. Lagoudas, [16], ilustrado na Figura 24.



#### 4.1.2. Modificação da estrutura

Tendo em vista que a estrutura original é totalmente vazada, foi proposta uma modificação que consiste em fechar as laterais e o fundo da estrutura com placas de policarbonato e silicone para que então pudesse ser preenchido totalmente com fluido refrigerante não condutor. A opção de fluido adotada foi a água deionizada devido ao baixo custo e facilidade de aquisição. Esta é a água bidestilada submetida ao processo de osmose reversa e troca iônica, para remoção de íons. Portanto, a água deionizada é a água numa das formas mais puras, portanto, não condutora. Muito utilizada para uso automotivo, em radiadores e baterias. E assim, podendo-se mergulhar o fio de SMA possibilitando o resfriamento proposto. Diante da falta do fluido mencionado, pode-se usar água destilada, desde que se garanta a não condutibilidade do fluido.

Com o intuito de reduzir perdas no sistema por vibrações, atrito e folgas, as roldanas originais foram substituídas por roldanas melhores e mais resistentes.

Originalmente, um barbante foi utilizado para conectar o transdutor até a fixação no peso morto. Este foi substituído por um fio de multifilamentos sintéticos, também com o objetivo de melhorar a precisão do sistema conforme mostrado esquematicamente através da Figura 27.

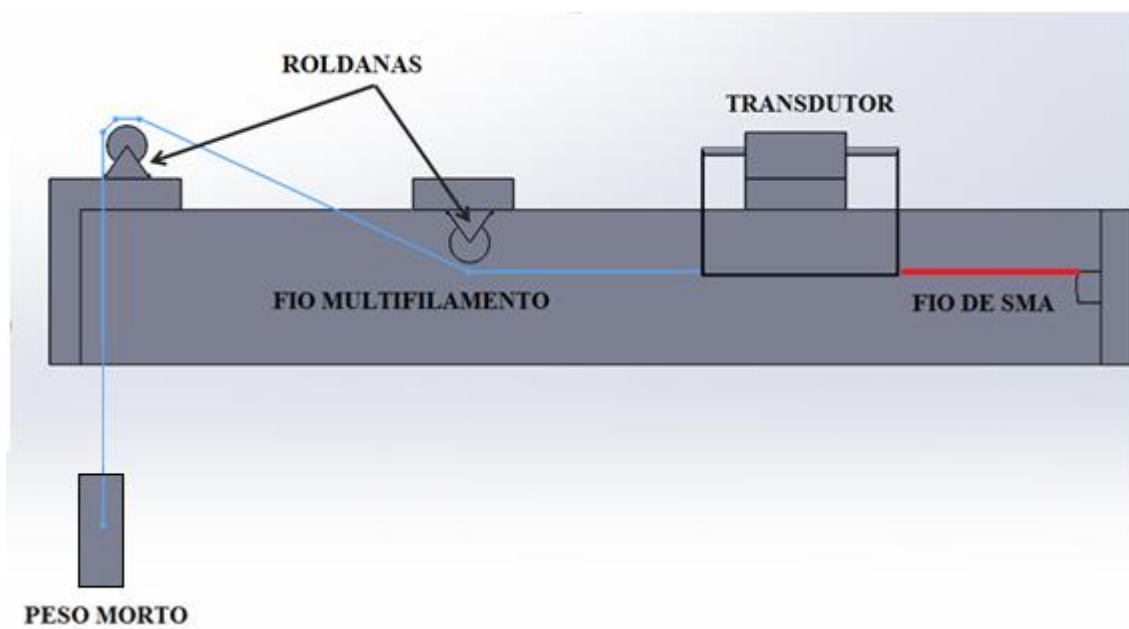


Figura 27 – Desenho esquemático do funcionamento do sistema.

### 4.1.3 Adaptações no suporte do fio

Visando facilitar o monitoramento e a precisão do experimento, foram feitas adaptações no fio. Foram utilizados terminais pré-soldados, ou “olhal com prensa cabo”, para que o fio pudesse então ser fixado com mais facilidade à estrutura.

### 4.1.4 Instrumentação

Para que se possa obter e sobrepor os dados oriundos da fonte e do transdutor, é preciso que seja medida a queda de tensão entre as extremidades do fio de maneira sincronizada com a medição dos deslocamentos feitos pelo transdutor.

Para que as entradas do sistema SPIDER não sejam queimadas, a corrente aferida deve ser de baixa intensidade, portanto, os fios de SMA devem ser ligados em paralelo a um resistor, diminuindo a corrente que passa por este, e medindo-se queda de potencial resultante. A seguir mostra-se os cálculos usados para fazer a medição indireta da corrente que passa pelo fio de SMA:

$$\frac{1}{Req} = \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} \quad (\text{Eq. 1})$$

onde  $R = 22 \Omega$

$$Req = 5,5 \Omega$$

A figura 28 mostra um circuito divisor de corrente, cujo os cálculos são mostrados a seguir:

$$V = R1 \cdot I1 \quad , \quad V = R2 \cdot I2 \quad , \quad I = I1 + I2$$

$$V = \frac{V}{R1} + \frac{V}{R2}$$

$$V = \frac{R1 \cdot R2}{R1 + R2} I \quad (\text{Eq. 2})$$

$$I1 = \frac{R1}{R1 + R2} I \quad (\text{Eq. 3})$$

$$I2 = \frac{R2}{R1 + R2} I \quad (\text{Eq. 4})$$

$$R2 = (5,5 + 0,8)\Omega = 6,3\Omega \quad (\text{Eq. 5})$$

$$R1 = 100K\Omega$$

$$I1 = 6,2996 \cdot 10^{-5} \cdot I \quad (\text{Eq. 6})$$

$$I2 = 0,999937 \cdot I$$

O sistema é ilustrado Figura 28(a) e (b)

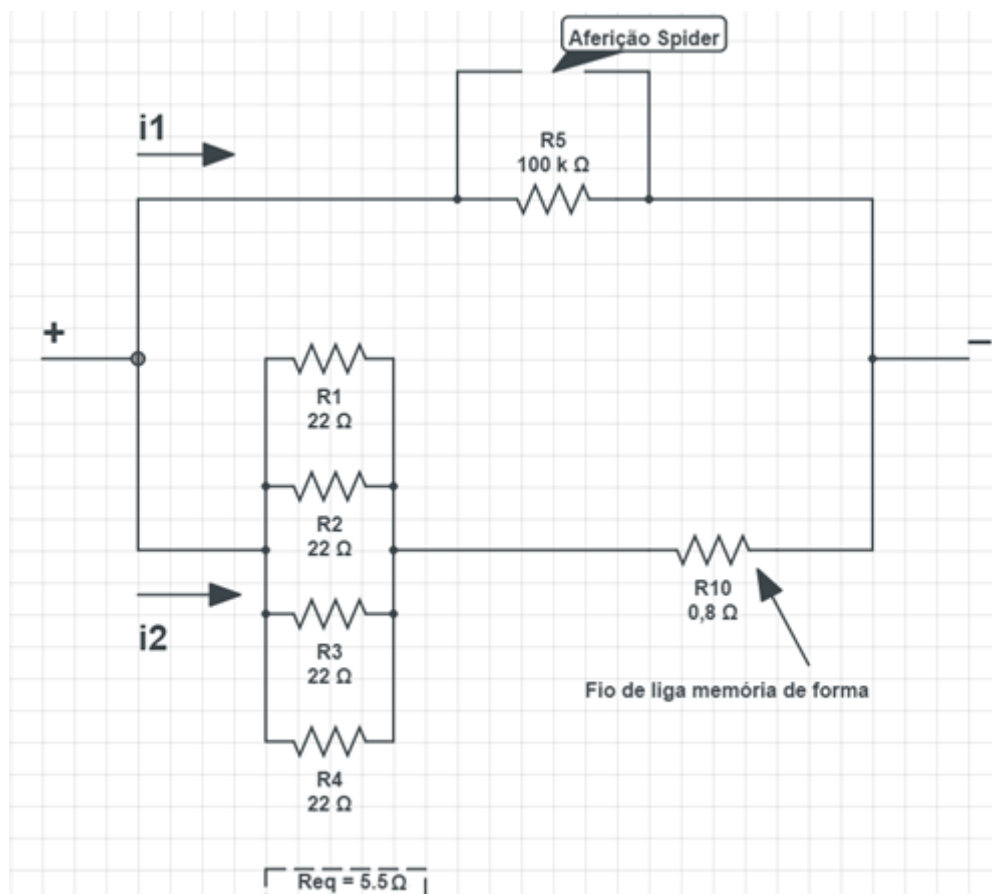


Figura 28 (a) – Esquema do circuito elétrico.

Note que foi usado um  $R_{eq}$  em série com o fio SMA, neste caso de  $5,5 \Omega$ , com o objetivo de aumentar a resistência que a fonte de tensão percebe, para que seu desempenho não fique prejudicado pela pequena resistência do fio de SMA.

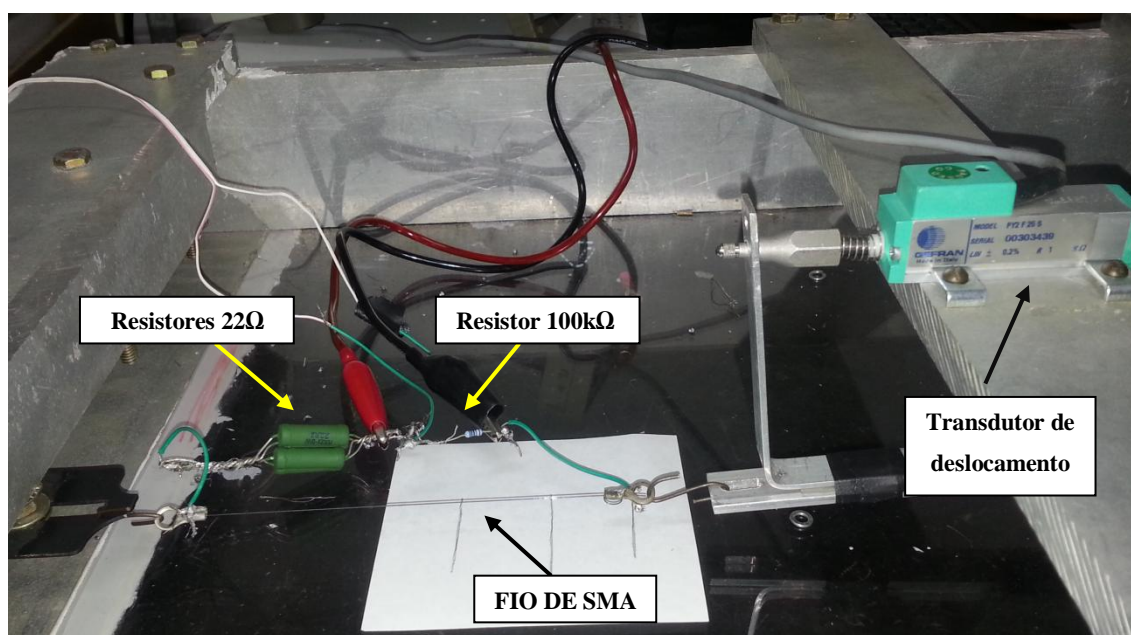


Figura 28(b) – Circuito elétrico utilizado

#### 4.1.5. Utilização de fonte de energia programável

O aquecimento dos fios de memória de forma se dá pelo efeito joule, que ocorre quando um condutor é aquecido ao ser submetido uma corrente elétrica, há a transformação de energia elétrica em energia térmica.

Para que haja a variação do aquecimento do fio, foi utilizada uma fonte programável ICEL PS-7000, mostrada na Figura 29, que possibilita que a aplicação da corrente elétrica possa ser controlada através de ciclos especificados. Com isso, pode-se induzir as transformações cíclicas na estrutura cristalina do fio de SMA por variação de temperatura.

Originalmente, a fonte foi projetada para portas RS-232 em PCs. A utilização no presente trabalho se deu a partir de uma conversão para entradas USB onde foi preciso a utilização do software gratuito *PL2303\_Prolific* para reconhecimento de tal conversão. O software da empresa *Serialio* está disponível em <http://www.tri-plc.com/USB-RS232/drivers.htm>

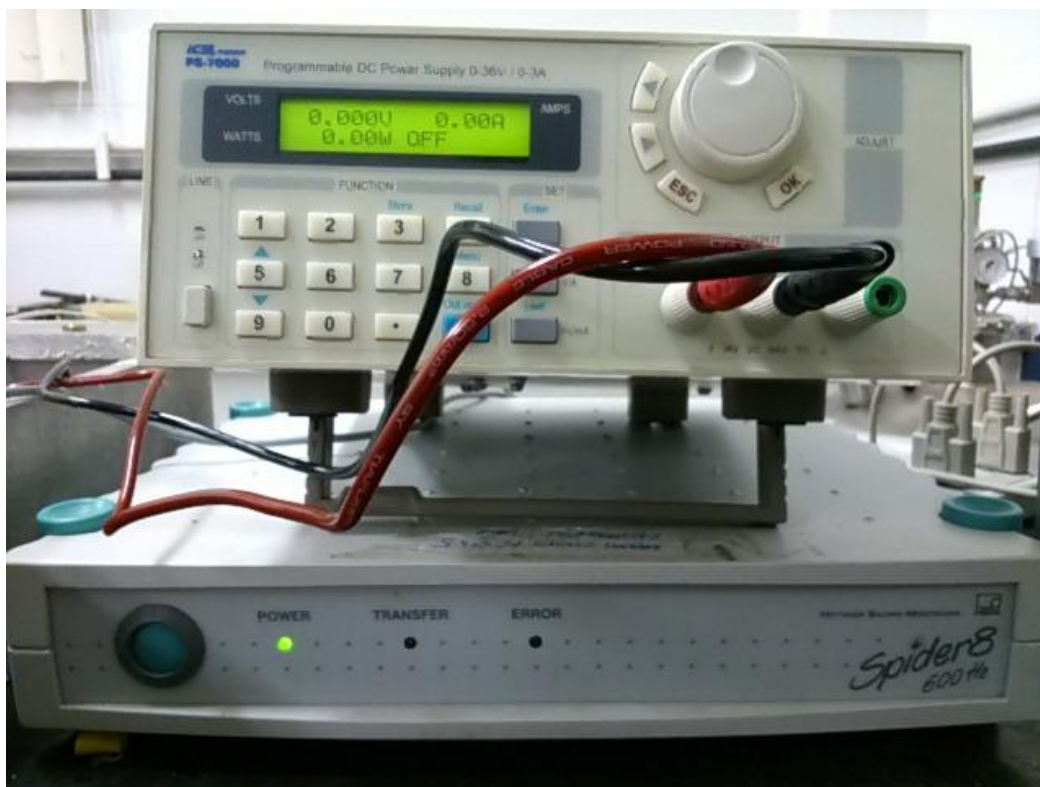


Figura 29: Fonte programável (ICEL PS-7000)[11] e Spider8

O software utilizado para a aplicação de corrente elétrica na forma de ciclos é o Power StepsControl 3.0, próprio da fonte. O software em questão, não permite que seja definida uma corrente para aplicação direta no modo de ciclos, apenas de tensão elétrica que conseqüentemente terá uma corrente associada. Portanto, sabendo a resistência equivalente do fio e o conjunto de resistências, é possível determinar o valor da corrente já que a tensão  $U$  é igual ao produto da resistência  $R$  pelo valor da corrente. Logo:

(Eq. 7)

$$U = RI$$

$$I = \frac{U}{R}$$

Pode-se também verificar a coerência do resultado de acordo com o visor da fonte, como ilustrado na Figura 29.

## 4.2.Ciclos

A contração do fio se dá devido ao aquecimento e a extensão devido ao resfriamento juntamente com o carregamento mecânico constante. Dessa forma, a velocidade do ciclo mecânico está diretamente relacionada com variação da temperatura, como mostrado na Tabela 1. A velocidade de aquecimento do fio deve ser devidamente controlada, pois quando submetido a variações bruscas de corrente, o fio pode aquecer muito rapidamente, gerando uma taxa de contração do fio muito elevada em um intervalo de tempo muito pequeno. Com isso, pode-se danificar o fio de forma permanente devido a inércia do material que será deslocado pelo fio. Desta forma, deve-se garantir o aumento gradual da corrente de acordo com taxas aceitáveis.

Para o estudo de fadiga, onde foram realizados uma grande quantidade de ciclos, é fundamental que a duração de cada ciclo não seja grande. Cada ciclo envolve uma etapa de aquecimento, promovida por efeito Joule, e uma etapa de resfriamento promovida pela troca de calor por convecção com o meio de contato do fio.

A etapa de aquecimento é normalmente rápida, pois está associada ao aquecimento promovido pela passagem de corrente elétrica. Já a etapa de resfriamento é a mais crítica em relação ao tempo do ensaio de fadiga. Uma maneira simples de reduzir o tempo de resfriamento, é reduzir o diâmetro do fio. Outra maneira de reduzir a duração do ciclo, é a imersão em um fluido não condutor, o que garante uma velocidade de resfriamento em relação ao ar de uma sala fechada, conforme mostrado na

<b>Convecção natural ou livre</b>	<b>W/m<sup>2</sup> C</b>
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
<b>Convecção forçada</b>	
Gases	25-250
Líquidos	50-20000

**Tabela 2: Relação de resfriamento [31]**

Em relação ao carregamento mecânico, é importante atentar que para que a tensão mecânica aplicada seja suficiente para gerar a transformação de fase desejada no fio de SMA. Se a tensão aplicada não for suficiente para promover transformação de fase total que gere um estado de 100% de Martensita não-maclada tratativa não será possível ciclar o fio na sua amplitude máxima. Para uma tensão que gere uma transformação parcial de fase, o aquecimento no fio irá gerar no máximo uma deformação axial igual em módulo à variação gerada pelo carregamento, descontando a deformação elástica. Da mesma forma, se o carregamento mecânico ultrapassar certos limites de tensão, os quais também serão verificados neste trabalho, o fio poderá sofrer danos que irão prejudicar suas propriedades de forma irreversível.

### 4.3. Fio utilizado

Os fios utilizados são de uma liga de Níquel – Titânio, com diâmetros variando de 0,2 mm a 0,6 mm pela empresa Flexinol® [2]. Segundo o fabricante, a utilização segura para os fios como atuadores é garantida até uma tensão de 172 MPa. Porém também informa que pode-se utilizar uma tensão superior, estando-se ciente de que problemas podem vir a ocorrer.

Nos experimentos desenvolvidos utilizaram-se fios com 0,375 mm de diâmetro. Para um fio de 0,375mm de diâmetro, obtém-se:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$172 \text{ MPa} = \frac{F}{\pi D^2 / 4}$$

$$F = 18,9 \text{ N}$$

Logo, a massa  $m$  do “peso morto” ligada no fio nesse caso, será:

$$m = \frac{18,9 \text{ N}}{9,8 \text{ m/s}^2}$$

$$m = 1,9 \text{ kg}$$



O fornecedor descreve o comportamento de duas composições diferentes da liga. Uma onde a fase austenítica se inicia a 70°C e a outra sob 90°C, ambas sob 172 MPa de tensão como mostra a

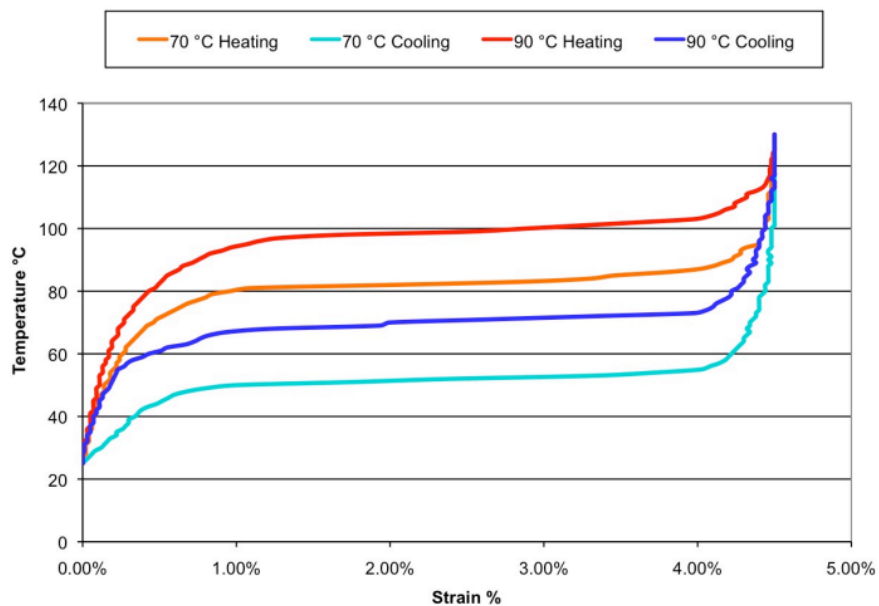


Figura 30: Temperatura x Deformação [2]

A Tabela 3 apresenta características dos fios utilizados no experimento desenvolvido, propriedades termomecânicas e elétricas, além de faixas de operação recomendadas.

Propriedades		Flexinol Name										
		025	037	050	075	100	125	150	200	250	300	375
<b>Físicas</b>	Diâmetro do fio ( $\mu\text{m}$ )	25	37	50	75	100	125	150	200	250	300	375
	Raio mínimo de curvatura (mm)	1.3	1.85	2.5	3.75	5.0	6.25	7.5	10.0	12.50	15.0	18.75
	Área da secção transversal ( $\mu\text{m}^2$ )	490	1,075	1,960	4,420	7,850	12,270	17,700	31,420	49,100	70,700	110,450
<b>Elétricas</b>	Resistência linear ( $\Omega/\text{m}$ )	1,770	860	510	200	150	70	50	31	20	13	8
	Corrente recomendada (mA)	20	30	50	100	180	250	400	610	1,000	1,750	2,750
	Potência recomendada (W/m)	0.71	0.78	1.28	2.0	4.86	4.4	8.00	12.0	20.0	39.8	60.5
<b>De força*</b>	Peso max. @ 600 MPa (g)	29	65	117	250	469	736	1,056	1,860	2,933	4,240	6,630
	Peso recomendado @ 190 MPa (g)	7	20	35	80	150	230	330	590	930	1,250	2,000
	Peso para def. recomendada @ 35 MPa (g)	2	4	8	815	28	43	62	110	172	245	393
<b>Térmicas</b>	Temp. de início da ativação ( $^{\circ}\text{C}$ )	<i>LT Alloy</i>		<i>HT Alloy</i>								
	Temp. final da ativação ( $^{\circ}\text{C}$ )	68		88								
	Temp. de início do relaxamento ( $^{\circ}\text{C}$ )	78		98								
	Temp. final do relaxamento ( $^{\circ}\text{C}$ )	52		72								
	Temp. de recozimento ( $^{\circ}\text{C}$ )	42		62								
	Temp. de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	300		300								
	Temp. de fusão ( $^{\circ}\text{C}$ )	1,300		1,300								
	Calor específico (cal/g $^{\circ}\text{C}$ )	0.077		0.077								
	Capacidade térmica (Joule/g $^{\circ}\text{C}$ )	0.32		0.32								
Calor latente (Joule/g)	24.2		24.2									
<b>Material</b>	Densidade (g/cc)	6.45										
	Força máxima de recuperação (MPa)	600 (~43 ton / in <sup>2</sup> )										
	Força de deformação recomendada (MPa)	35 (~2.5 ton / in <sup>2</sup> )										
	Tensão de ruptura (MPa)	1,000 (~71 ton / in <sup>2</sup> )										
	Coefficiente de Poisson	0.33										
	Saída de trabalho (Joule/g)	1										
	Eficiência de conversão de energia (%)	5										
	Taxa máxima de deformação (%)	8										
Taxa recomendada de deformação (%)	3-5											
<b>Entre Fases</b>	Fase	<i>Martensite</i>					<i>Austenite</i>					
	Resistencia ( $\mu\Omega\text{cm}$ )	76					82					
	Modulo de Young (GPa)	28					75					
	Sucetibilidade magnética ( $\mu\text{emu/g}$ )	2.5					3.8					
	Condutividade térmica (W/cm $^{\circ}\text{C}$ )	0.08					0.18					

Tabela 3: Tabela do fornecedor modificada - Características da liga [2]

A deformação do fio máxima sem que haja dano na característica do efeito de memória de forma, se dá em cerca de 8%. Segundo o fabricante, em 34,5 MPa, tem-se uma deformação de 3%, para 69 MPa tem-se 4% e para 103 MPa obtêm-se aproximadamente 5% de deformação.

## CAPITULO 5 – DADOS EXPERIMENTAIS

### 5.1. Avaliação de características e repetibilidade do sistema

Inicialmente, para verificações relativas ao funcionamento do equipamento e repetibilidade do sistema durante os ciclos realizados em um fio com 100 mm de comprimento útil, foram impostas condições abaixo dos limites estipulados pelo fabricante e calculadas no capítulo 4.

Para esta etapa inicial, o fio foi submetido a uma carga de 9,8 N que resulta numa tensão igual a 88,7 MPa. O carregamento de corrente elétrica foi aplicado utilizando as seguintes condições: 6 V e 0,84 A aplicados num ciclo *on-off* (onda quadrada) envolvendo uma etapa de 25 s com a fonte ligada e uma etapa de 70 s com a fonte desligada.

Por ser um tipo de ensaio longo, é importante que mesmo que se pare o ensaio para continuar em outro momento, a leitura dos dados deve ser similar. Portanto, para avaliar esta influência, o ensaio foi repetido dois dias após o primeiro, como mostram as Figuras 31, 32 e 33.

Nos gráficos, a linha vermelha representa a variação de corrente, que mostra os momentos em que a fonte encontra-se ligada e desligada. A curva em preto, representa a deformação do fio em relação ao tempo.

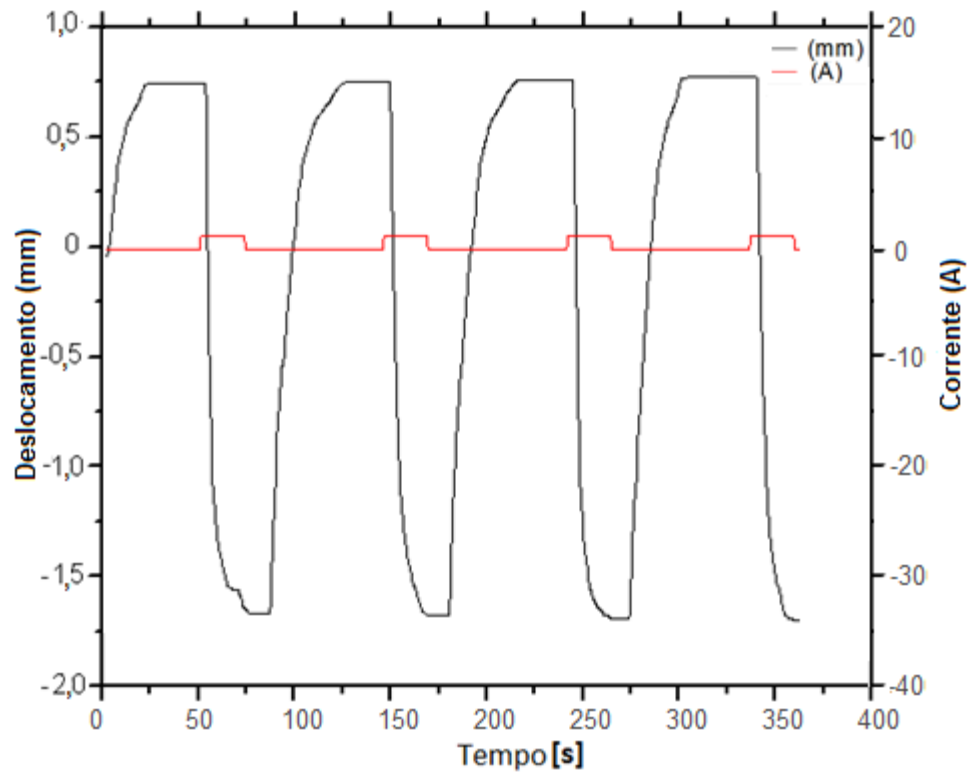


Figura 31 – ENSAIO 1 (1500s)- Condições 9,8 N; 6V; 0,84A; 25s (on); 70s (off)

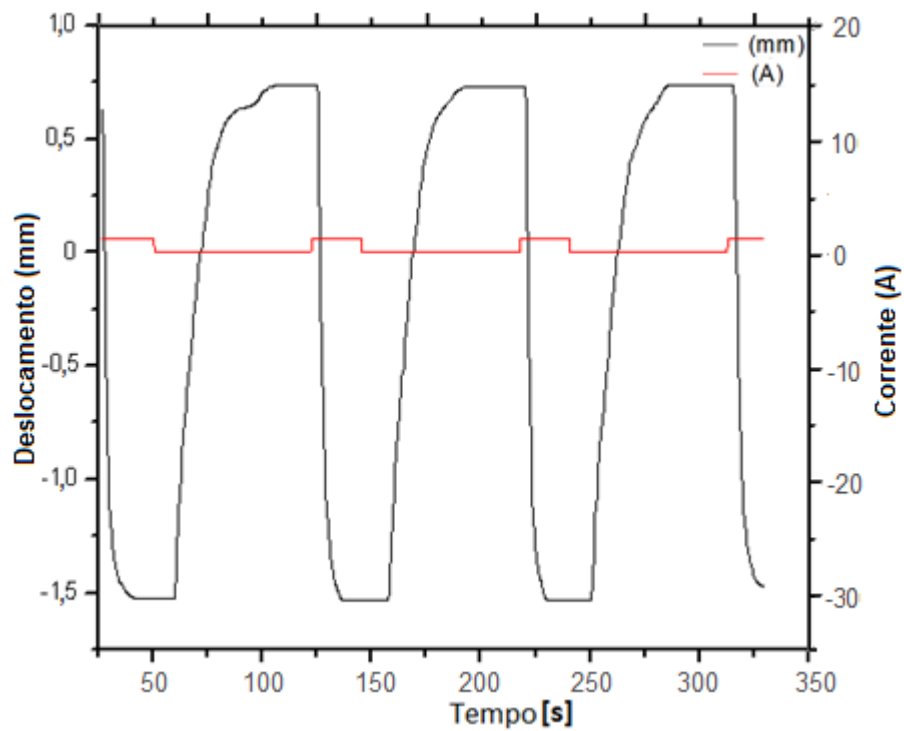


Figura 32 – ENSAIO 1 (1200s)- Condições 9,8 N; 6V; 0,84A; 25s (on); 70s (off)

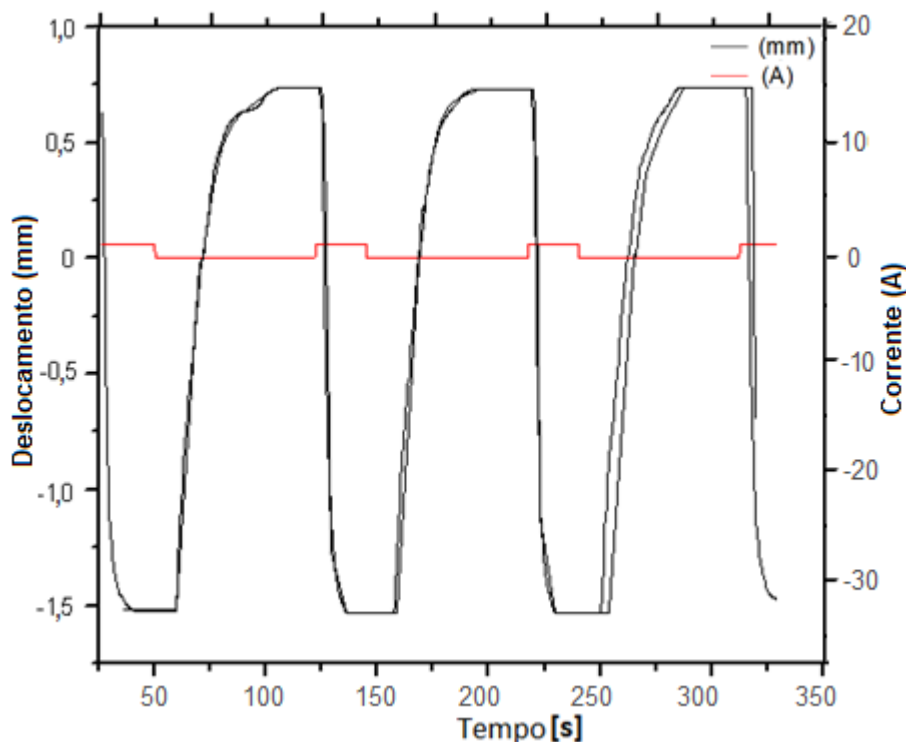


Figura 33 – Comparativo do ENSAIO 1

Os resultados obtidos permitem identificar as seguintes características:

- Inicialmente o fio é alongado, e fica com parte de sua estrutura cristalina na forma martensítica não maclada tratativa, devido ao carregamento mecânico de 9,8 N, 51,8% inferior ao carregamento limite sugerido pelo fornecedor.
- Quando ocorre o aquecimento do fio o efeito joule promove a contração, atingindo seu estado inicial, antes da deformação mecânica (descontada a deformação elástica).
- O tempo de aquecimento e resfriamento é bastante elevado, pois se observa que a curva de deformação se mantém estável por muito tempo tanto em suas cristas (resfriamento) quanto em seus vales (aquecimento)
- Considerando que os fornecedores da liga garantem uma deformação “recuperável” de 7%, pode-se afirmar que o carregamento mecânico é bem inferior ao máximo possível, pois a deformação de 2 mm corresponde a apenas 28,5% dos 7 mm possíveis.

- Preservando-se as condições do equipamento, o ensaio se manteve estável, mesmo com uma longa interrupção.

## 5.2 Verificação da mudança de propriedades elétricas do fio

Em seguida, o carregamento foi elevado para 15,7 N (16,9% - 142 MPa) de modo que pudesse ser verificado o comportamento do fio com a presença de um maior percentual de martensita não-maclada (oriunda do carregamento mecânico) e conseqüentemente uma maior deformação.

Como descrito no item 4.3, esta situação se aproxima bastante da tensão mecânica máxima indicada pelo fornecedor. Portanto, trata-se de uma situação crítica.

De maneira similar ao método utilizado nos ensaios com menor carregamento, inicialmente foram estabelecidos tempos de aquecimentos e resfriamento bem longos, de modo que pudessem ser diminuídos e ajustados de forma que o ciclo pudesse ser otimizado posteriormente.

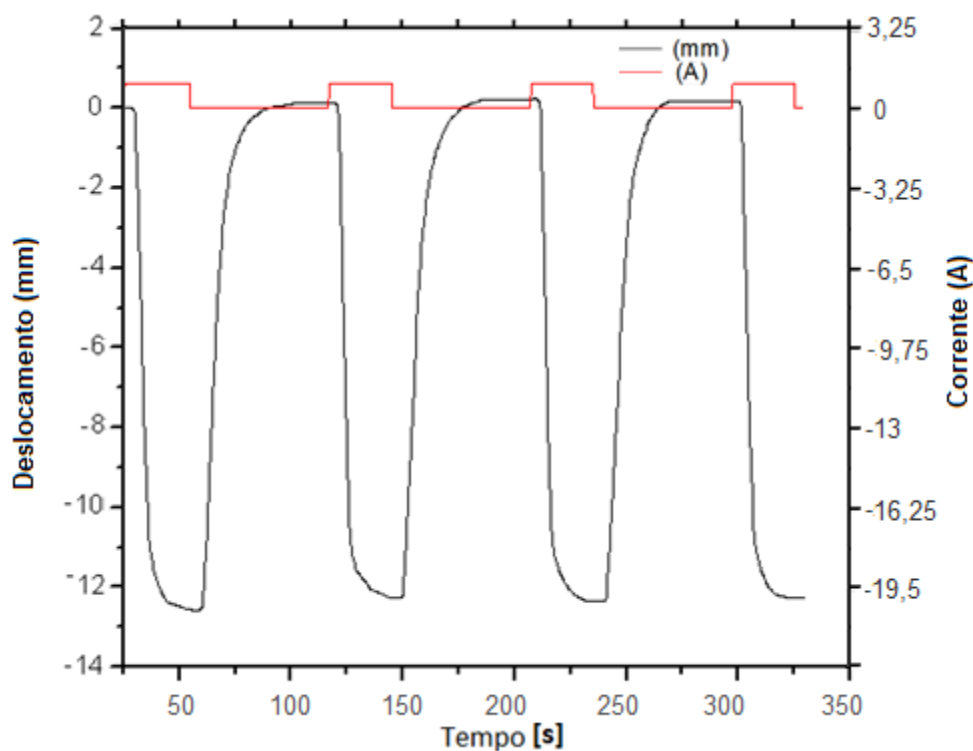


Figura 34 – ENSAIO 2 - Condições 15,7 N; 6 V; 0,81 A; 30s (on); 60s (off)

Os resultados obtidos permitem identificar as seguintes características:

- Houve uma deformação inicial que superou em cerca de 10 mm a obtida no carregamento anterior.
- A deformação do fio superou o valor máximo de 7% que o fornecedor recomenda, mas mesmo assim, teve a total recuperação, sem prejuízos para o fio a curto prazo.
- Percebe-se que os tempos de resfriamento e aquecimento, estão além do suficiente para permitir as as completas transformações de fase.
- Houve uma queda de corrente em relação ao carregamento anterior.

A variação de corrente se deu, como esperado, devido à variação de resistência elétrica do fio. O maior valor de transformação de fase presente promoveu uma elevação na resistência elétrica do fio, resultando em uma diminuição da corrente, como mostra a Figura 35. Devido ao comprimento da amostra, tal variação de corrente não se mostra significativa em relação ao aquecimento da liga. No entanto, é representativa para auxiliar na verificação da precisão do sistema utilizado, de acordo com o proposto no capítulo 2, pois se mostrou compatível com os estudos do instituto de física da Unievrside de Milão [28]

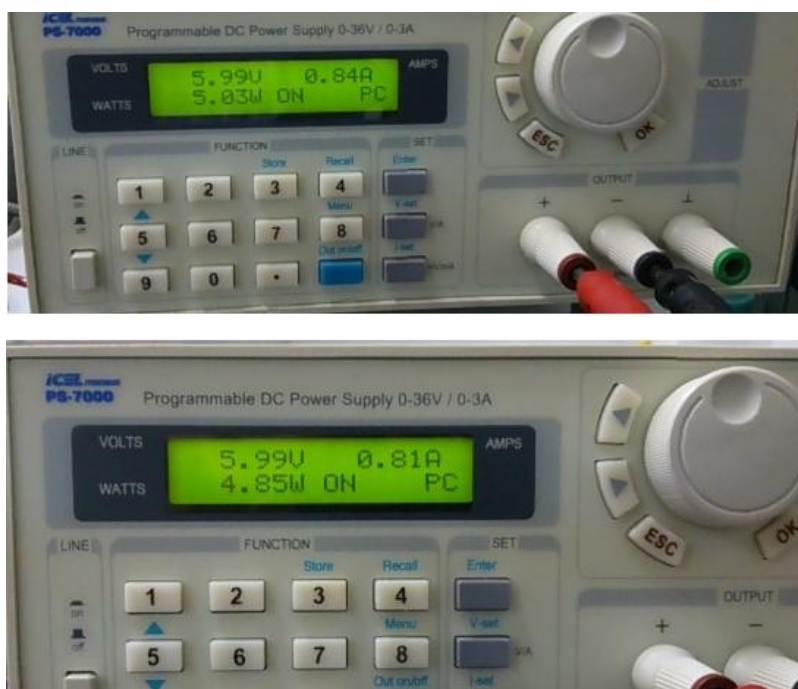


Figura 35 – Indicação de variação de corrente devido a mudança de fase da liga

### 5.3 Preparação do ciclo de fadiga

Inicialmente foram preparados corpos de prova de 100mm e então de maneira empírica, foram sendo testados diferentes tempos para o ciclo com intuito de selecionar a melhor relação de tempo onde houvesse a total transformação de fase da liga.

Partiu-se de tempos elevados de resfriamento e aquecimento, afim de garantir a total transformação da liga. Então, foi-se diminuindo gradativamente de 10 segundos a cada nova tentativa até se alcançar o ciclo ideal.

Conforme apontado no capítulo 4, o fio foi tracionado próximo ao limite estabelecido pelo fabricante, afim de reduzir o número de ciclos necessários para que se possa observar mudanças no fio e conseqüentemente, o tempo de ensaio. Desta forma, encontrou-se que o ciclo ideal para os corpos de prova e carregamento mecânico em questão apresentam os seguinte parâmetros:

Tensão elétrica – 10 V (gerando corrente de 1,52 A a 1,56 A)

Tal tensão foi escolhida por se tratar de uma faixa onde a fonte utilizada está em condições de trabalhar sem sobrecarga e ao mesmo tempo gerar uma corrente suficiente para aquecer o fio.

- Tempo de aquecimento – 5 s

De acordo com os dados obtidos mostrados nas Figuras 36-42, pode-se observar que o tempo de aquecimento onde ocorre a completa transformação de fase é de 5 s.

- Tempo de resfriamento – 30 s

De acordo com os dados obtidos mostrados nas Figuras 36-42, pode-se observar que o tempo de resfriamento, onde ocorre a completa transformação de fase devido à atuação do carregamento mecânico é de 30s.

- Tensão mecânica - 142,2 MPa (P = 15,7 N)

Tensão obtida através de massas disponíveis no laboratório (1,6 kg) para se aproximar a tensão ideal de trabalho da liga.

As Figuras 36-42 ilustram o processo citado e o comportamento da liga dentro de cada ciclo. Deve-se observar que ciclos com tempos de resfriamento inferiores a 30s,



não permitem a total transformação da liga durante sua fase fria, ou seja, a transformação em martensita não-maclada, e que o tempo de aquecimento de 5 segundos para 142 MPa são o suficientes.

Desta forma, observou-se que o tempo ideal de resfriamento é de 30 segundos, e que o tempo de aquecimento ideal varia de acordo com a tensão cujo fio está submetido. Quanto maior a carga mecânica, mais tempo será necessário.

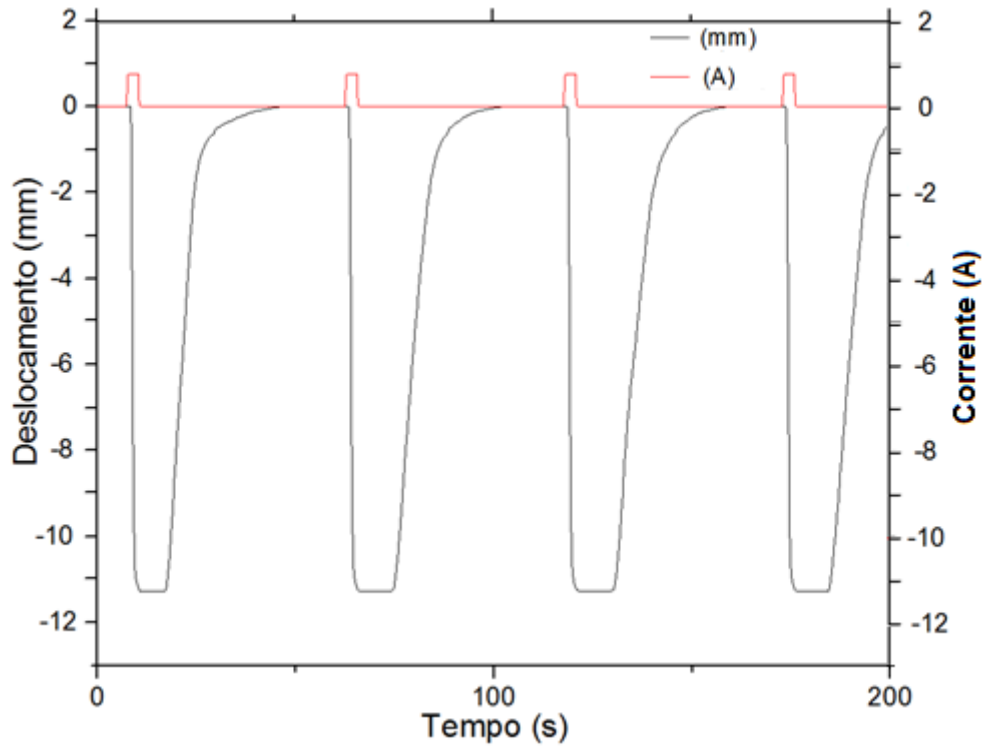


Figura 36 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 10s (on);  
60s (off)

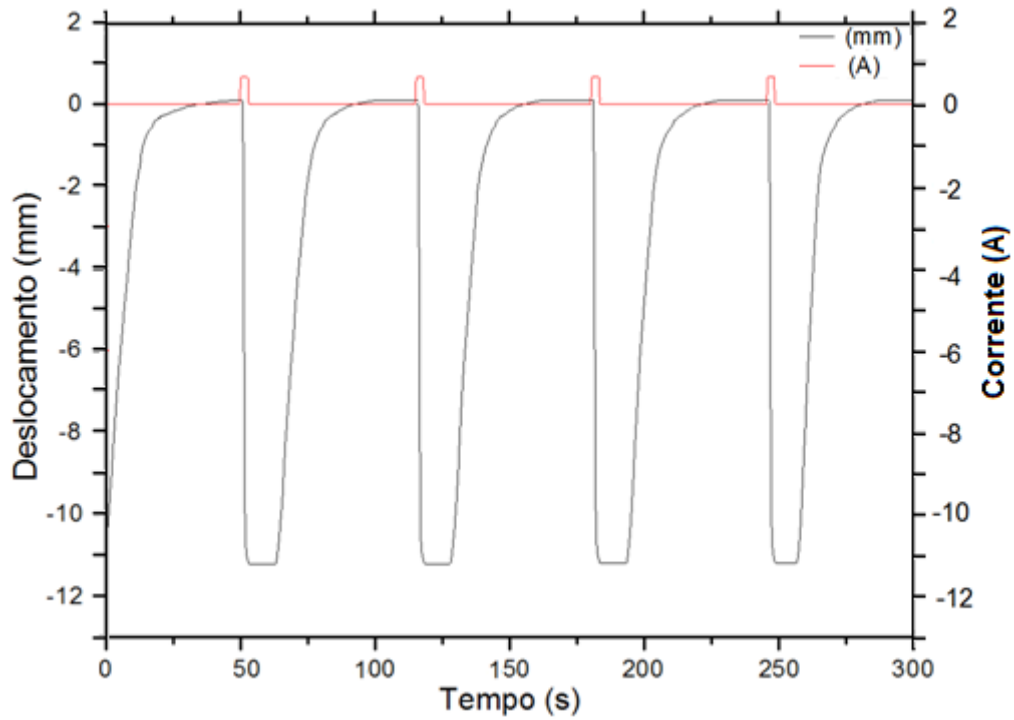


Figura 37 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on); 60s (off)

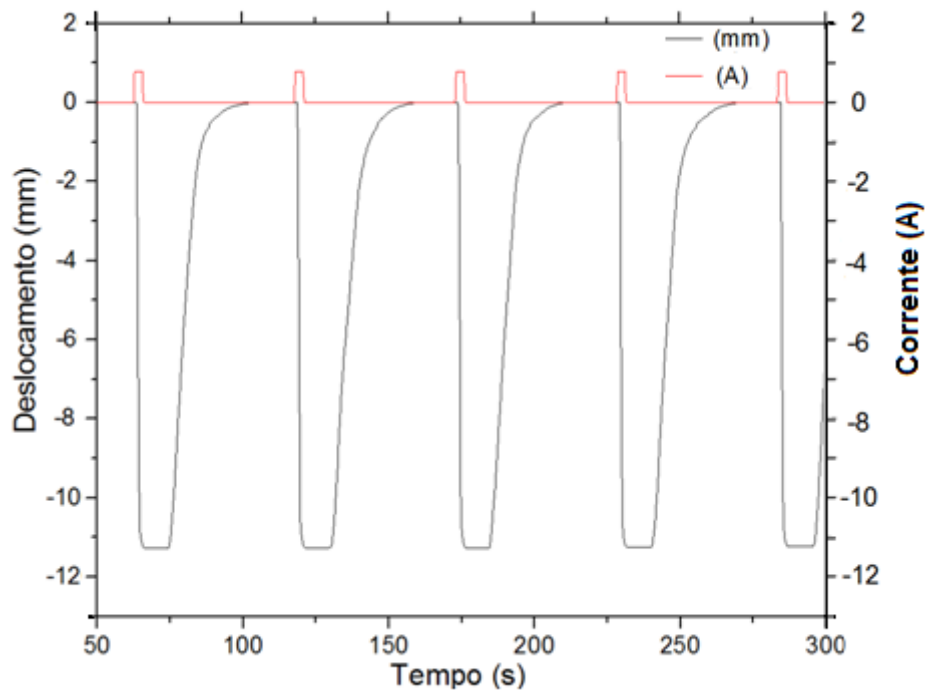


Figura 38 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on);  
50s (off)

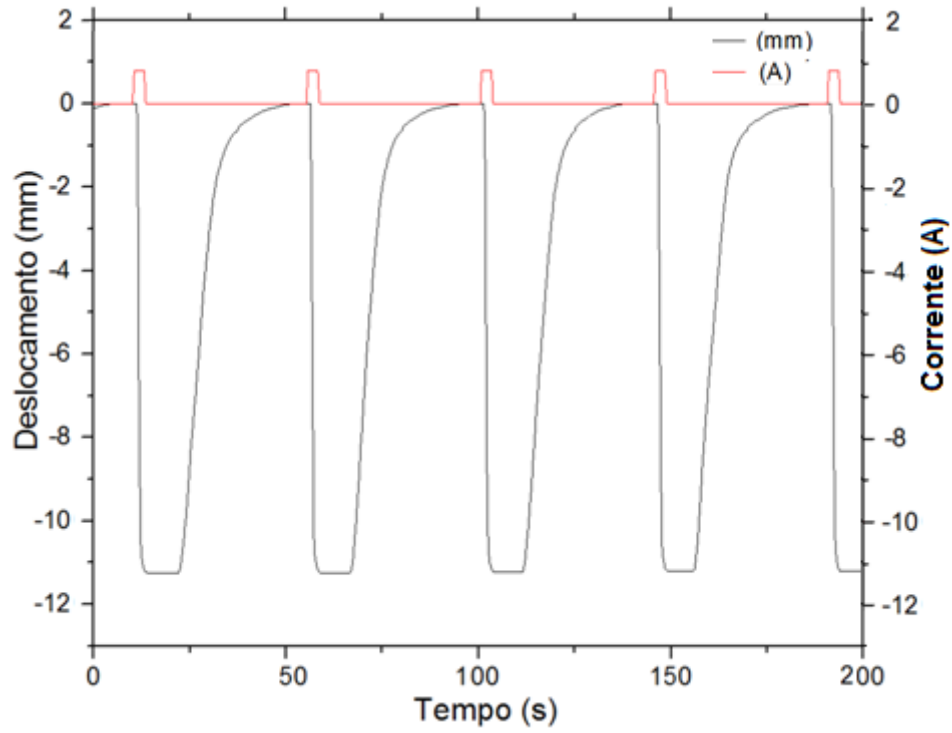


Figura 39 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on);  
40s (off)

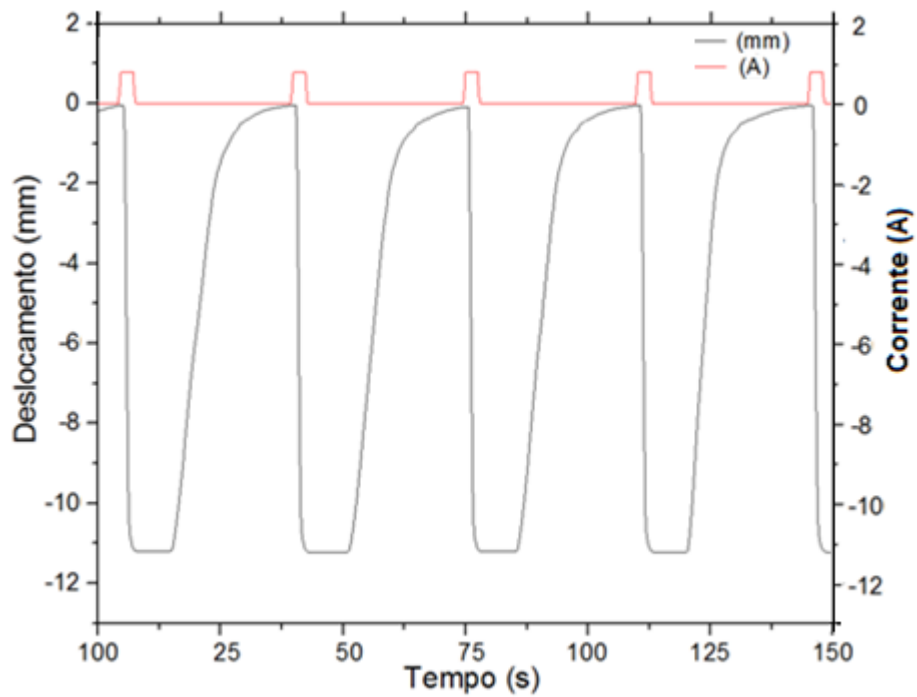


Figura 40 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on);  
30s (off)

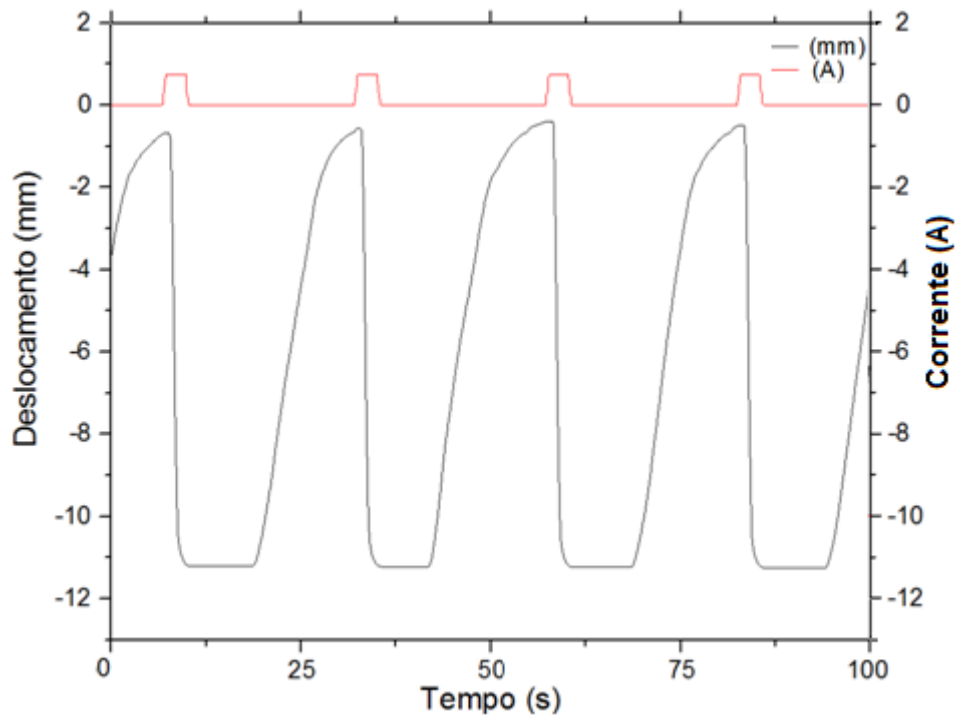


Figura 41 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on); 20s (off)

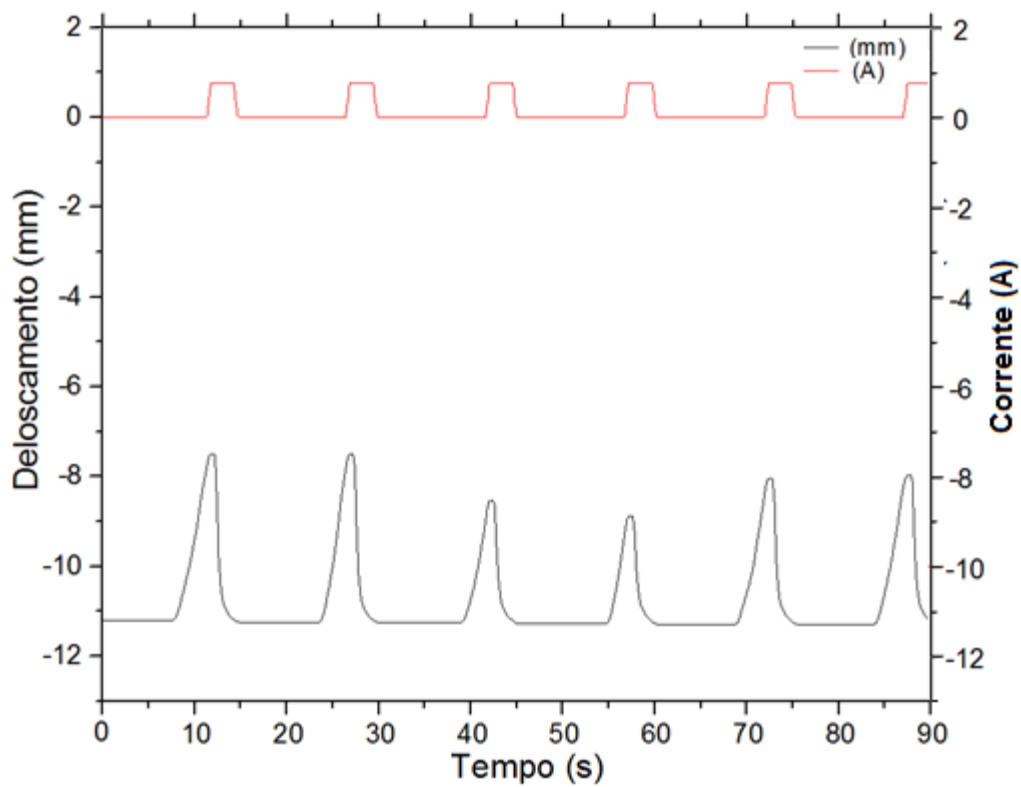
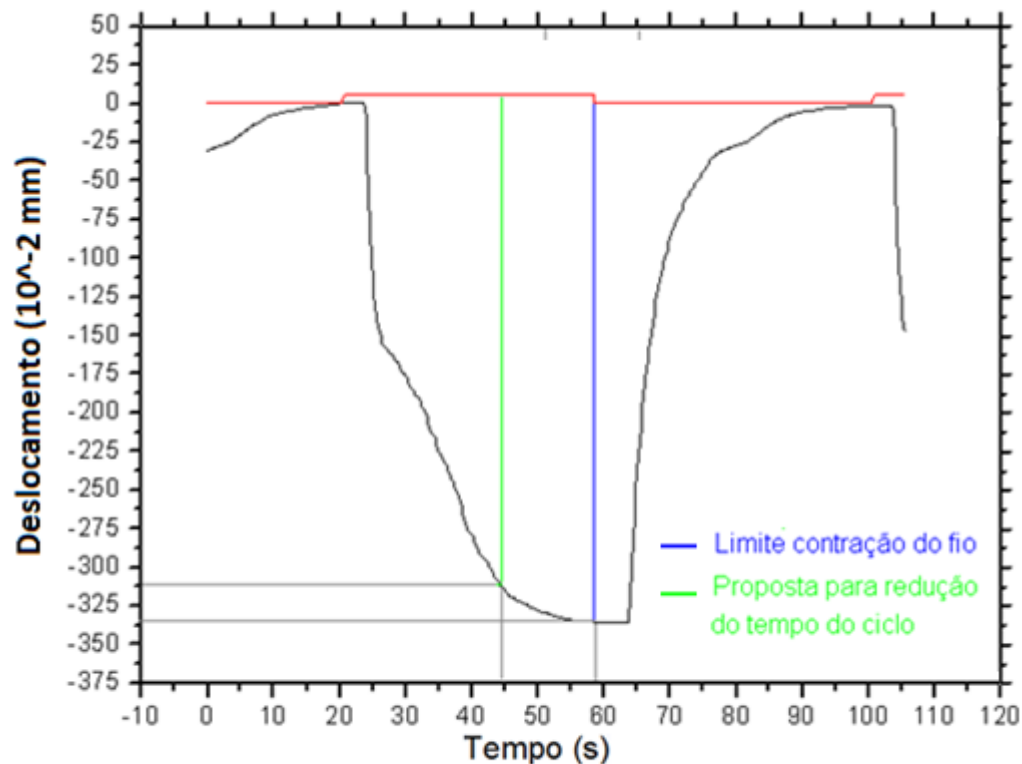


Figura 42 – ENSAIO 3 - Condições 15,7 N (142 MPa); 10 V; 0,82 A; 5s (on); 10s (off)

#### 5.4. Opção de redução no tempo dos ciclos

Uma opção para redução do tempo de ensaio é reduzir o tempo de aquecimento de modo que o ganho de tempo seja grande e a perda de algum percentual de transformação não seja igualmente grande.

Tomou-se como base o ensaio 3 e foram então avaliadas essas relações como mostrado na figura 43.



Redução de 7.3% na deformação máxima  
Redução de 37.5% no tempo de aquecimento

Figura 43: Relação – Tempo de aquecimento X Transformação

#### 5.4. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 142 MPa (carregamento ideal de trabalho)

Um corpo de prova de 100 mm foi submetido com as características obtidas no item 5.2: 142 MPa, 10 V, 5 s (on), 30 s (off).

O fio foi submetido a tais condições no intuito de verificar a existência dos fenômenos descritos no item 2.4.2., quando submetido a um valor de tensão onde o fabricante trata como ideal de trabalho, ou seja, submetendo a liga a uma situação bem abaixo da crítica, de acordo com a tabela 3 (600 MPa).

Durante o ensaio foram aplicados aproximadamente 2.000 ciclos. Apesar de terem ocorrido pequenas variações, inferiores a 1%, na taxa de deslocamento ao longo do processo, pode-se observar na Figura 41 que apesar de alguns desvios (devido a fatores externos, como temperatura do meio, pequenas vibrações ou atritos no sistema) o ciclo se comportou da mesma forma ao longo de todo o ensaio. Pode-se concluir a partir de uma média das variações de deslocamento entre cristas e vales, que não houve perda significativa durante esses ciclos.

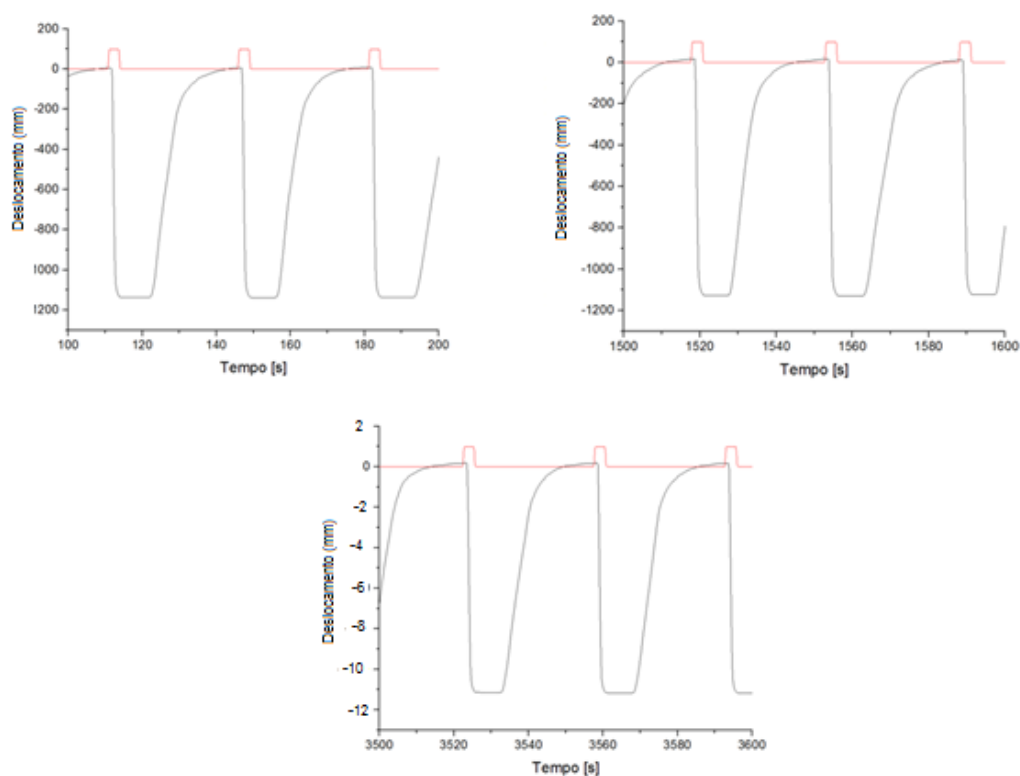


Figura 41 – Comportamento regular do ciclo ao longo do tempo (142 MPa)

### **5.5. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 490 MPa (81,3% carregamento máximo de trabalho)**

Com base nos estudos descritos no item 2.4.2, sabe-se que a perda de capacidade de atuação da liga se dá em um número de ciclos muito baixo quando o carregamento mecânico está na faixa mais alta admitida pela liga, cerca de 20 ciclos com 940 MPa de tensão no fio, para um caso envolvendo comportamento pseudoelástico. Inicialmente, tentou-se observar o mesmo efeito com uma tensão de 142 MPa, adequada para a utilização da liga. Após cerca de 2000 ciclos, não foi possível observar nenhum tipo de variação considerável. Então, um novo corpo de prova, com as mesmas características foi submetido ao mesmo ciclo, dessa vez, sob uma tensão de 488 MPa (81,3% do máximo indicado pelo fabricante). Após 400 ciclos foi possível observar uma perda de 17,25% do efeito de memória de forma da liga, que se reflete na perda de capacidade de atuação, conforme Figura 14.

A partir dos pontos de pico e vale dos gráficos de deslocamento *versus* tempo para diferentes valores de corrente elétrica, pode-se estimar a variação de deslocamento para cada ciclo. Dessa forma, é possível traçar a curva ilustrada na figura 42, que representa a perda de capacidade da liga de recuperar a deformação ao longo da evolução dos ciclos, com isso, a perda de atuação.

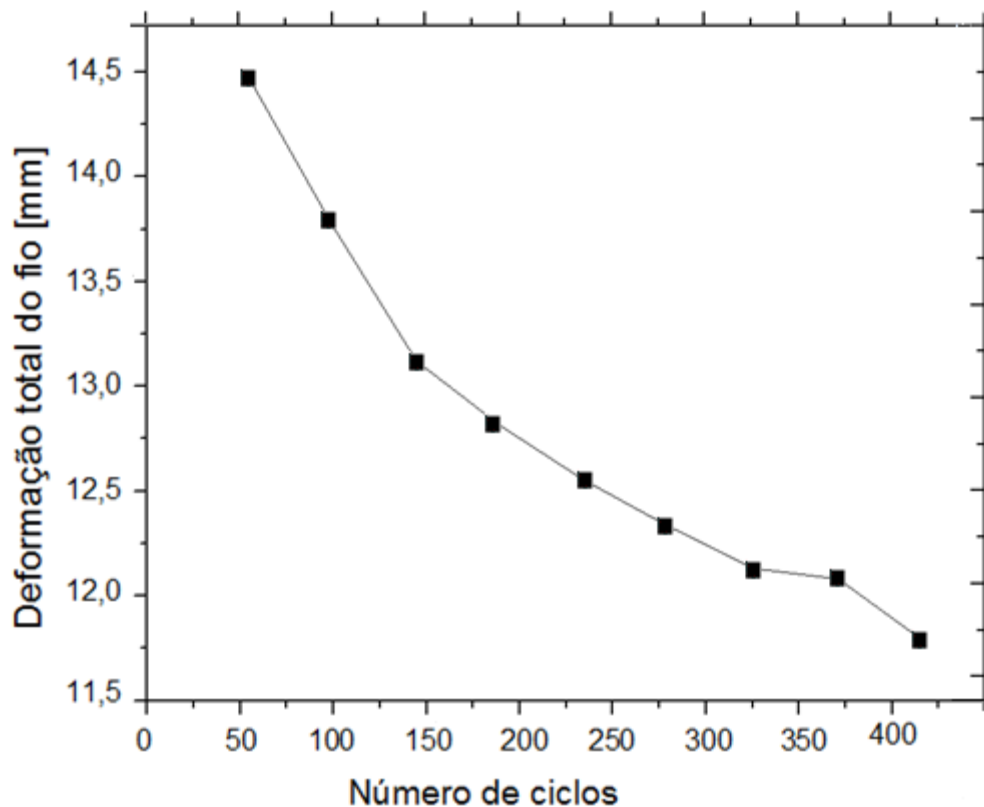


Figura 42 – Perda da capacidade de atuação por fadiga funcional (490 MPa)

### **5.6. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 660 MPa (carregamento máximo de trabalho)**

No intuito de reproduzir as condições críticas de trabalho indicadas pelo fabricante, utilizou-se uma tensão 10% maior que a indicada. Após 65 ciclos, foi possível observar uma perda no efeito de memória de forma de 16,5%. De forma análoga ao item 5.5 foi possível gerar um gráfico que está representado na Figura 43.



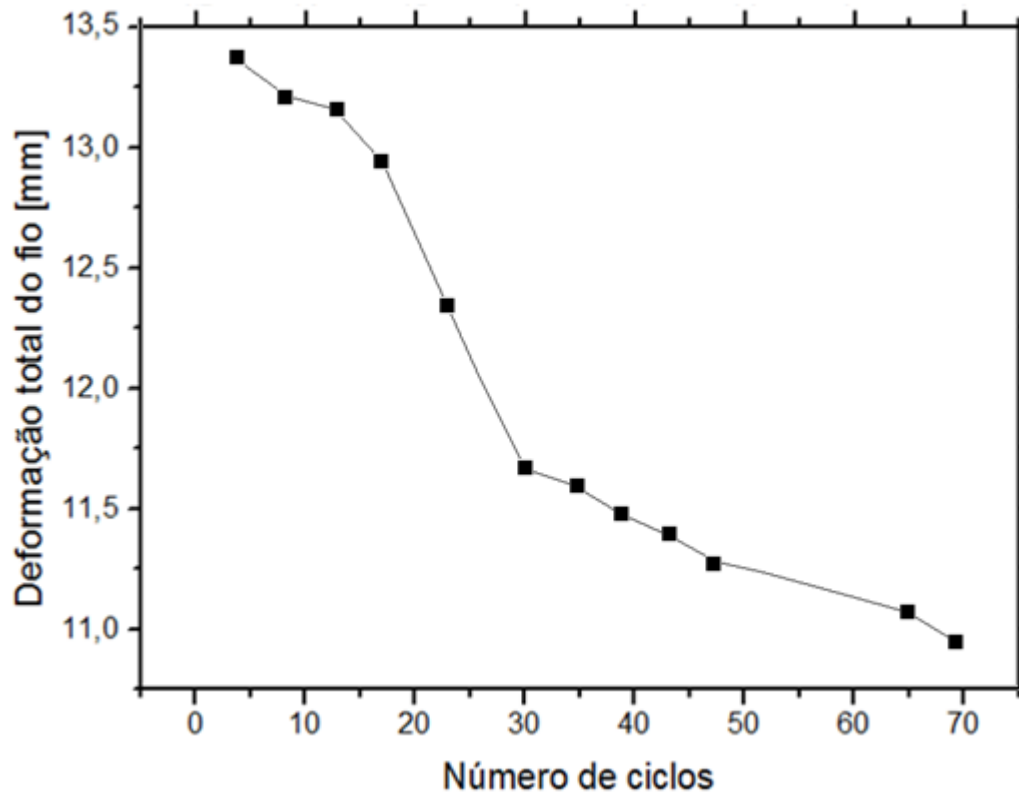


Figura 43 - Perda da capacidade de atuação por fadiga funcional (660MPa)

### 5.7. Teste de fadiga funcional e perda de propriedades – 800 MPa (carregamento máximo de trabalho)

Todos os componentes do ensaio resistiram ao carregamento máximo imposto no estudo de estável, sem apresentar nenhum tipo de influência no resultado do experimento, como ilustrado na figura 44.

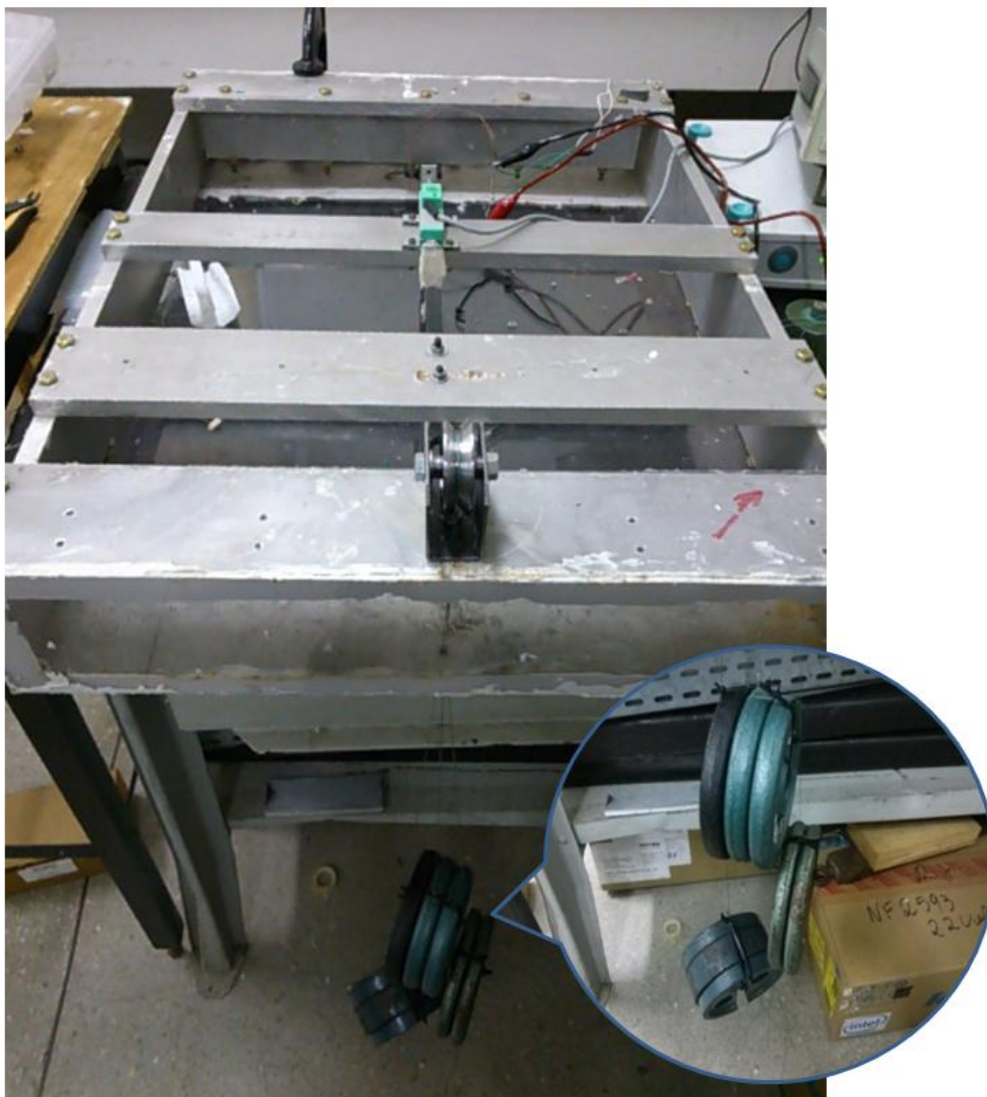


Figura 44 - Ensaio com carregamento crítico

Com base em estudo [30], no intuito de através da fadiga, provocar um rompimento no fio, aumentamos o carregamento de modo a gerar uma tensão no fio de 800 MPa, uma tensão 33% maior que a máxima especificada pelo fornecedor. Após 25

ciclos foi possível observar a perda de 27% de sua capacidade de recuperação e logo em seguida o rompimento do mesmo. Através do gráfico de deslocamento foram coletados valores para elaborar a curva apresentada na Figura 45, demonstrando a perda o efeito de memória de forma ao longo dos ciclos

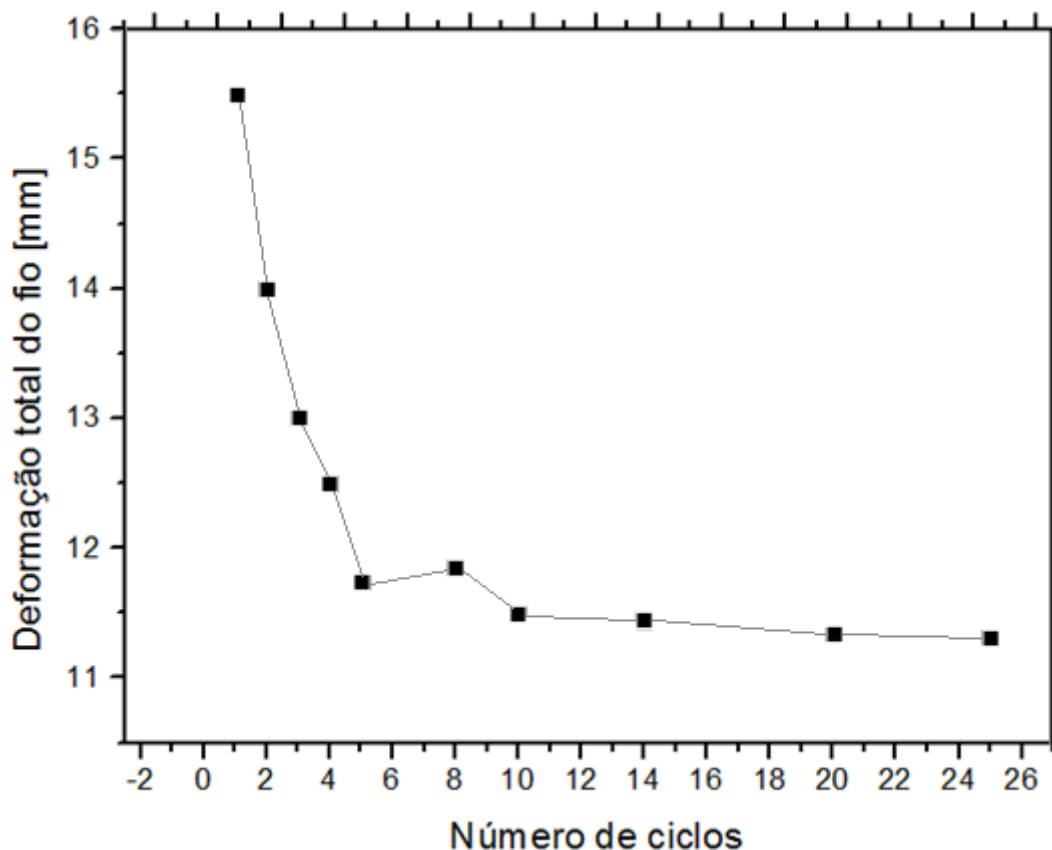


Figura 45 - Perda da capacidade de atuação por fadiga funcional seguida de rompimento por fadiga estrutural (800 MPa)

### 5.8. Teste de fadiga clássica

Com base nos diversos testes executados, foi possível observar a falha da estrutura apenas para o ensaio envolvendo o carregamento associado à aplicação da tensão máxima de 800 MPa. Inicialmente, manteve-se o fio tracionado sem que se passasse corrente elétrica pelo sistema. Após 25 ciclos de aquecimento do fio por efeito joule e resfriamento no ar, sempre com a ação de um peso morto para gerar tensão no

fio ocorreu a falha do fio, que rompeu em uma seção afastada do ponto de fixação, o que garante que a falha não ocorreu devido a efeitos associados a concentrações de tensão na região da fixação ou do esmagamento no prensa cabos, como mostrado na Figura 46.

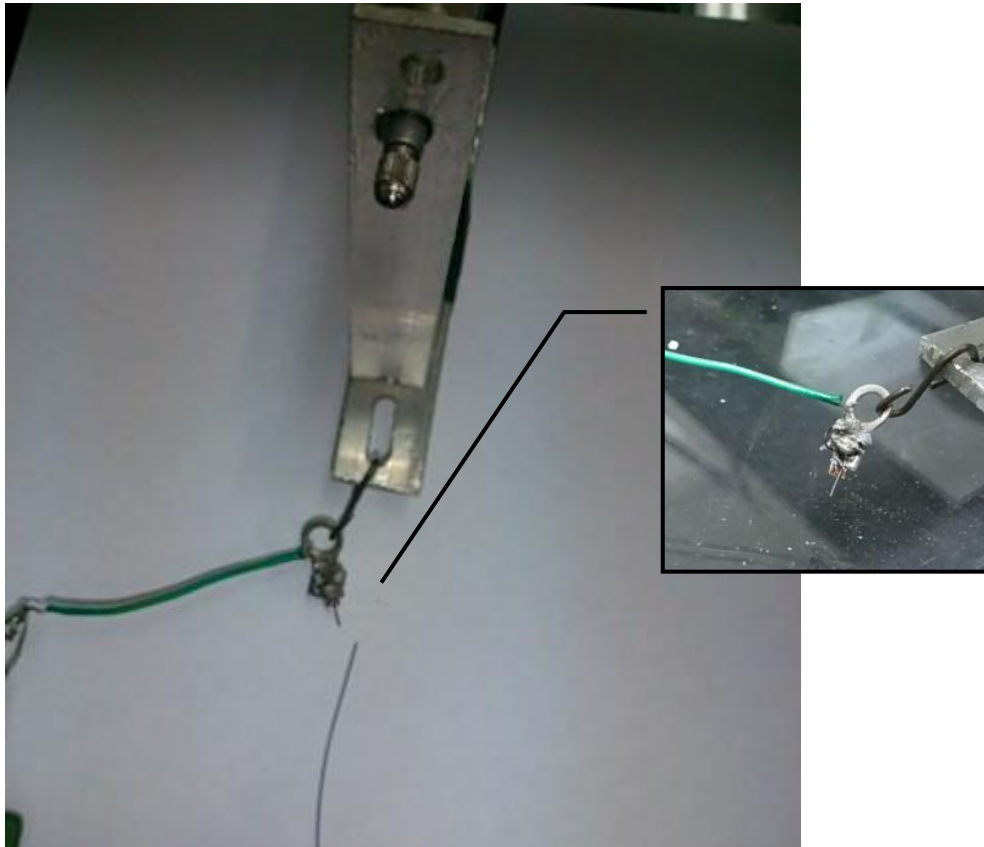


Figura 46 – Ruptura do fio em 25 ciclos (800MPa)

Foi possível observar a influência dos ciclos de transformação estrutural da liga em relação a fadiga clássica do material, já que por se tratar de um ensaio com tensão constante, o fator determinante para provocar a ruptura se dá devido ao processo de fragilização da liga devido à sua transformação microestrutural, gerando assim falhas internas no material, como ilustrado na Figura 12.

### 5.9. Influência da Tensão na Fadiga Funcional

A Figura 47 apresenta uma análise comparativa da perda do efeito de memória de forma em função da tensão aplicada, apresentando a evolução da redução da amplitude de atuação em função do número de ciclos para os primeiros 25 ciclos. Quando submetidas a uma tensão de 148 MPa o fio não apresentou perda de suas propriedades. Porém quando o nível de tensão foi elevado para 800 MPa, pode-se observar que em cerca de 5 ciclos, a liga apresentou uma perda maior que 20% de sua capacidade de contração. Portanto conforme eleva-se a tensão na liga, maior é a perda da capacidade de atuação ao longo dos ciclos.

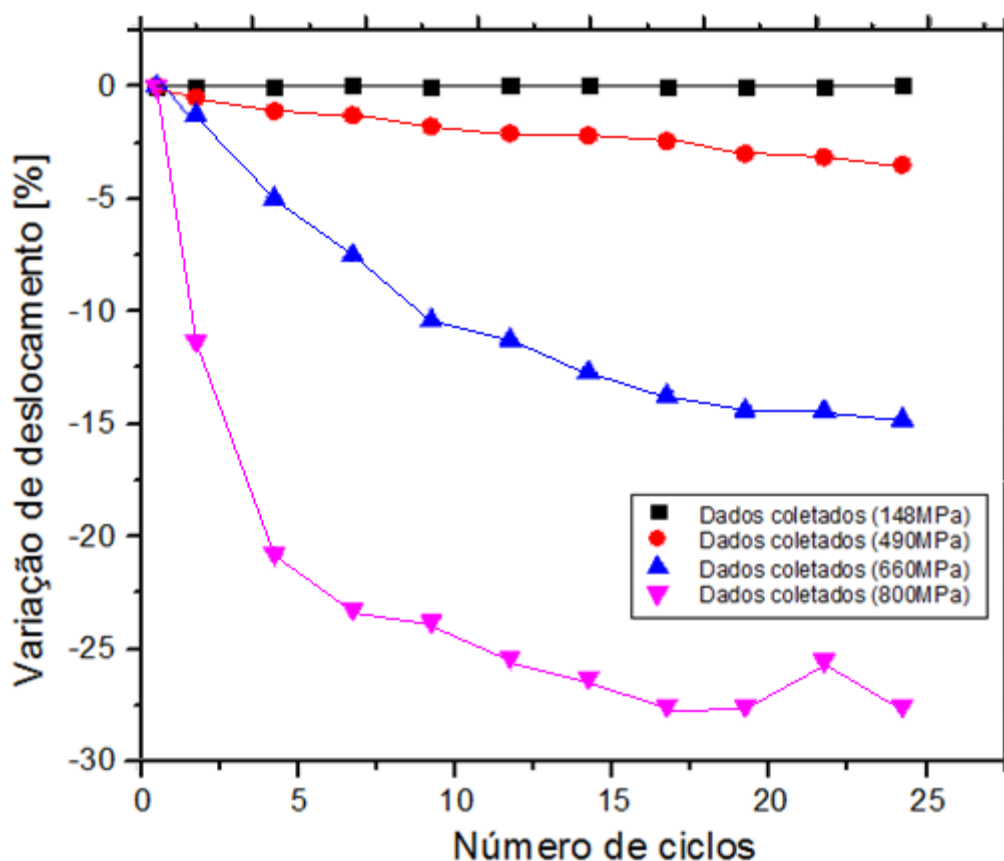


Figura 47 – Perda da capacidade de atuação em função da tensão aplicada.

## CAPITULO 6 – CONCLUSÃO

O modelo experimental para teste de fadiga em fios de memória de forma desenvolvido no CEFET/RJ se comportou de maneira adequada e eficiente para o estudo de fadiga em fios de liga de memória de forma, mostrando comportamentos similares aos encontrados em estudos de fadiga disponíveis na literatura.

A partir dos dados obtidos nos ensaios, foi possível gerar curvas comparativas entre fadiga funcional dos fios quando submetidos a diferentes níveis de tensão. Curvas essas fundamentais para a aplicabilidade da liga. Os resultados mostram que conforme eleva-se a tensão aplicada no fio de SMA, maior é a perda do efeito de atuação ao longo dos ciclos.

Em relação ao estudo da fadiga clássica, foi possível verificar a possibilidade de gerar curvas de fadiga para diferentes ligas, devido à boa repetibilidade do equipamento. A possibilidade de gerar corpos de prova para análise de trincas, falhas e comportamento microestrutural também é uma opção importante e com viabilidade comprovada.

Sugere-se para trabalhos futuros envolvendo fadiga em fios com memória de forma os seguintes tópicos: 1) estudo de fadiga clássica e funcional em fios de memória de forma quando submersos em fluido não condutor, uma vez que a estrutura se encontra adaptada para receber tal teste e que o coeficiente de troca térmica maior irá possibilitar ensaios em tempos mais curtos; 2) estudo microestrutural das ligas após os ciclos, afim de gerar informações relativas ao surgimento de trincas e falhas; 3) desenvolvimento de curvas de fadiga para diferentes tipos de liga; 4) adaptação do equipamento para ciclos com mais de um fio simultaneamente.

## BIBLIOGRAFIA

[1]PACHECO, P. M. C. L., SAVI, M. A., LA CAVA, C.A.P.L., SILVA, E. P., MACHADO, L. G.“Modelagem de um Dispositivo de Pré-Carga com Memória de Forma para Juntas Flangeadas”, COBEM97 ,1997.

[2] CatalogoFlexinol® , DYNALLOY, Inc. Makers of Dynamic Alloys

<<http://www.dynalloy.com/>>acesso em 10/10/2014

[3] LAGOUDAS, D.C. &BERTACCHINI, O.W. &PATOOR, E., Fatigue life characterization of shape memory alloys under themomechanical cyclic loading. TEXAS A&M University, Texas, US

[4] The orthodontic cyber journal

<<http://orthocj.com/journal/uploads/2011/>>acessoem 10/10/2014

[5]MIYAZAKI, Mizukoshi. Fatigue properties of the TI-NI base shape memory alloy wire, 1999

[6]MCNICHOLS, B., Eggeler,G.,Hornbogem, 1981

[7]MING, H. W.&SCHETKY L. McD., Industrial applications for shape memory alloys, Memry Corporation, 57 Commerce Drive, Brookfield, Connecticut, 1997

[8] ROYSE, F, Projeto final – Departamento de engenharia mecânica, CEFET/RJ, Rio de janeiro, 2007

[9] WEIMIN. H, Shape Memory Alloys and their Application to Actuators for Deployable Structures, 1998

[10] Site da fornecedora 3M :

[http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en\\_US/Electronics\\_NA/Electronics/Products/Product\\_Catalog/~?N=6698252&rt=c3](http://solutions.3m.com/wps/portal/3M/en_US/Electronics_NA/Electronics/Products/Product_Catalog/~?N=6698252&rt=c3) Acesso em 08/08/2014

[11] LAGOUDAS, Dimitri C. & BERTACCHINI, Oliver W. & Patoor, Etienne. Fatigue life characterization of shape memory alloys under thermomechanical cyclic loading. TEXAS A&M University, Texas, US

[12] MACHADO, L.G. & SAVI, M.A. ; Medical applications of shape

memory alloys , Departamento de Engenharia Mecânica e de Materiais,

Instituto Militar de Engenharia, Departamento de Engenharia Mecânica, COPPE,

Universidade Federal do Rio de Janeiro , Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2003

[13] ANADÓN, J.R.S.; Large force shape memory alloy linear actuator, University of Florida, FL, USA, 2002

[14] GRANT, V. H., “Design of Shape memory Alloy Actuator with High Strain and Variable Structure Control”, 1995

[15] SMA/MEMS Research group;

<[http://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma\\_mems/flap.html](http://webdocs.cs.ualberta.ca/~database/MEMS/sma_mems/flap.html)> Acesso em

15/04/2014



[16]Volkswagen.ag,

<[http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/Materials\\_and\\_Manufacturing\\_Methods/Active\\_mechanisms\\_with\\_shape\\_memory\\_actuators.html](http://www.volkswagenag.com/content/vwcorp/content/en/innovation/Materials_and_Manufacturing_Methods/Active_mechanisms_with_shape_memory_actuators.html)>Ac

esso em 03/05/2014

[17] NOGUEZ, C.A.C.&SAIIDI,M. & ASCE, F.; Performance of Advanced Materials during Earthquake Loading Tests of a Bridge System , Journal of Structural Engineering, Vol. 139, No. 1, pp. 144-154, 2013

[18] SONG. G., PATIL. D.&BARTOS C.K.J.; Applications of Shape Memory Alloys in Offshore Oil and Gas Industry: A Review, Symposium 5: Intelligent Sensors and Actuators, pp. 1551-1567,

[19] Reginald DesRoches, M.ASCE & Jason McCormick & Michael Delemont , Cyclic Properties of Superelastic Shape Memory Alloy Wires and Bars , Journal of Structural Engineering, Vol. 130, No. 1, January 2004, pp. 38-46, 2010

[20] ADEEL. Z. & ANDRAWES. B., Manufacturing and Modeling of SMA Composite Reinforcement for Enhanced Performance of Concrete Structures under Sequential Ground Motion Records, Strengthening and Restoration Using Composite Materials, pp. 1867-1878, ASCE, 2013

[21]<http://cedb.asce.org/cgi/WWWdisplay.cgi?261435>

[22] Università Degli Studi Di Terento

<[http://www.ing.unitn.it/~colombo/memoriatome'/HTM/09\\_Applicazioni.htm](http://www.ing.unitn.it/~colombo/memoriatome'/HTM/09_Applicazioni.htm)>accesso

em 10/10/2014

[23] Universidade Federal do Vale do São Francisco - Univasf

[http://www.univasf.edu.br/~joseamerico.moura/index\\_arquivos/Cap6.pdf](http://www.univasf.edu.br/~joseamerico.moura/index_arquivos/Cap6.pdf)

[24] ROMANO. R., TANNURI. E.A., Modelagem e validação experimental de um atuador baseado em liga de memória de forma, 2008

[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-17592008000100003](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-17592008000100003) >

acesso em 06/09/2014

[25] Oulu University - <<http://herkules.oulu.fi/isbn9514252217/html/x317.html>>

[26] NOVAK. V., Sittner P., Dayananda.G.N. , Braz-Fernandes F.M. , Mahesh K.K. Electric resistance variation of NiTi shape memory alloy wires in thermomechanical tests: Experiments and simulation, 2007

[27] Pappas P., Bollas D, Parthenios J., Dracopoulos V. e Galiotis C., Transformation fatigue and stress relaxation of shape memory alloy wires, 2007

[28] AIROLDI, G. ; POZZI, M. ; LODI, D.A.; The Electric Resistance of Shape Memory Alloys in the Pseudoelastic Regime, 1997;Dipartimento di Fisica, Università di Mikmo

[29] MONTEIRO JUNIOR, P. C. C., Análise do Acoplamento Termomecânico em Ligas com memória de Forma, Dissertação de M. Sc., COPPE/UFRJ/ RJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2007.

[30] DI SONG; GUOZHENG KANG; QIANHUA KAN; CHAO YU; CHUANZENG ZHANG. The effect of martensite plasticity on the cyclic deformation of superelasticNiTi shape memory alloy.Smart Mater. Struct. 23 (2013)

[31] Incropera; DeWitt; Bergman; Lavine; Fundamentals of heat and mass transfer 6<sup>th</sup> edition, 1996

[32] EGGLEER, G. Structural and functional fatigue on NiTi Shape memory alloys, June, 2003