CEFET/RJ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

ANÁLISE DE FADIGA EM FIOS COM MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECÂNICOS

Armando José Morais de Azevedo

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Orientadores:
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Paulo Pedro Kenedi

Rio de Janeiro
Maio, 2016

ANÁLISE DE FADIGA EM FIOS COM MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECÂNICOS

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

Armando José Morais de Azevedo

Aprovada por:

_____
Presidente, Prof. Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco, D.Sc. (orientador)

_____
Prof. Paulo Pedro Kenedi, D.Sc. (coorientador)

_____
Prof. Marcelo Amorim Savi, D.Sc.

_____
Prof. Luiz Carlos da Silva Nunes, D.Sc.

Rio de Janeiro
Maio, 2016

Agradecimentos

A Deus pela saúde, inspiração e capacidade de realizar este trabalho e pelas tantas coisas boas que me concedeu durante essa caminhada.

Aos meus pais Armando e Márcia, agradeço pelo apoio, dedicação, educação, incentivo, paciência e carinho.

A minha futura esposa Mariana por ser essa pessoa maravilhosa, pela paciência e apoio nos momentos mais difíceis.

Aos meus Orientadores Pedro Manuel Calas Pacheco e Paulo Pedro Kenedi pelos ensinamentos, incentivo e confiança creditada em mim.

A professora Luciana Loureiro e ao professor Ricardo Aguiar pelo apoio e trocas de ideias.

Ao amigo e técnico de laboratório Brenno Duarte por toda ajuda e colaboração no desenvolvimento do presente trabalho.

Aos amigos do LACTM pelas palavras de incentivo, troca de ideias e aprendizado.

A todos os professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e de Materiais do CEFET/RJ pelo ensino ministrado, através das disciplinas ao longo deste curso.

A todos os amigos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CNPq pelo suporte financeiro.

RESUMO

ANÁLISE DE FADIGA EM FIOS COM MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECÂNICOS

Armando José Morais de Azevedo

Orientadores:
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Paulo Pedro Kenedi

Resumo da Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais.

As ligas com memória de forma (SMAs) têm a capacidade de gerar forças e deformações elevadas quando submetidas a carregamentos termomecânicos. Esse efeito ocorre devido a processos de transformações de fase do material. As características especiais das SMAs têm permitido a aplicação em diversas áreas como aeroespacial, biomecânica e médica. Em suas diversas aplicações, como em atuadores, estas ligas metálicas experimentam carregamentos cíclicos, tornando o estudo do comportamento em fadiga relevante. As SMAs apresentam dois tipos de comportamento em fadiga: fadiga funcional e fadiga estrutural ou clássica. Um dispositivo experimental de baixo custo foi utilizado neste trabalho para analisar o comportamento em fadiga de fios de SMAs submetidos a ciclos de carregamentos termomecânicos. O dispositivo desenvolvido permite o registro do deslocamento do fio através de um transdutor de deslocamento potenciométrico conectado a um sistema de aquisição de dados. Os fios são submetidos a um carregamento mecânico constante e a ciclos térmicos aplicados através de uma fonte de corrente elétrica controlada que promove o aquecimento do fio por efeito Joule, seguido de resfriamento ao ar por convecção natural. Esse dispositivo pode ser utilizado tanto para gerar curvas de fadiga funcional, como para gerar curvas de fadiga estrutural. Os resultados experimentais obtidos mostraram que o sistema apresenta um desempenho adequado e eficiente para analisar a fadiga de fios de SMA, mostrando comportamentos similares aos encontrados na literatura.

Palavras-chave:
Ligas com Memória de Forma; Fadiga; Fadiga Funcional; Análise Experimental

Rio de Janeiro
Maio, 2016

ABSTRACT

ANALYSIS OF SHAPE MEMORY ALLOY WIRES SUBJECTED TO THERMOMECHANICAL CYCLIC LOADINGS

Armando José Morais de Azevedo

Advisors:
Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco
Paulo Pedro Kenedi

Abstract of dissertation submitted to Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica e Tecnologia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, CEFET/RJ as partial fulfilment of the requirements for the degree of Master's Degree in Mechanical Engineering and Materials Technology.

Shape memory alloys (SMAs) have the capability to generate large forces and displacements when subjected to thermomechanical loadings. This effect occurs due a phase transformation process. SMAs special features allowed the development of applications in several areas as aerospace, biomechanics and medical. In various applications, such as in actuators, SMA elements experience cyclic loadings, making the study of fatigue behavior for this material relevant. SMAs have two types of fatigue behavior: functional fatigue and structural or classical fatigue. A low cost experimental device was used in this work to analyze the fatigue behavior of SMAs wires subjected to thermomechanical loading cycles. This device allows the recording of SMAs wires displacement using potentiometric displacement sensors connected to a data acquisition system. Wires are subjected to a constant mechanical loading and thermal cycling applied by a source of controlled electric current promotes heating of the wire by Joule effect, followed by air-cooling by natural convection. This device can be used to generate experimental curves either for functional fatigue or for structural fatigue. Experimental results show that the system presents an appropriate and efficient performance for analyze fatigue in SMAs wires, exhibiting similar behavior to those found in the literature.

Keywords:
Shape Memory Alloys; Fatigue; Functional Fatigue; Experimental Analysis

Rio de Janeiro
May, 2016

Sumário

Capítulo I – Introdução 1

I.1 – Objetivos do trabalho 2

I.2 – Organização do trabalho 3

Capítulo II – Materiais com Memória de Forma 4

II.1 – Comportamentos Termomecânico das Ligas com memória de forma 4

II.1.1 – Transformação de fase por tensão e por temperatura 4

II.1.2 – Efeito memória de forma de uma via (*One-way ou OWSMA*) e duas vias/reversível (*Two-way ou TWSMA*) 7

II.1.3 – Efeito pseudoelástico 8

II.2 – Aplicações das Ligas com Memória de Forma 9

II.3 – Fadiga em Ligas com Memória de Forma 12

Capítulo III – Procedimento Experimental 18

III.1 – Características do Fio SMA 18

III.2 – Dispositivo Experimental 20

III.3 – Metodologia dos testes 22

Capítulo IV – Resultados e Discussões 29

Capítulo V – Conclusão 57

Referências Bibliográficas 59

Lista de Figuras:

Figura I.1: Quantidade de publicações em periódicos científicos sobre materiais inteligentes 1
Figura II.1:Diagrama de transformação de fase induzida por temperatura 5
Figura II.2: Diagrama de transformação de fase induzida por tensão..... 6
Figura II.3: Diagrama de transformação de fase induzida por tensão e por temperatura 6
Figura II.4: Tensão-deformação em função da temperatura..... 7
Figura II.5: Diagramas ilustrando o efeito memória de forma de uma via e de duas vias. 8
Figura II.6: Curva tensão-deformação..... 8
Figura II.7: Diagrama esquemático ilustrando o efeito da pseudoelasticidade 9
Figura II.8: Extrator de pinos de 100 N 9
Figura II.9: Avião da Boeing durante o teste de *chevrons* com elementos de SMA..... 10
Figura II.10: Desenhos esquemátiocos de aplicações civis de SMA..... 10
Figura II.11: Placa e grampo de SMA utilizados na recuperação de fraturas 11
Figura II.12: Espaçador utilizado para tratamento de discos danificados nas vertebras..... 11
Figura II.13: Protótipo de uma prótese de mão acionadas por atuadores de SMA..... 11
Figura II.14: Curva tensão-número de ciclos para um ensaio cíclico de deformação prescrita em fios NiTi..... 13
Figura II.15: Curva temperaturas de transformação-número de ciclos térmicos em uma liga de memória de forma recozida a 1000°C por 1 hora, seguido de têmpera em água gelada. 15
Figura II.16: Curva tensão-deformação de um fio austenítico pré-deformado a temperatura de 320 °C e um fio austenítico pré-deformado a temperatura de 30 °C..... 15
Figura II.17: Efeito de ciclos mecânicos na deformação em ligas de memória de forma sob diferentes temperaturas 16
Figura II.18: Dissipação de energia durante os ciclos para diferentes picos de tensão 17
Figura II.19: Vida em fadiga funcional para vários picos de tensão 17
Figura III.1: Ensaio com calorímetro de varredura (DSC) 19
Figura III.2: Desenho Esquemático do dispositivo 20
Figura III.3: Detalhe da fixação do fio..... 21
Figura III.4: : Vista em perspectiva do dispositivo proposto para análise de fadiga 21
Figura III.5: Dispositivo proposto para análise de fadiga..... 22
Figura III.6: Sistema de aquisição de dados HBM Spider 8 e o programa de aquisição de dados HBM Catman durante um teste..... 23
Figura III.7:Transdutor de deslocamento e placa de circuito impresso..... 24
Figura III.8: Esquema elétrico do circuito utilizado. 24
Figura III.9: Fio de SMA com o curvamento ocasionado pela conformação de armazenamento e fixado ao dispositivo..... 25
Figura III.10: Rolo de armazenamento do fio. 25
Figura III.11: Evolução do deslocamento durante a fase de resfriamento e fase de aquecimento da carga de 50 N..... 26
Figura III.12: Câmera térmica A325sc..... 26
Figura III.13: Evolução da temperatura para 3 testes: (a) 10 N, (b) 30 N e (c) 60 N..... 27
Figura III.14: Temperaturas do fio no ciclo nos testes: (a) 10 N, (b) 30 N e (c) 60 N..... 28
Figura IV.1: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 10 N .. 30
Figura IV.2: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 20 N .. 31
Figura IV.3: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 30 N .. 32

Figura IV.4: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 40 N .. 33
Figura IV.5: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 50 N .. 34
Figura IV.6: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 60 N .. 35
Figura IV.7: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 70 N .. 36
Figura IV.8: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 80 N .. 37
Figura IV.9: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 90 N .. 38
Figura IV.10: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 10 N modificados 40
Figura IV.11: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 20 N modificados 41
Figura IV.12: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 30 N modificados 42
Figura IV.13: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 40 N modificados 43
Figura IV. 14: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 50 N modificados 44
Figura IV.15: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 60 N modificados 45
Figura IV.16: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 70 N modificados 46
Figura IV.17 Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 80 N modificados 47
Figura IV.18: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 90 N modificados 48
Figura IV.19: Parâmetro *α* 49
Figura IV.20: Parâmetro β 50
Figura IV.21: Deformação máxima e mínima no 2º ciclo 90º ciclo 51
Figura IV.22: Deformação média inicial e final e amplitude da deformação inicial e final 52
Figura IV.23: Variação percentual da deformação média em relação ao valor inicial 53
Figura IV.24: Variação percentual da amplitude de deformação em relação ao valor inicia 53
Figura IV. 25: Deformação máxima e mínima no 2º ciclo e 90º ciclo 54
Figura IV.26: Deformação média inicial e final e amplitude da deformação inicial e fina 55
Figura IV.27: Variação percentual da deformação média em relação ao valor inicial 56
Figura IV.28: Variação percentual da amplitude de deformação em relação ao valor inicial 56

Lista de Tabelas:

Tabela II.1: Propriedades mecânicas de algumas ligas SMA..... 4
Tabela III.1: Características do fio de memória de forma..... 18

Lista de Símbolos

E_A	Módulo de Elasticidade na Fase Austenita,
E_M	Módulo de Elasticidade na Fase Martensita,
H	Porcentagem Máxima de Deformação Recuperável
ρ	Massa Específica
σ	Tensão
T	Temperatura
ε	Deformação
σ_s^{AM}	Início da Transformação de Fase Austenita→Martensita
σ_f^{AM}	Fim da Transformação de Fase Austenita→Martensita
σ_s^{MA}	Início da Transformação de Fase Martensita→Austenita
σ_f^{MA}	Fim da Transformação de Fase Martensita→Austenita
M_s	Início da Transformação de Fase Austenita→Martensita
M_f	Fim da Transformação de Fase Austenita→Martensita
A_s	Início da Transformação de Fase Martensita→Austenita
A_f	Fim da Transformação de Fase Martensita→Austenita
Ω	Resistência Elétrica
A	Corrente Elétrica
$\bar{\varepsilon}_i$	Deformação Média Inicial
$\bar{\varepsilon}_f$	Deformação Média Final
$\Delta\varepsilon_i$	Amplitude da Deformação Inicial
$\Delta\varepsilon_f$	Amplitude da Deformação Final
α	Variação Percentual da Deformação Média em Relação ao Valor Inicial
β	Variação Percentual da Amplitude de Deformações em Relação ao Valor Inicial

Capítulo I – Introdução

Materiais inteligentes estão sendo amplamente utilizados como uma tecnologia chave para permitir o desenvolvimento de diversos tipos de novos produtos em função das suas capacidades únicas (BOGUE, 2014). Atualmente muitos materiais e produtos inteligentes estão comercialmente disponíveis e o seu comportamento e as tecnologias associadas são objeto de investigação acadêmica, como mostra a Fig.I.1 que ilustra a evolução ao longo dos anos da quantidade de publicações de trabalhos na área em periódicos científicos (SCOPUS, 2015).

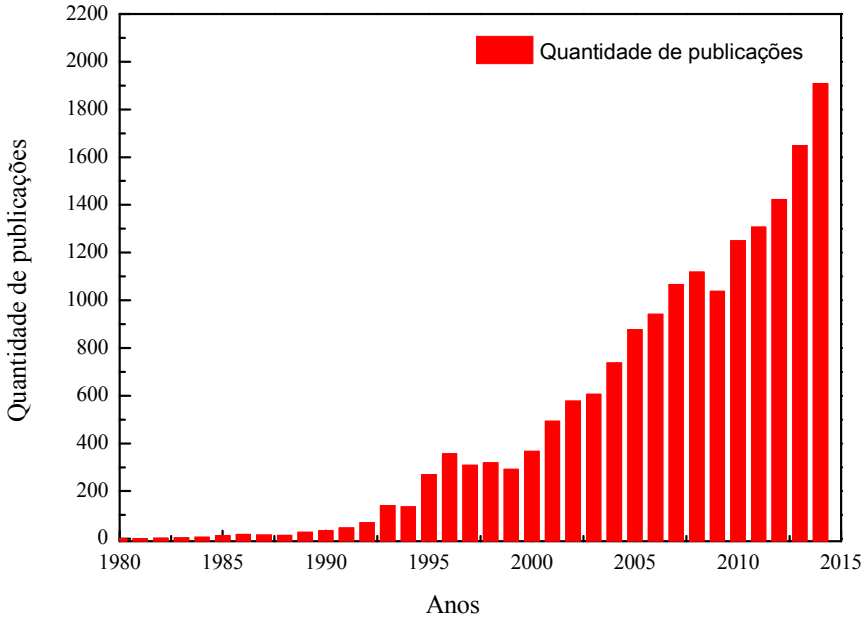


Figura I.1: Quantidade de publicações em periódicos científicos sobre materiais inteligentes. (SCOPUS, 2015).

Os materiais assim classificados apresentam determinadas características intrínsecas que podem ser exploradas em produtos, sistemas ou estruturas por possuírem um comportamento particular. Exemplos desse comportamento incluem respostas a estímulos externos, como auto recuperação, auto acionamento e mudança de forma. Alguns materiais podem apresentar mais de um desses comportamentos (BOGUE, 2014).

Atualmente os materiais inteligentes são utilizados em sensores e atuadores, apresentando como principais características a miniaturização, alta capacidade de carga e velocidade de resposta (AGUIAR *et al.,* 2010; AMEZQUITA-SANCHEZ, 2014; ANTON E SODANO, 2007; ATULASIMHA *et al*., 2011 BOGUE, 2014; GUO *et al*., 2015; PEREIRA, 2009; RUTH *et al*., 2015; SAVI *et al.,* 2015; VALADKHAN *et al*., 2008). Alguns exemplos desses materiais são ligas com memória de forma, materiais piezelétricos e materiais magnetoestrictivos.

As ligas com memória de forma (*Shape Memory Alloy* – SMA) têm sido amplamente utilizadas em vários campos devido às suas características especiais. As principais características desses materiais são a pseudoelasticidade e o efeito de memória de forma. A pseudoelasticidade está associada à capacidade do material recuperar a sua forma original depois da aplicação de um ciclo de carregamento-descarregamento mecânico capaz de induzir grandes deformações. No efeito memória de forma o material apresenta a capacidade de recuperação de grandes deformações, voltando à forma original depois da aplicação de uma carga termomecânica adequada. Em ambos os casos as grandes deformações estão associadas a fenômenos de transformação de fase. Uma tendência para o futuro são os compósitos SMAs (LESTER E BAXEVANIS, 2015).

A fadiga em materiais se refere à redução de propriedades resultante da aplicação de carregamentos cíclicos. O estudo da fadiga em ligas com memória de forma começou a ser desenvolvido há bastante tempo, desde o final da década de 1979 (EGGELER *et al*. 2003). Uma vez que nas suas aplicações principais, como no caso de atuadores ou absorvedores de vibrações, as SMAs sofrem carregamentos cíclicos, é pertinente o estudo da fadiga nesses materiais (HECKMANN E HORNBOGEN, 2003; MALETTA E FURGIUELE, 2011; MALETTA, 2014; SOUL *et al.* 2010).

As SMAs apresentam dois tipos de comportamento em fadiga: fadiga estrutural ou clássica e fadiga funcional. A fadiga funcional está associada à perda de funcionalidade de atuação ou recuperação de deformação com o número de ciclos, enquanto que a fadiga estrutural se desenvolve em função do dano microestrutural acumulado devido ao carregamento cíclico, podendo culminar em falha por geração de trincas (EGGELER *et al*. 2003; GIRI *et al.* 2010; HUMBEECK E STALMANS, 1998; PREDKI *et al.* 2006). Devido ao seu complexo comportamento em fadiga, um estudo mais aprofundado é necessário para melhor compreensão.

I.1 – Objetivos do trabalho

O objetivo desta dissertação é desenvolver um estudo experimental do desempenho mecânico de fadiga funcional em fios SMAs submetidos a ciclos termomecânicos para avaliar a faixa de trabalho útil do material. Um dispositivo experimental de baixo custo, com base no proposto por BERTACCHINI *et al.* (2003) e desenvolvido por ROYSE (2007), é usado para a análise. O dispositivo desenvolvido, que recebeu a implementação de modificações para tornar a sua operação mais precisa e eficiente, permite o registro do deslocamento do fio através de um transdutor conectado a um sistema de aquisição de dados.

I.2 – Organização do trabalho

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos. Neste primeiro capítulo é apresentada uma introdução geral sobre o assunto.

O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica sobre as ligas com memória de forma, destacando os seus comportamentos principais, a suas aplicações e o seu comportamento em fadiga.

No terceiro capítulo é descrito o procedimento experimental, envolvendo as características do fio utilizado nos ensaios, o dispositivo experimental e a metodologia do ensaio.

No quarto capítulo são apresentados e discutidos os resultados dos ensaios experimentais.

Finalmente, o quinto capítulo apresenta as conclusões sobre o trabalho e propostas para trabalhos futuros.

Capítulo II – Materiais com Memória de Forma

Neste capítulo são descritos os principais comportamentos termomecânicos das SMAs associados à fenômenos de transformação de fase, algumas aplicações das SMAs e os tipos de fadiga que as SMAs estão sujeitas.

II.1 – Comportamentos Termomecânico das Ligas com memória de forma

Atualmente, as SMAs baseadas nos sistemas NiTi, CuZnAl, CuAlNi são as mais utilizadas para aplicações industriais. Entre elas, a liga de níquel-titânio (NiTi) se destaca pelas suas boas propriedades mecânicas, resistência a corrosão, pelo efeito memória de forma e pseudoelasticidade mais acentuados em comparação aos outros tipos de SMAs. As ligas NiTi podem ser obtidas comercialmente em várias formas, como fios, molas, tiras, tubos e chapas. Em função das suas características, estas são as ligas mais estudadas desde a sua primeira fabricação em meados dos anos 60 por Buehler e sua equipe (LAGOUDAS, 2008). A Tab.II.1 mostra algumas propriedades mecânicas de diversas SMAs. As ligas NiTi apresentam cerca 8% de deformação recuperável, enquanto as ligas de CuZn apresentam um valor entre 4 e 5%.

Tabela II.1: Propriedades mecânicas de algumas SMAs (LAGOUDAS, 2008)

Propriedades	NiTi	NiTiCu	NiTiPd	CuAlNi
E_A (GPa)	70	50	15	90
E_M (GPa)	30	25	25	80
H (%)	6	5	3	4
ρ (kg/m^3)	6500	6500	8200	7500

Na Tabela II.1 E_A é o módulo de elasticidade na fase austenita, E_M é o módulo de elasticidade na fase martensita, H é a porcentagem máxima de deformação recuperável e ρ é a massa específica.

II.1.1 – Transformação de fase por tensão e por temperatura

Os efeitos em SMAs estão associados a fenômenos de transformações de fase promovidas por carregamentos mecânicos ou térmicos. Duas fases estão presentes nestes materiais: martensita e austenita.

Para caracterizar a transformação de fase induzida por carregamentos mecânicos, definem-se tensões críticas de início e fim de transformação de fase. Estas tensões críticas são representadas pelos seguintes parâmetros: σ_S^{AM} (início da transformação de fase austenita→martensita), σ_f^{AM} (fim da transformação de fase austenita→martensita), σ_S^{MA} (início

da transformação de fase martensita→austenita), σ_f^{MA} (fim da transformação de fase martensita→austenita). Observa-se que a martensita é a fase que apresenta tensões críticas de transformação mais baixas, sendo mais facilmente deformada e possuindo duas estruturas cristalinas: martensita maclada e martensita não-maclada. A austenita é a fase que apresenta tensões críticas de transformação mais elevadas. Para um estado livre de tensão, a estrutura austenítica é estável a temperaturas elevadas, enquanto que a estrutura de martensita maclada é estável a temperaturas baixas.

Para caracterizar a transformção de fase induzida por tempertura, definem-se temperaturas de início e fim de transfomação. Estas temperaturas são representadas pelos seguintes parâmetros: M_s (início da transformação de fase austenita→martensita), M_f (fim da transformação de fase austenita→martensita), A_s (início da transformação de fase martensita→austenita), A_f (fim da transformação de fase martensita→austenita). A Fig. II.1 mostra, esquematicamente, a transformação de fase por temperatura. A tensão aplicada sobre o material altera os valores destas quatro variáveis. Os valores iniciais destas quatro variáveis são também afetados significativamente pela composição do material, ou seja, as quantidades de cada elemento presentes na liga. Nas ligas NiTi, a composição 50% níquel e 50% titânio exibe a temperatura máxima de A_f de 120 ºC. Porém ao aumentar a porcentagem de níquel na composição, essa temperatura diminui, podendo chegar a 80 ºC para 51% de níquel na composição da liga (LAGOUDAS, 2008).

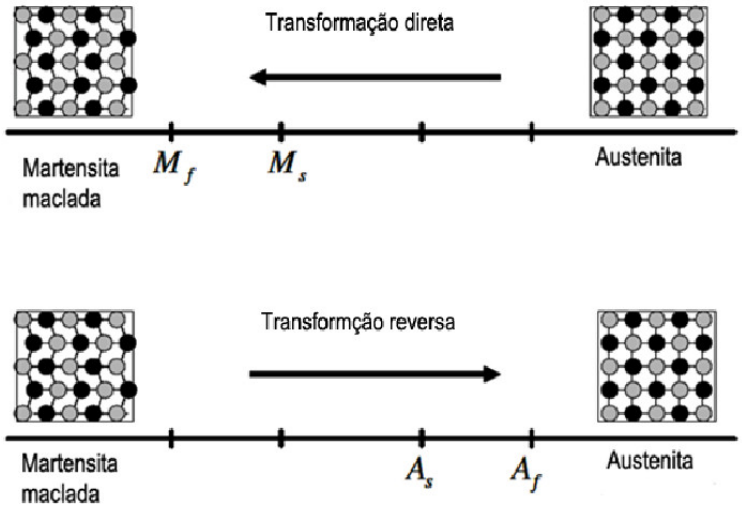


Figura II.1:Diagrama de transformação de fase induzida por temperatura. (LAGOUDAS, 2008)

Para a fase martensita maclada é possível reorientar as variantes martensíticas com a aplicação de uma tensão, transformando-a em martensita não-maclada. A tensão aplicada resulta numa mudança de estrutura cristalina do material, que se mantém quando a tensão é retirada. A Fig.II.2 ilustra a transformação de fase induzida por tensão.

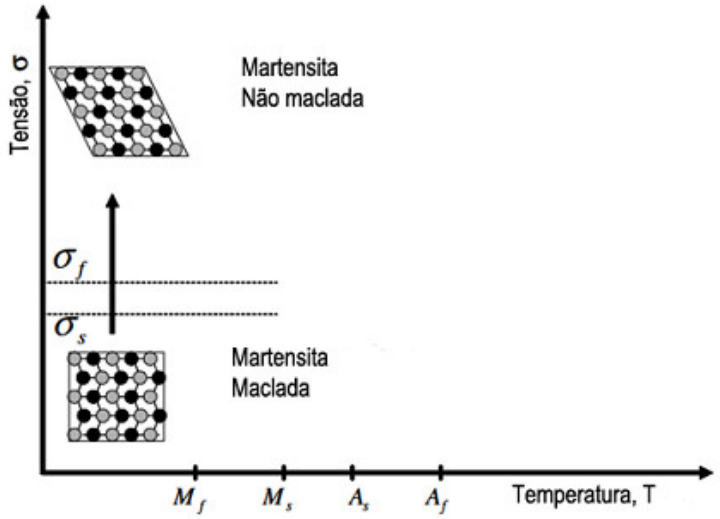


Figura II.2: Diagrama de transformação de fase induzida por tensão. (LAGOUDAS, 2008)

Para retornar o material para o estado anterior à aplicação da tensão é necessário elevar a temperatura do material até A_f, onde ocorrerá transformação de fase completa para austenita, havendo recuperação das deformações associadas à transformação de fase, como mostra a Fig.II.3. Após o resfriamento, o material retorna para o estado de martensita maclada.

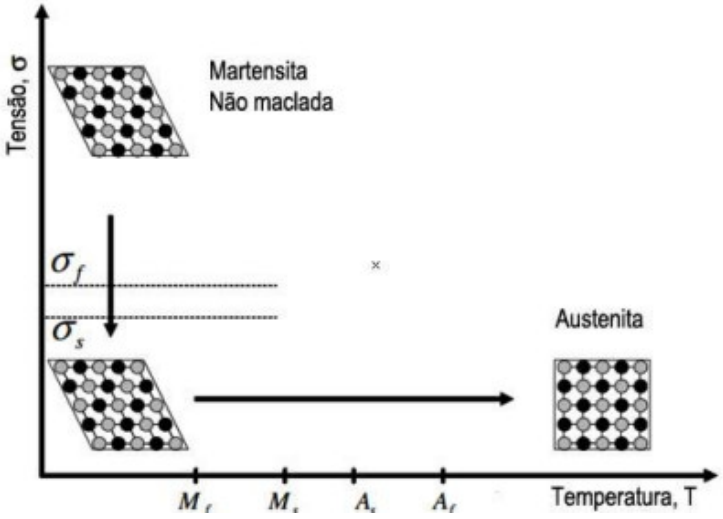


Figura II.3: Diagrama de transformação de fase induzida por tensão e por temperatura. (LAGOUDAS, 2008)

Os comportamentos termomecânicos principais nas ligas com memória de forma são o efeito memória de forma de uma via (*one-way* ou OWSMA) ou duas vias/reversível (*two-way* ou TWSMA) e o efeito pseudoelástico. O efeito memória de forma ocorre a baixas temperaturas, onde se observa que grandes deformações residuais promovidas por cargas mecânicas são recuperadas por aquecimento, após a remoção do carregamento aplicado. O efeito

pseudoelástico somente ocorre a temperaturas elevadas, para o qual a recuperação de grandes deformações promovidas por cargas mecânicas é obtida após a remoção da carga mecânica.

II.1.2 – Efeito memória de forma de uma via (*One-way ou OWSMA*) e duas vias/reversível (*Two-way ou TWSMA*)

O efeito memória de forma de uma via utiliza transformação térmica e mecânica do material. O material no estado de martensita maclada, abaixo da M_f , é transformado por tensão para o estado não-maclado gerando uma deformação no material. A martensita não-maclada é estável e por isso desenvolvem deformações residuais. Para o alívio das deformações geradas pela transformação de fase é necessário aquecer o material acima de A_f para uma transformação completa para a fase austenítica, recuperando assim a forma original. Após o resfriamento, o material retorna para martensita maclada. O caminho *BCDEF* ilustra o efeito memória de forma na Fig.II.4.

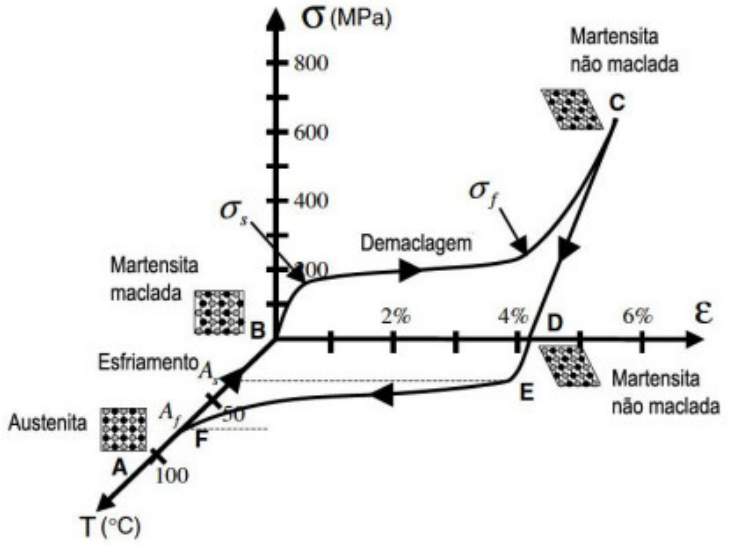
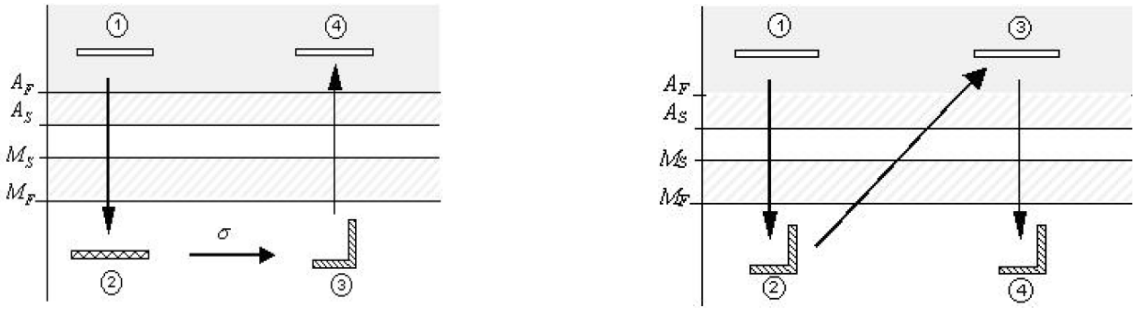


Figura II.4: Tensão-deformação em função da temperatura. (LAGOUDAS, 2008)

Além do efeito memória de forma de uma via, existe o efeito memória de forma de duas vias no qual o material pode memorizar sua forma em ambas as temperaturas, altas e baixas. Assim podem se formar ciclos termomecânicos. No entanto, o efeito memória de forma de duas vias é menos aplicado comercialmente devido às exigências do chamado “treinamento”, um processo de carregamento e descarregamento repetitivos de ciclos térmicos utilizando uma carga prescrita constante até ocorrer a estabilização do laço de histeresse do material (LAGOUDAS, 2008). Além disso, este efeito em geral produz cerca de metade da deformação de recuperação, comparado ao efeito memória de forma de uma via para o mesmo material e

para mesma tensão aplicada. A deformação tende a deteriorar-se rapidamente, especialmente em altas temperaturas. (JANI *et al*. 2013). A Fig.II.5 mostra diagramas esquemáticos que ilustram ambos os efeitos.



(a) (b)

Figura II.5: Diagramas esquemáticos ilustrando: (a) o efeito memória de forma de uma via e (b) o efeito memória de forma duas vias. (Pereira, 2009)

II.1.3 – Efeito pseudoelástico

O efeito pseudoelástico ocorre quando a temperatura do material está acima da temperatura crítica (A_f). Nesta situação a única fase presente para um estado livre de tensões é a austenítica. A aplicação de uma carga mecânica promove uma reorientação da fase de austenita para martensita não-maclada. Ao remover as tensões mecânicas, ocorre a transformação de fase reversa e o retorno para austenita. Este efeito não requer variação de temperatura. A Fig.II.6 mostra a curva tensão-deformação e as transformações de fase associadas, enquanto que a Fig.II.7 ilustra o efeito pseudoelástico do material através de um diagrama esquemático.

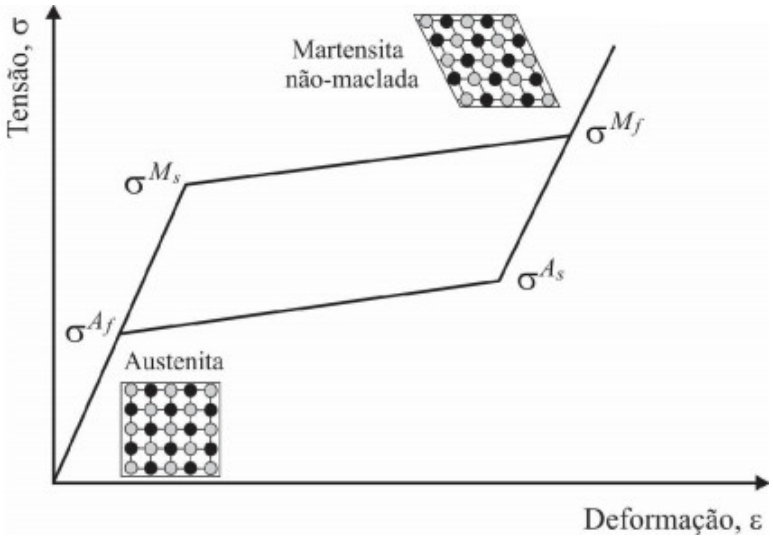


Figura II.6: Curva tensão-deformação. (LAGOUDAS, 2008)

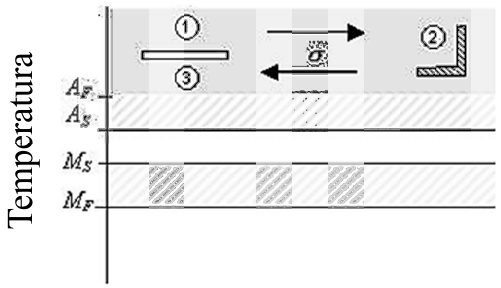


Figura II.7: Diagrama esquemático ilustrando o efeito da pseudoelasticidade. (PEREIRA, 2009)

II.2 – Aplicações das Ligas com Memória de Forma

As propriedades especiais das SMAs permitem desenvolvimentos inovadores em vários campos do conhecimento. NAVA *et al*. (2014) desenvolveram um extrator de pinos para uso na área aeroespacial com força de impulsão de 100 N mostrado na Fig.II.8, apresentando bons resultados em testes de atuação cíclicos no vácuo em atmosfera inerte, envolvendo a aplicação de carregamentos senoidais e aleatórios de vibrações.

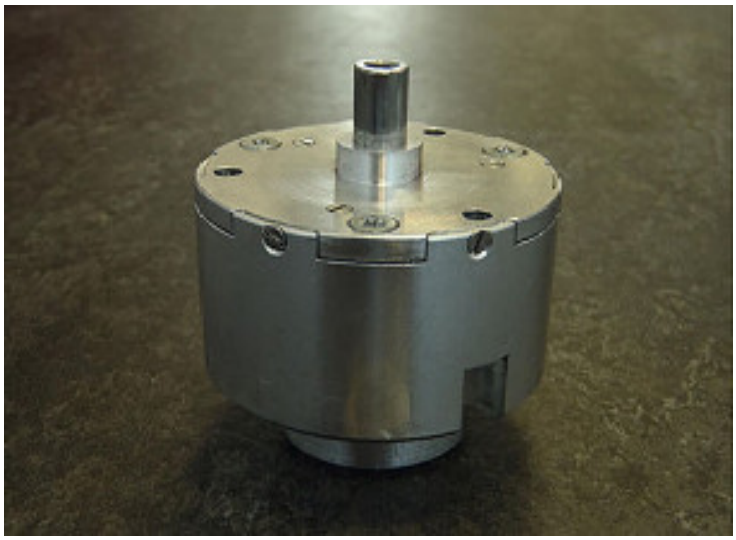


Figura II.8: Extrator de pinos de 100 N. (NAVA *et al.* 2014)

LAGOUDAS (2008) utilizou barras de SMA em *chevrons*, dispositivos presentes em motores de aviões comerciais para misturar o fluxo de gases de escape, para reduzir o ruído em decolagens e pousos. Barras SMA são fixadas nos *chevrons* e são usadas para curvá-los durante o voo de baixa altitude, aumentando assim a mistura e reduzindo o ruído. Em altitudes elevadas a barra de SMA vai esfriar indo para o estado martensítico associado a uma configuração sem curvatura, aumentando o desempenho do motor. A Fig.II.9 mostra um avião da Boeing em fase de teste e, no detalhe, o *chevron.*

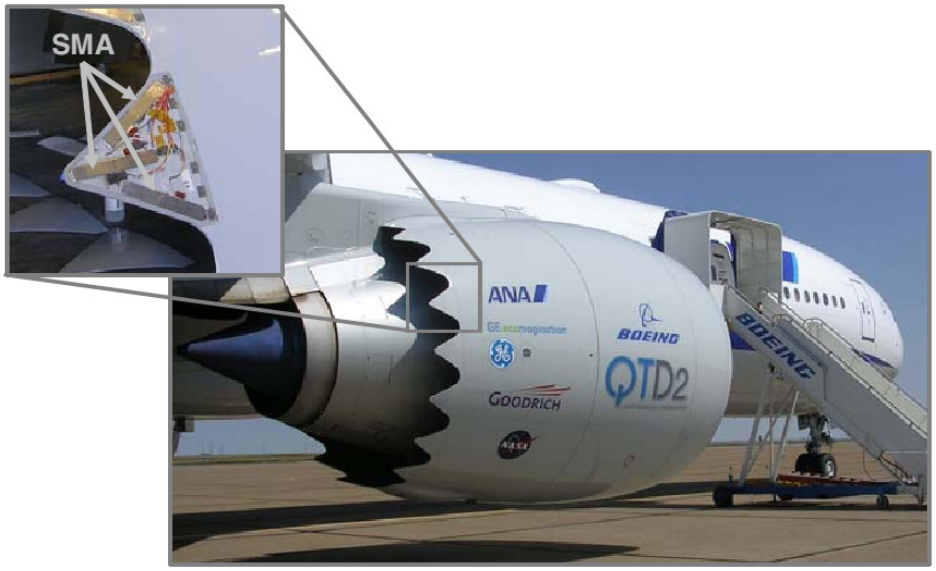


Figura II.9: Avião da Boeing durante o teste de *chevrons* com elementos de SMA. (LAGOUDAS, 2008)

Na área civil, SONG *et al*. (2006) utilizam as SMAs como reforço estrutural, atuadores, dissipadores de energia e amortecedores para controle de estruturas civis, conforme descrito na Fig.II.10.

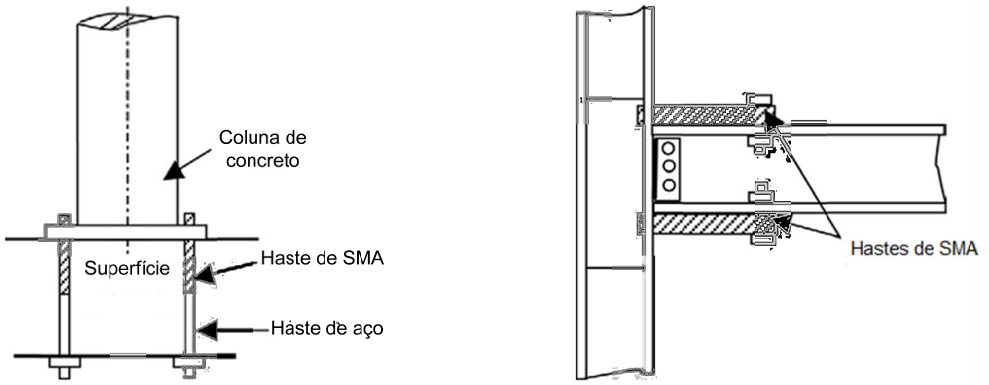
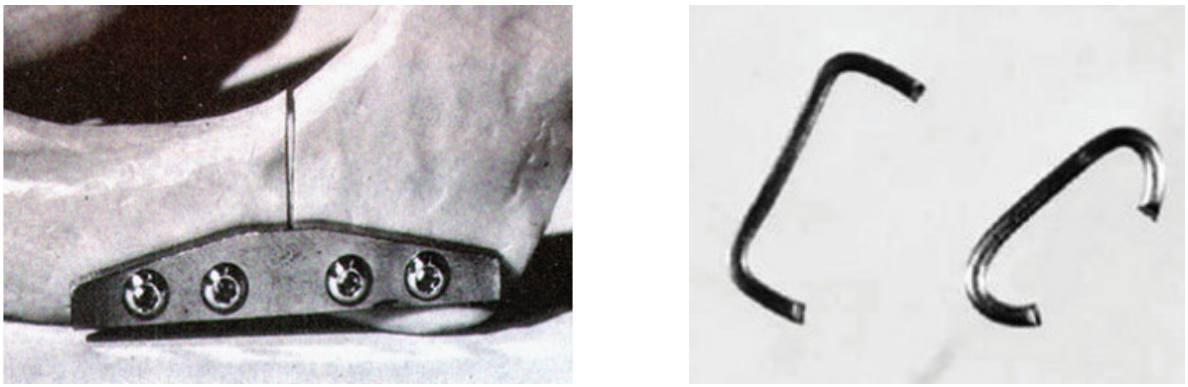


Figura II.10: Desenhos esquemátiocos de aplicações civis de SMA: (a) Sistema de dissipação de energia para colunas de concreto e (b) conectores de SMA para estruturas metálicas. (SONG *et al.,* 2006)

Na área biomédica, PETRINI E MIGLIAVACCANO (2011) citam grampos e placas de SMA utilizados em tratamentos ortopédicos, como os mostrados na Fig.II.11. Eles são deformados e inseridos no local onde está localizada a fratura e a temperatura do corpo induz o efeito memória de forma causando o tensionamento das partes fraturadas, juntando-as. Do mesmo modo é proposto um espaçador para as vértebras da coluna, de forma arredondada, para ser usado no tratamento de discos danificados utilizando o efeito memória de forma. Os espaçadores são inseridos deformados entre as vértebras e a temperatura corporal recupera a

forma original do dispositivo. A Fig.II.12 ilustra o espaçador deformado e com a sua forma original.



(a) (b)

Figura II.11: (a) placa e (b) grampo de SMA utilizados na recuperação de fraturas. (PETRINI E MIGLIAVACCA, 2011).



Figura II.12: Espaçador utilizado para tratamento de discos danificados nas vertebras. (PETRINI E MIGLIAVACCA, 2011).

Na área da robótica, CHEE SIONG *et al*. (2005 apud JANI *et al*. 2013) desenvolveram um atuador SMA para uma prótese de mão para acionar o dedo robotizado com movimentação similar à de um dedo humano (flexão e extensão), como pode-se observar na Fig.II.13.



Figura II.13: Protótipo de uma prótese de mão acionadas por atuadores de SMA. (JANI *et al.,* 2013)

Entre as várias aplicações destaca-se o uso de elementos de SMAs como atuadores e amortecedores de vibrações. FOLLADOR *et al*. (2012) propõem um modelo geral e técnicas para fabricar um atuador tipo mola. Seu trabalho consiste no projeto e no processo de fabricação, assim como a caracterização termomecânica de uma mola de SMA, começando com as especificações de força necessária para o atuador. HWANG E HIGUCHI (2014) desenvolveram um atuador rotativo feito com fios de SMA, analisando a influência das fontes de tensão elétrica de pulso de largura modulada nas características de movimento e o princípio de operação do atuador em função do comportamento termomecânico do fio de SMA. NAGHASHIAN *et al*. (2014) desenvolveram uma viga compósita utilizando fios de SMA e fibra de vidro. Foram feitos testes para analisar suas curvas de atuação monitorizadas em função da temperatura e um modelo analítico simples foi desenvolvido para compósitos rígidos de SMA para comparação de resultados. Um mapa da curva de atuação foi gerado, onde mostra os limites de atuação aproximados para o caso geral de um compósito contendo fios de liga com memória de forma.

Observa-se que as aplicações apresentadas envolvem carregamentos cíclicos dos elementos de SMA. Assim como para estas aplicações, a grande maioria das aplicações envolvendo elementos de SMA envolvem carregamentos cíclicos, o que justifica a relevância do estudo do comportamento em fadiga deste tipo de material.

II.3 – Fadiga em Ligas com Memória de Forma

Dentre os diversos tipos de falha dependentes do tempo, a falha por fadiga é um dos mais importantes na engenharia. A fadiga é definida pela norma ASTM E 1150 como: “processo gradual de mudança estrutural localizada permanente em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em algum ponto (ou pontos) e que pode culminar em trincas ou em fratura, depois de um número suficiente de flutuações”. Em outras palavras, significa que fadiga em materiais é uma falha prematura ou dano permanente resultantes da aplicação de cargas cíclicas ou carregamento controlado.

Como as SMAs experimentam carregamentos cíclicos em diversas aplicações, como atuadores, a análise de fadiga se torna um estudo relevante para esses materiais. EGGELER *et al*. (2003) definiu para as SMAs dois tipos de comportamentos em fadiga: fadiga estrutural, ou clássica, e fadiga funcional. Essa nomenclatura já havia sido empregada antes por HUMBEECK E STALMANS (1998).

Fadiga estrutural normalmente ocorre em vários materiais de engenharia e é usada para caracterizar o dano microestrutural acumulado que promove a falha de uma estrutura ou de um componente mecânico sujeito a cargas flutuantes. Como as SMAs experimentam transformação de fase durante cargas termomecânicas, a fadiga estrutural das SMAs

geralmente apresenta um comportamento mais complexo do que o observado em materiais de engenharia habituais.

Uma investigação foi feita por MELTON e MERCIER (1979) sobre o comportamento de fadiga de baixo ciclo em ligas NiTi com controle de deformação. Testes foram feitos para uma liga que apresenta a fase martensítica à temperatura ambiente para um estado livre de tensões. A Fig.II.14 ilustra o comportamento da liga através de uma curva de tensão máxima *versus* número de ciclos, considerando um carregamento cíclico de deformação prescrita de 9,9% de amplitude. Observa-se que a liga de NiTi apresenta um endurecimento cíclico que estabiliza rapidamente e que a amplitude de tensão se mantém praticamente constante até ocorrer a falha por ruptura.

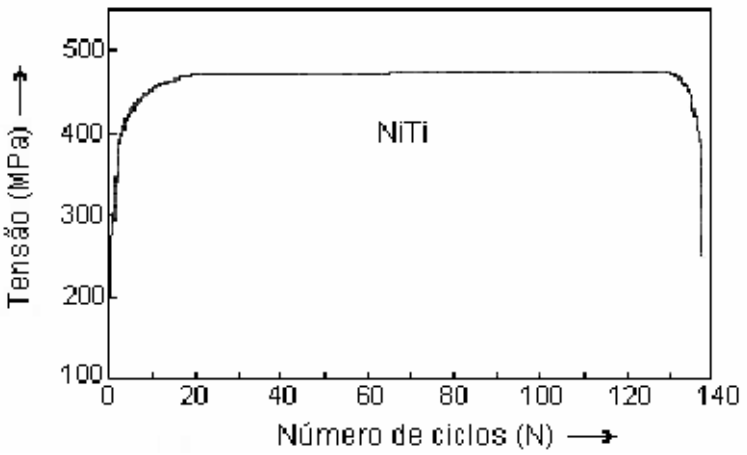


Figura II.14: Curva tensão-número de ciclos para um ensaio cíclico de deformação prescrita em fios NiTi. (MELTON e MERCIER, 1979).

EGGELER *et al*. (2003) fizeram ensaios de tração-compressão para analisar a evolução da histerese em fadiga de baixo ciclo. Os resultados mostraram que a fadiga estrutural de SMAs pseudoelásticas, assim conforme se observa de uma forma geral em ligas metálicas, é regulada pela iniciação e crescimento de trincas superficiais.

TABANLI *et al.* (1999) deduziram através de experimentos que para uma amplitude de deformação fixa, a vida útil varia com o incremento da deformação média.

WAGNER *et al.* (2004) apresentam dados sobre aumento da temperatura de superfície no fio durante a fadiga por flexão rotativa, discutindo a influência do diâmetro do fio e da velocidade de rotação no aumento da temperatura. Os resultados indicam que a vida em fadiga não depende do diâmetro do fio ou da velocidade de rotação quando a temperatura do fio é mantida constante.

FIGUEIREDO *et al.* (2008) fizeram testes de flexão rotativa de ciclos baixos sob controle de deformação em fios com efeito memória de forma e pseudoelásticos e analisaram a vida em fadiga. Concluíram que a vida em fadiga do fio com efeito memória de forma é

aproximadamente cem vezes maior que o fio pseudoelástico. Esse comportamento pode ser atribuído a alguns fatores como o nível de tensão produzido na deformação plástica durante a transformação.

Fadiga funcional é o termo utilizado para caracterizar o decréscimo nas propriedades funcionais do material observadas durante as cargas cíclicas em SMAs. EGGELER *et al.* (2003) discutem a influência da temperatura sobre o desempenho de fadiga em SMAs. Eles mostraram que a microestrutura é importante na estabilização da histerese do material durante carregamentos controlados. Também concluíram que a fadiga funcional está associada a um aumento da deformação residual correspondendo a uma transformação inversa incompleta.

MAMMANO AND DRAGONI (2011) fizeram três testes distintos de carregamentos cíclicos em fios com efeito memória de forma: tensão constante aplicada no fio, deformação constante aplicada no fio e tensão constante aplicada no fio com uma deformação máxima limitada. Após cada carregamento era feito um aquecimento para recuperação. Os resultados mostraram que colocando um limite, mesmo que pequeno, ao máximo de tensão durante os testes de deformação constante é extremamente benéfico para a vida de fadiga. Concluíram também que para tensões aplicadas abaixo do limite de fadiga, o alongamento do comprimento do fio é pouco significativo (menos do que 1%).

A carga cíclica em SMAs pode ser promovida pela variação de duas variáveis: a temperatura e a carga aplicada. MIYAZAKI *et al.* (1986) investigaram o efeito de ciclos térmicos sobre as temperaturas de transformação em SMAs submetidas a diversos tipos de tratamentos termo-mecânicos. Foi observado que quando o material se encontrava recozido, o aumento do número de ciclos produziu uma variação na temperatura de início da transformação martensítica, elevação na diferença das temperaturas de início e final da transformação martensítica.. Essas alterações diminuíram e tenderam a se estabilizar com o aumento do número de ciclos, como pode ser observado na Fig.II.15. Concluiu-se que o efeito da ciclagem térmica pode ser atribuído ao campo de tensões associados a discordâncias introduzidas no processo de transformações de fase.

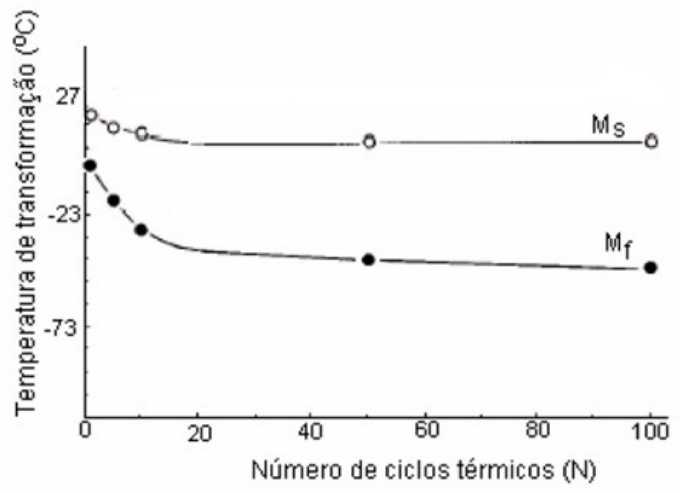
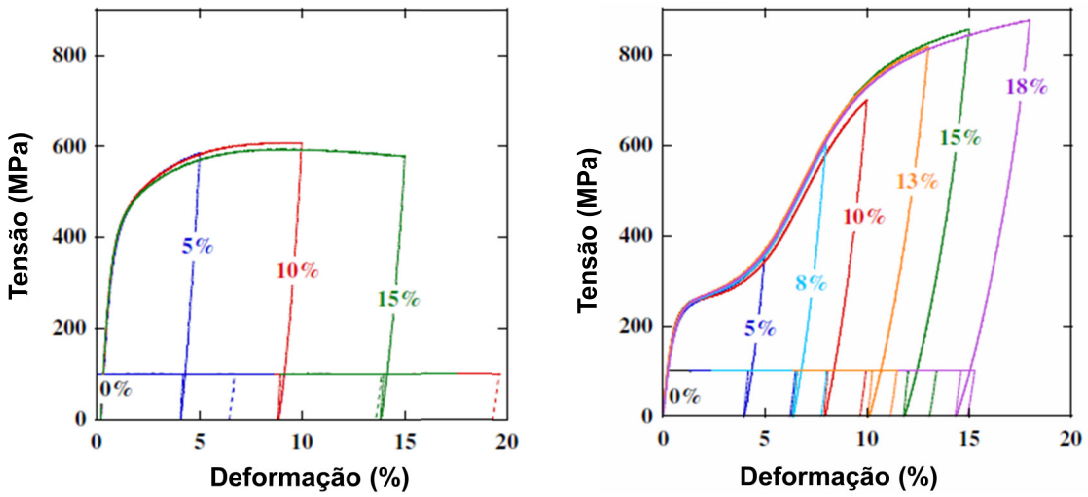


Figura II.15: Curva temperaturas de transformação-número de ciclos térmicos em uma liga de memória de forma recozida a 1000°C por 1 hora, seguido de têmpera em água gelada. (MIYAZAKI *et al. 1986)*

BENAFAN *et al.* (2014) avaliaram os efeitos de várias porcentagens de pré-deformação antes dos testes experimentais em SMAs no estado austenítico com uma temperatura inicial do material de 320 °C, e em fios martensíticos com uma temperatura inicial do material de 30 °C submetido a ciclos térmicos de 30 a 230 °C e a um carregamento mecânico constante de 100 MPa. Os autores concluíram que essa pré-deformação tem pouca influência no desempenho do material na fase austenítica, porém para o material na fase martensítica a 30 °C observam-se mudanças importantes no desempenho do material, como a variação da tensão de transformação de fase do material, conforme pode ser visto na figura II.16.



(a) (b)

Figura II.16: Curva tensão-deformação (a) fio austenítico pré-deformado a temperatura de 320 °C e (b) fio austenítico pré-deformado a temperatura de 30 °C. (BENAFAN *et al.*, 2014)

MIYAZAKI *et al.* (1986a) estudaram os efeitos de ciclos mecânicos em diversas temperaturas em SMAs. Observaram que houve um aumento da tensão crítica com a elevação

da temperatura do ensaio; que com aumento do número de ciclos a deformação residual cresce, de maneira geral, enquanto a tensão crítica e a histerese de deformação ou tensão diminuem; e que esses parâmetros tendem a se estabilizar com um número de ciclos elevado, fato explicado pelo encruamento que se desenvolve em cada ciclo. A Fig. II.17 mostra o efeito de ciclos mecânicos para diferentes temperaturas.

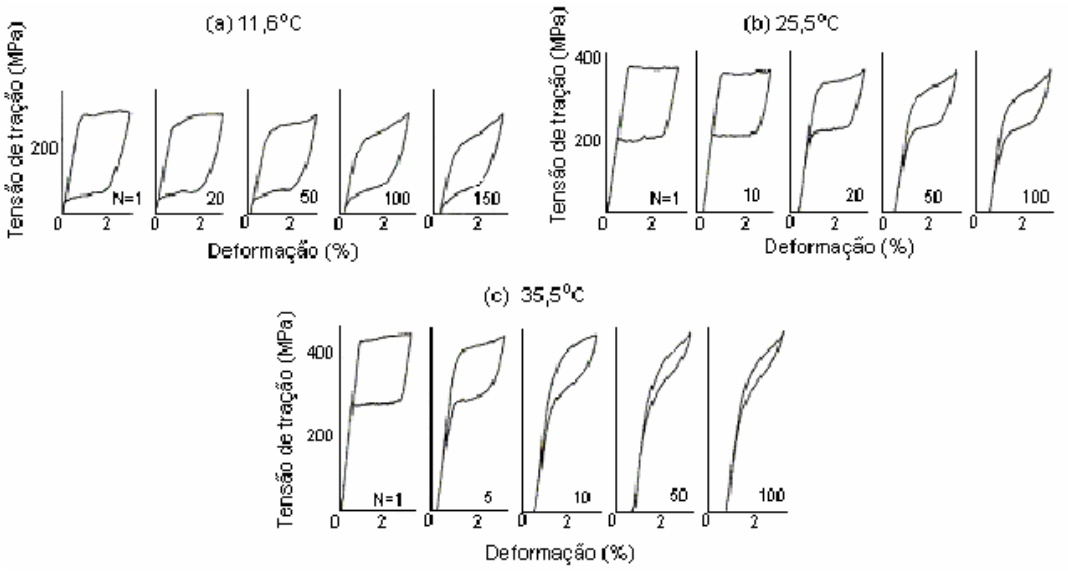


Figura II.17: Efeito de ciclos mecânicos na deformação em ligas de memória de forma sob diferentes temperaturas. (MIYAZAKI *et al.*1986a)

GLOANEC *et al.* (2010) examinaram a iniciação e a propagação de trincas por fadiga em SMAs pseudoelásticas em carregamentos cíclicos. Entre as suas principais conclusões está o fato de que o dano visível, ou seja, a iniciação de trincas e sua propagação, ocorre apenas nos últimos 20% do total de vida fadiga do material.

No trabalho de Young Liu *et al.* (1999) foi constatado que ligas de SMA possuem grande capacidade de amortecimento por causa das reconfigurações microestruturais induzidas por tensão. Essa capacidade aumenta de acordo com a amplitude da tensão. Na deformação cíclica, cerca de 90% do trabalho mecânico é absorvido nos primeiros ciclos. A capacidade de amortecimento tende a estabilizar com ciclos maiores e não sofre influência da taxa de deformação da liga. MORIN *et al.* (2011) examinaram a influência do acoplamento termomecânico em ligas com memória de forma pseudoelásticas sujeitas a ciclos mecânicos com diferentes taxas de carregamento e desenvolveram um modelo para análise. Concluíram que o ciclo para o qual se observa a estabilização é muito influenciado pelo acoplamento termomecânico, uma vez que as amplitudes de deformação que se desenvolvem durante o processo de transformação de fase, bem como a área de histerese, são fortemente afetados pela taxa de carregamento.

SONG *et al.* (2014) concluiu que a plasticidade martensítica pode restringir a transformação martensítica e vice-versa, o que resulta num processo de estabilização da

resposta tensão-deformação cíclica, acompanhada de uma redução da superelasticidade da liga. O grau do efeito de restrição da plasticidade martensítica nas transformações depende da magnitude das tensões de pico aplicadas. Para tensões de pico mais elevadas do que o limite de escoamento dessa fase do material estudado (930 MPa), a superelasticidade da liga desaparece em torno de 20 ciclos. A dissipação de energia por ciclo diminui com o incremento do número de ciclos, especialmente quando a carga é maior que o limite de escoamento da fase martensítica, como visto na Fig.II.18. Em casos com picos de tensão entre 950 e 1200 MPa, a vida funcional em fadiga diminui com o aumento da tensão de pico, tornando-se inferior a 20 ciclos, como mostra a Fig.II.19.

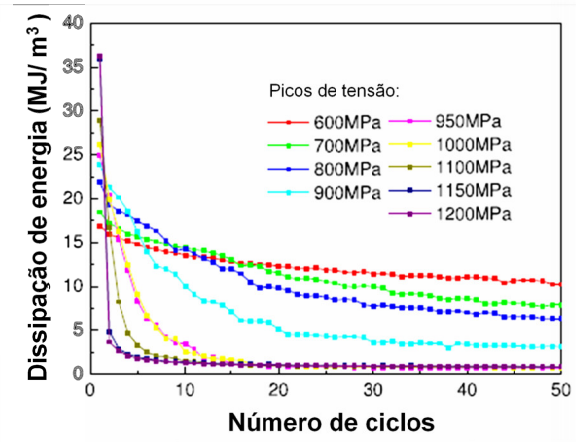


Figura II.18: Dissipação de energia durante os ciclos para diferentes picos de tensão. (SONG *et al.,* 2014)

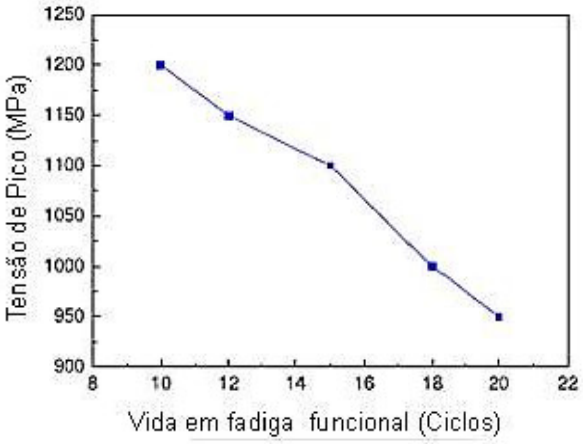


Figura II.19: Vida em fadiga funcional para vários picos de tensão. (SONG *et al.,* 2014)

É importante ressaltar que, em diversas situações, o material sofre primeiro fadiga funcional, com a diminuição das propriedades funcionais, seguido por fadiga estrutural, quando pode ocorrer a falha completa.

Capítulo III – Procedimento Experimental

Este capítulo apresenta o procedimento experimental desenvolvido nesta dissertação. As características do fio SMA utilizado nos ensaios e o dispositivo experimental inspirado no trabalho de BERTACCHINI *et al.* (2003) são descritos. Este dispositivo foi otimizado para melhor desempenho nos ensaios e teve a parte instrumental reformulada para os ensaios desenvolvidos. Finalmente é descrita a metodologia adotada nos ensaios dos fios com memória de forma a fim de caracterizar seu comportamento em fadiga.

III.1 – Características do Fio SMA

Ensaios de fadiga funcional foram desenvolvidos utilizando um fio martensítico de SMA de uma liga de Níquel/Titânio com um diâmetro de 0,380 mm, fabricado pela empresa Dynalloy (2015). A Tabela III.1 mostra as principais características do fio SMA utilizado no experimento, as suas propriedades termomecânicas e elétricas, além de faixas de operação recomendadas.

Tabela III.1: Características do fio de memória de forma. (Dynalloy, 2015)

Diâmetro do fio (mm)	0,38
Massa específica (g/cm^3)	6,45
Corrente recomendada (A)	2,25
Resistência elétrica (Ω/m)	8,3
Calor específico (cal/g°C)	0,2
Temperatura de fusão (°C)	1.300
Calor latente de transformação de fase (cal/g)	5,78
Condutividade térmica (W/cm°C)	0,18
Peso recomendado (g)	2.000
Peso para def. recomendado (g)	802
Tensão máxima (MPa)	172
Tensão recomendada (MPa)	70
Coeficiente de Poisson	0,33
Taxa de deformação recomendada (%)	4 a 5
Taxa de deformação máxima (%)	8
Tempo de resfriamento fio “LT” 70° (s)	10,5
Tempo de resfriamento fio “HT” 90° (s)	8,8

Nas ligas NiTi, as transformação com memória de forma tem um limite máximo de deformação recuperável de aproximadamente 8%. Esta é a quantidade de deformação que pode ocorrer na fase de baixa temperatura pela troca de variante martensitica, a qual produz o efeito de memória de forma.

Adicionalmente às informações fornecidas pelo fabricante, foram desenvolvidos ensaios no Centro de Mecânica Não Linear (MECANON) – COPPE/UFRJ utilizando um calorímetro de varredura (DSC, do inglês *Differential Scanning Calorimeter*) para identificar as temperaturas de transformação de fase M_s, M_f, A_s e A_f.

O DSC utiliza uma técnica de análise térmica que registra o fluxo de temperatura associado a mudanças físicas em uma amostra de material em função da temperatura. Estas medidas fornecem dados qualitativos e quantitativos em processos endotérmicos e exotérmicos, permitindo obter informações referentes a alterações de propriedades físicas como a transformação da fase austenita para martensita e a transformação reversa, as quais estão ligadas a processos exotérmicos e endotérmicos.

A Fig.III.1 apresenta o resultado do DSC para o fio utilizado nos experimentos. A curva superior é referente ao aquecimento associado ao processo de transformação da fase martensítica para a fase austenítica.

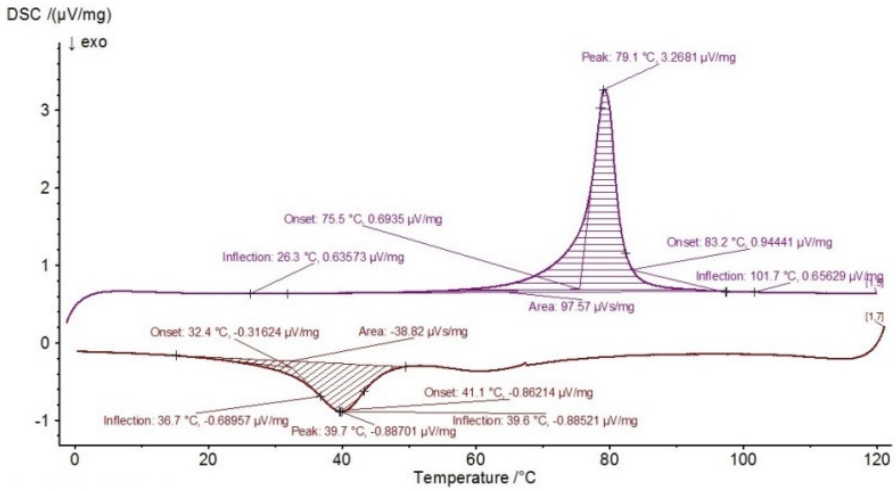


Figura III.1: Ensaio com calorímetro de varredura. (DSC).

A curva superior de aquecimento (M→A) mostra que a transformação inicia a 52 °C e termina a 90°C e é endotérmica. A curva inferior representa o resfriamento associado ao processo de transformação da fase austenítica para a fase martensítica. A curva inferior relacionada ao resfriamento (A→M) mostra que a transformação tem início a 49 °C, finaliza a 18 °C e é exotérmica. Pela figura III.1 identificam-se os valores de M_s = 18 °C, M_f = 49 °C , A_s = 52 °C e A_f = 90 °C.

III.2 – Dispositivo Experimental

Um dispositivo experimental inspirado no trabalho de BERTACCHINI *et al.* (2003) foi desenvolvido para analisar o comportamento em fadiga de fios SMAs submetidos a ciclos termomecânicos. O dispositivo é composto por uma estrutura de duralumínio, onde um peso morto que fornece uma carga mecânica constante ao fio de SMA e um conjunto de polias que fazem a conexão do peso morto com o fio de SMA por meio de um fio multifilemento de 0,5 mm de diâmetro, conforme ilustrado na Fig.III.2. Suas dimensões nominais são: 700 mm de comprimento, 102 mm de altura e 500 mm de largura. Embora neste trabalho este dispositivo só trabalhe com apenas um fio de SMA, o dispositivo permite que sejam efetuados ensaios de fadiga simultaneamente em até cinco fios de SMA em paralelo. O dispositivo também possui uma adaptação para a imersão dos fios de SMA em um tanque de policarbonato com fluido refrigerante para permitir um resfriamento por convecção mais rápido. A disposição do sistema de carregamento mecânico envolve um conjunto de polias para a condução do fio multifilamento. Um transdutor de deslocamento está conectado ao fio multifilamento. Nos ensaios deste trabalho não foi utilizado fluido refrigerante e o transdutor foi reposicionado, estando numa configuração alinhado com o fio multifilamento. O fio de SMA é aquecido através da aplicação de corrente elétrica gerada por uma fonte de corrente programável Icel PS-7000. O deslocamento do fio de SMA é monitorado por um sistema de aquisição de dados HBM Spider 8, conectado a um computador. Os dados são aquisitados através do software HBM Catman. O peso morto está ligado ao fio de SMA através de sistema de polias por onde passa um fio multifilamento. O fio multifilamento está ligado a uma extremidade de um transdutor de deslocamento. A outra extremidade do transdutor de deslocamento está ligada à extremidade do fio SMA com o auxílio de terminais pré-isolados. Por fim, a outra extremidade do fio de SMA é ligada à estrutura também com o auxílio de terminais pré-isolados, como mostra a Fig.III.3. As Figs. III.4 e III.5 mostram o dispositivo desenvolvido utilizado nos testes experimentais.

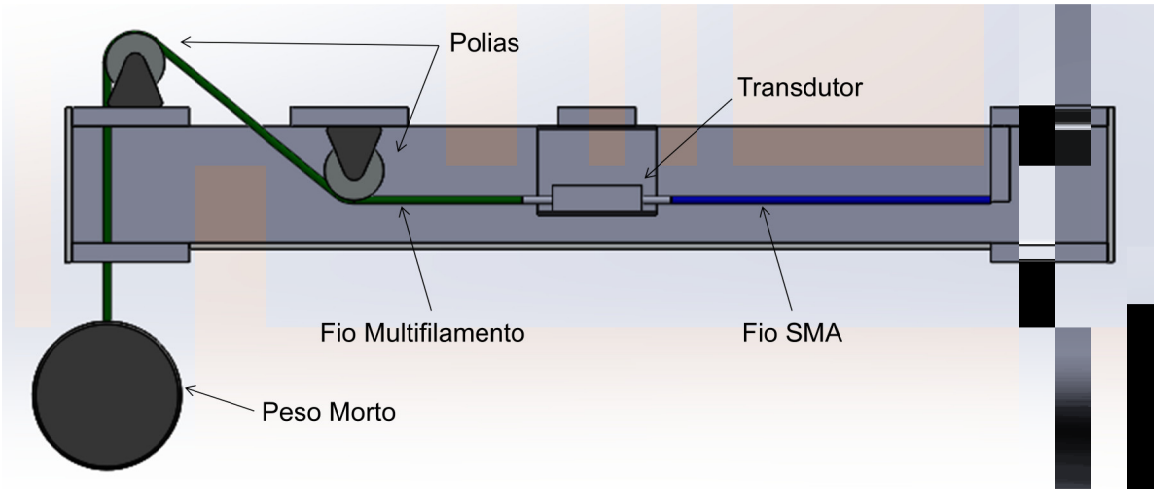
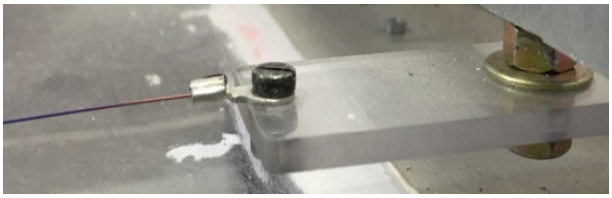


Figura III.2: Desenho Esquemático do dispositivo.



(*a*)



(*b*)

Figura III.3: Detalhe da fixação do fio: (*a*) ao transdutor de deslocamento e (*b*) à estrutura.

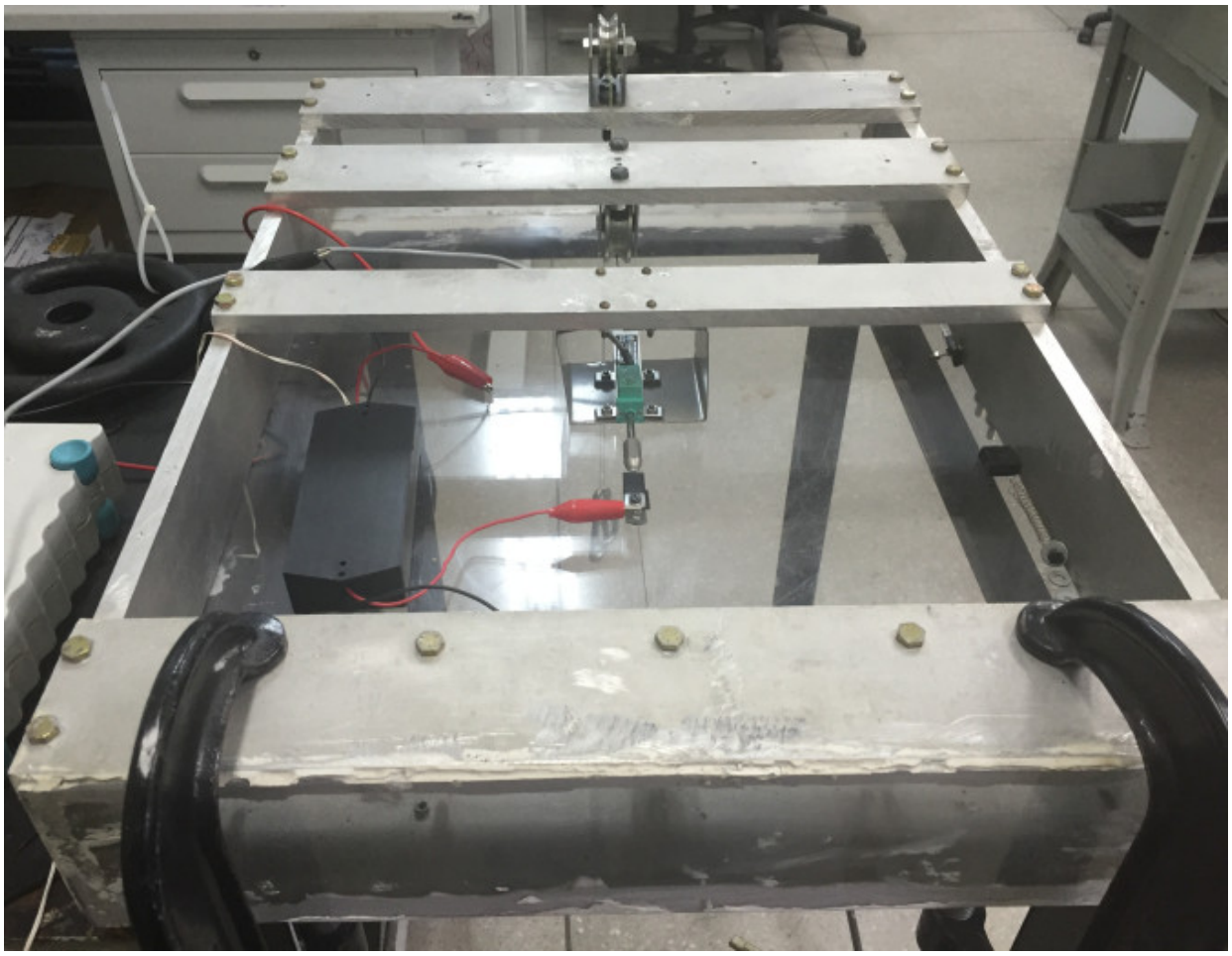


Figura III.4: : Vista em perspectiva do dispositivo proposto para análise de fadiga.

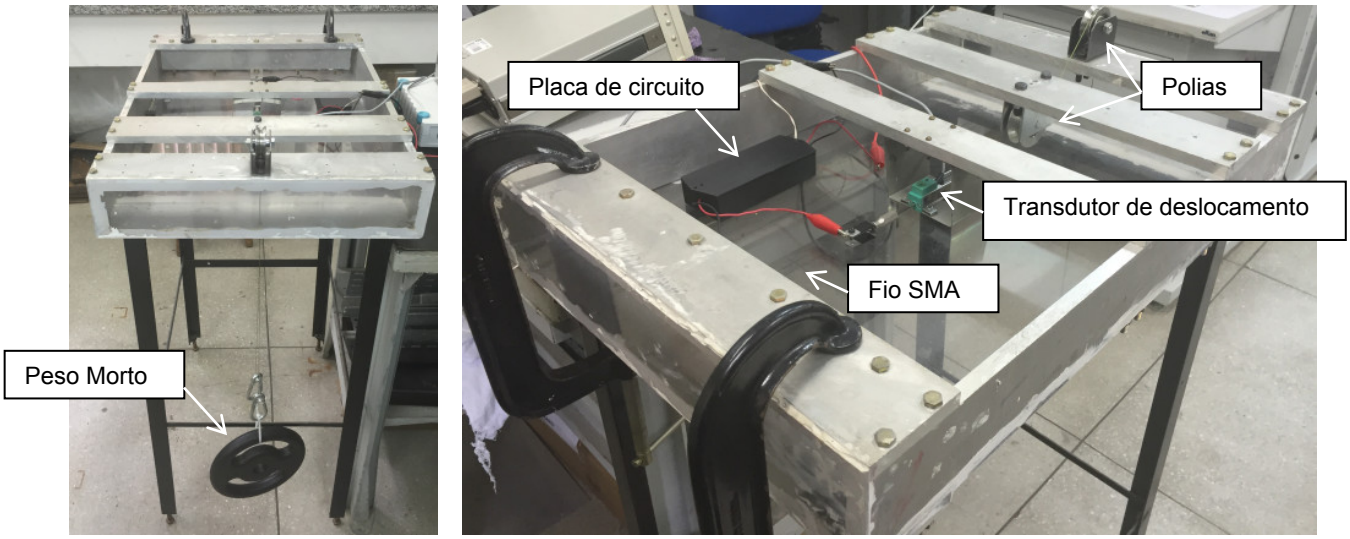


Figura III.5: Dispositivo proposto para análise de fadiga.

III.3 – Metodologia dos testes

Os fios SMA foram submetidos a um carregamento termomecânico cíclico, composto pela combinação de uma variação térmica cíclica promovida pela aplicação de uma corrente elétrica com a forma de uma onda quadrada e a uma carga mecânica constante aplicada usando um sistema de peso morto. O carregamento termomecânico aplicado consiste numa etapa inicial associada à aplicação do carregamento mecânico constante que é mantido durante todo o ensaio, seguida de uma etapa cíclica composta de duas fases: 1) fase de aquecimento; e 2) fase de resfriamento.

Inicialmente, o fio de SMA em um estado livre de tensão com 100% de martensita maclada é posicionado no dispositivo sem aplicação de peso morto. A fase de carregamento mecânico é obtida através das aplicações do peso morto que promove transformação de fase induzida pela tensão no fio de SMA. Dependendo do valor de peso morto, pode ocorrer uma transformação total ou parcial de fase para martensita não maclada. A oscilação térmica é obtida através da aplicação ao fio de SMA de uma corrente elétrica cíclica de onda quadrada gerada pela fonte de corrente programável. A fase de aquecimento consiste em aquecer o fio de SMA por efeito Joule, submetendo-o a uma corrente elétrica que promove a transformação da energia elétrica em energia térmica. Quando aquecido, o fio contrai-se e recupera as deformações geradas pela transformação de fase devido à transformação reversa para austenita. Por último, na fase de resfriamento, o programa de controle da fonte desliga a corrente elétrica e a fase austenita presente no fio se transforma em martensita não maclada induzida pelo peso morto. Após uma quantidade de ciclos pré-determinada, o programa da fonte é desligado. Um novo fio de SMA é usado para cada ensaio desenvolvido.

Para estudar o efeito da carga mecânica constante, os testes foram desenvolvidos considerando vários carregamentos: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90 N. O ciclo de

aquecimento-resfriamento, ou seja, o ciclo associado à deformação do fio SMA, foi feito aplicando-se uma solicitação de corrente elétrica cíclica do tipo *on-off* (onda quadrada) utilizando a fonte de corrente programável Icel PS-7000, a qual aplica uma etapa com um valor de corrente pré-determinado seguido de uma etapa com corrente nula. Os dados obtidos do transdutor de deslocamento e da variação de tensão no fio de SMA referente à corrente aplicada pela fonte de corrente programável são adquiridos pelo sistema de aquisição de dados HBM Spider 8 com a ajuda do programa de aquisição de dados HBM Catman, como mostrado na Fig.III.6. O transdutor de deslocamento potenciométrico PY-2 Gefran com uma faixa de operação máxima de 50 mm é usado para coletar dados de deslocamento do sistema. Para evitar danos no sistema de aquisição de dados, o fio de SMA foi ligado em paralelo a um circuito de resistências, conforme mostrado na Fig.III.7, com os objetivos de: 1) prover um ramo do circuito seguro (com pequena corrente) para que o sistema de aquisição de dados pudesse monitorar indiretamente, através da queda de tensão em um resistor de grande valor, a corrente que passa pelo fio da SMA e 2) outro ramo com corrente alta para o fio de SMA propriamente dito com um acréscimo de resistências de grande valor de potência postos em série com o fio de SMA de forma a aumentar a resistência equivalente percebida pela fonte de corrente programada. A Fig.III.8 ilustra a esquematização do circuito.

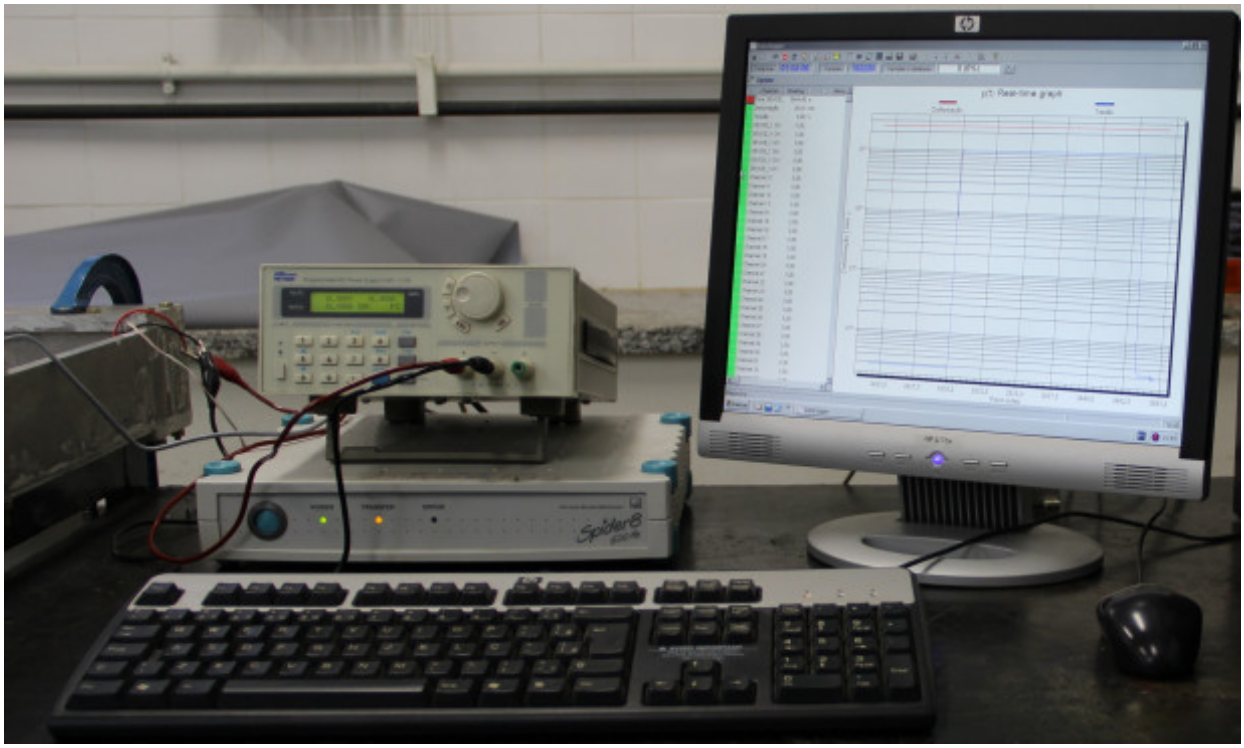
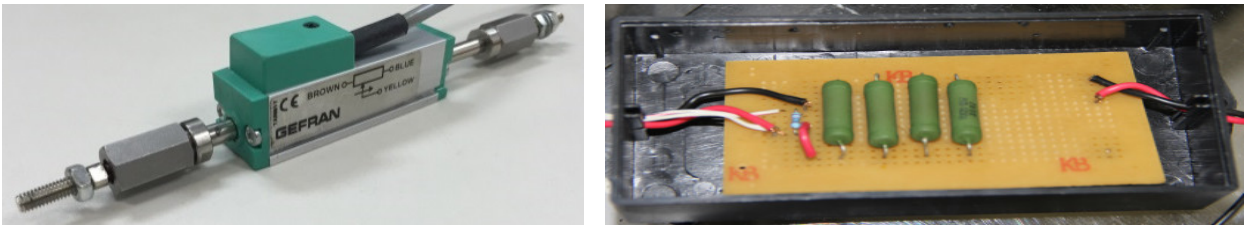


Figura III.6: Sistema de aquisição de dados HBM Spider 8 e o programa de aquisição de dados HBM Catman durante um teste.



(*a*) (*b*)

Figura III.7:Transdutor de deslocamento (*a*) e placa de circuito impresso (*b*).

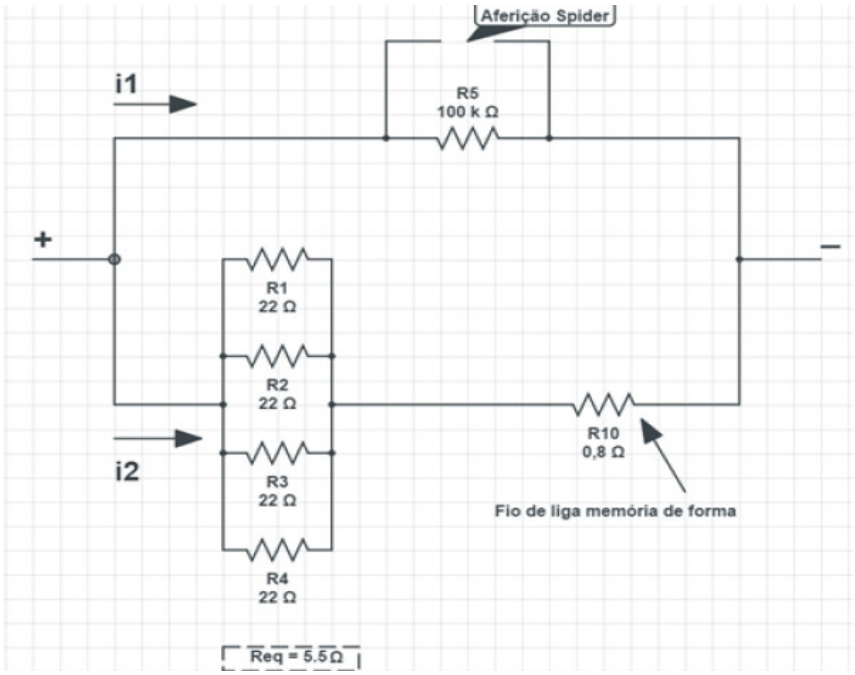
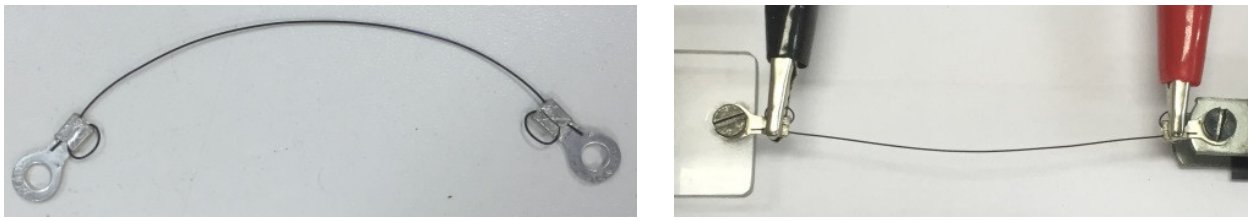


Figura III.8: Esquema elétrico do circuito utilizado.

Um procedimento foi usado para garantir que o fio SMA estivesse 100% no estado martensítico maclado à temperatura ambiente antes de cada ensaio. Uma corrente elétrica de aproximadamente 1,5 A foi aplicada ao fio de SMA para remover deformação residual associado à presença de martensita não maclada promovida por qualquer carga antes. Neste procedimento observou-se que após o resfriamento do fio para a temperatura ambiente, este apresenta-se numa configuração curvada. Isso acontece devido à sua condição de conformação mecânica ocasionada pelo seu armazenamento, fazendo com que o fio tenha dois comprimentos iniciais: um quando está aquecido (fase austenítica) e outro a temperatura ambiente (fase martensítica). O comprimento inicial do fio à temperatura ambiente é maior do que o comprimento inicial dele quando aquecido. A Fig.III.9 mostra o fio com o curvamento após ter sido preparado para o experimento e fixado no dispositivo. A Fig.III.10 mostra o rolo de armazenamento do fio que possui um raio de 72 mm.



(a) (b)

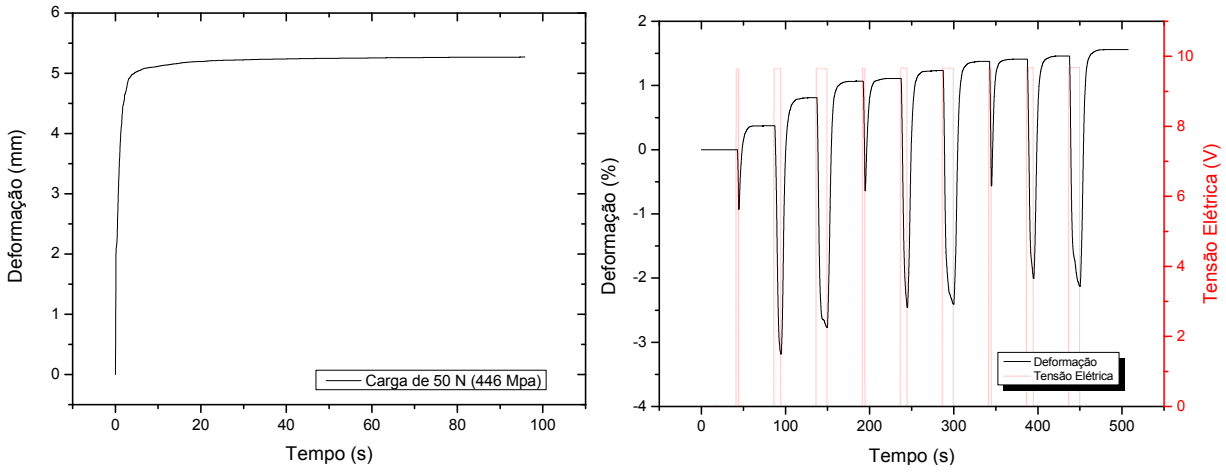
Figura III.9: Fio de SMA: (a) com o curvamento ocasionado pela conformação de armazenamento e (b) fixado ao dispositivo.



Figura III.10: Rolo de armazenamento do fio.

Como as temperaturas de transformação de fase são dependentes dos níveis de tensão, um estudo foi desenvolvido para avaliar os tempos de aquecimento e resfriamento necessários para completar as transformações de fase. A Fig.III.11 mostra os dados associados ao tempo de aquecimento e resfriamento necessário com a carga de 50 N, como exemplo. Os testes desenvolvidos consistem no registro da evolução do deslocamento do fio durante a fase de resfriamento e no registro da evolução da recuperação do fio durante a fase de aquecimento. Nos testes de aquecimento foram avaliados três tempos diferentes: 5, 10 e 15 s e foram feitos três ciclos de cada tempo. Os resultados mostram que os valores de carga mais elevados estão associados aos maiores tempos de aquecimento necessários.

Para o experimento foi analisado o tempo necessário que a fonte deve estar desligada para que ocorra a total transformação total de martensita não-maclada para maclada. Após a análise do tempo de desligamento necessário, foi desenvolvido outro experimento com o tempo ligado de 5, 10 e 15 s para os pesos até 60 N e de 10 e 25 s para os pesos de 70, 80 e 90 N. Nestes três últimos não foi analisado o tempo de 5 segundos, por ser este um tempo muito curto para a recuperação da deformação causada pelo peso morto.



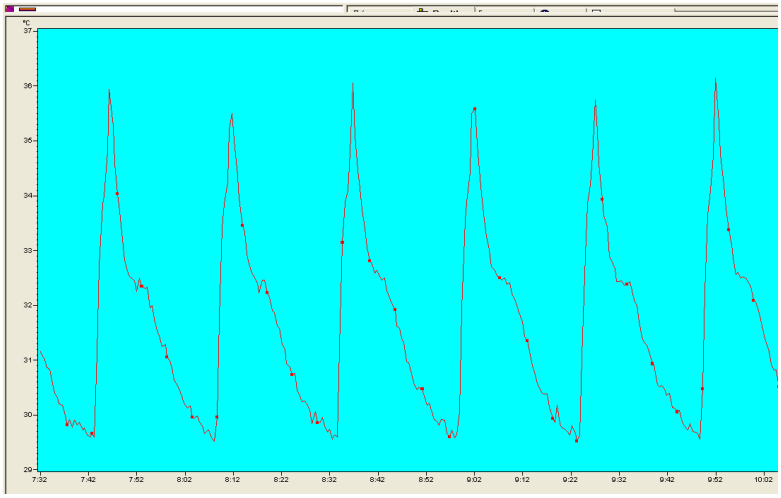
(a) (b)

Figura III.11: Evolução do deslocamento:(a) fase de resfriamento e (b) aquecimento da carga de 50 N.

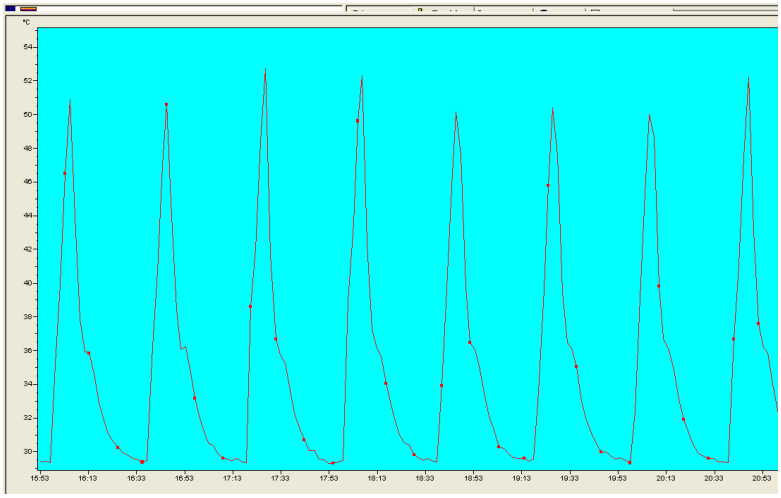
Foi desenvolvido também um estudo do comportamento térmico do material utilizando a câmera térmica infravermelha A325sc fabricada pela empresa FLIR, mostrada na Fig.III.12. A Fig.III.13 apresenta o ciclo térmico em decorrência do tempo utilizado durante três testes: 10 N, 30 N e 60 N. A Fig.III.14 mostra o comportamento do fio de SMA e as temperaturas nas fases de aquecimento e resfriamento do ciclo de deformação do fio. Os valores das temperaturas listadas devem ser vistos apenas como comparativos, já que para que os seus valores absolutos pudessem ser considerados seria necessário desenvover um estudo sobre a emissividade do fio de NiTi e os efeitos da geometria circular da superfície analisada pela camera infravermelha. Esse ciclo de deformação consiste em uma etapa com a fonte ligada, onde a deformação residual induzida pelo peso morto é recuperada quando o fio SMA alcança a temperatura de transformação de fase austenítica se aproximando do seu comprimento inicial, e uma etapa com a fonte desligada, em que ocorre um resfriamento do fio pelo ar havendo transformação reversa de fase austenítica para martensítica. Pode-se observar que o fio apresenta uma distribuição de temperatura homogênea.



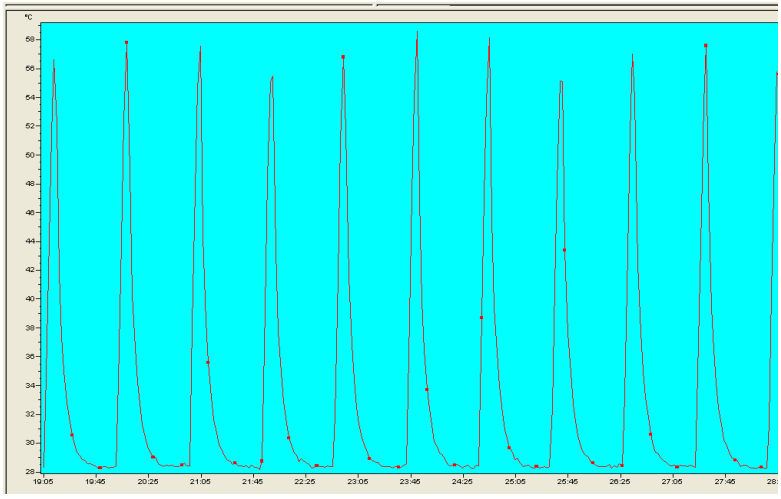
Figura III.12: Câmera térmica A325sc.



(a)

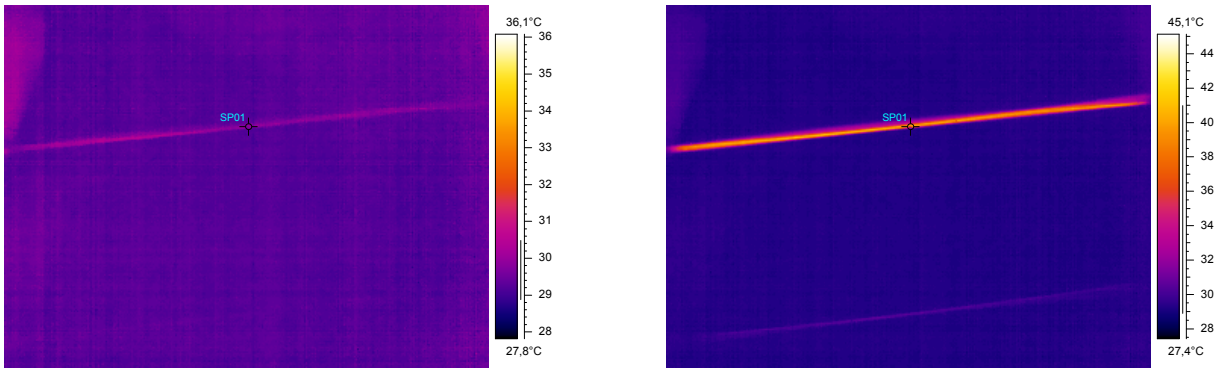


(b)

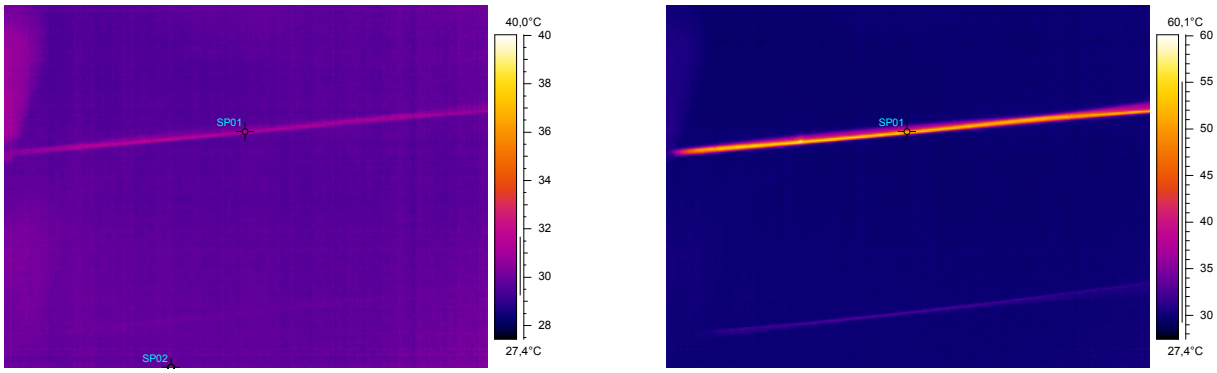


(c)

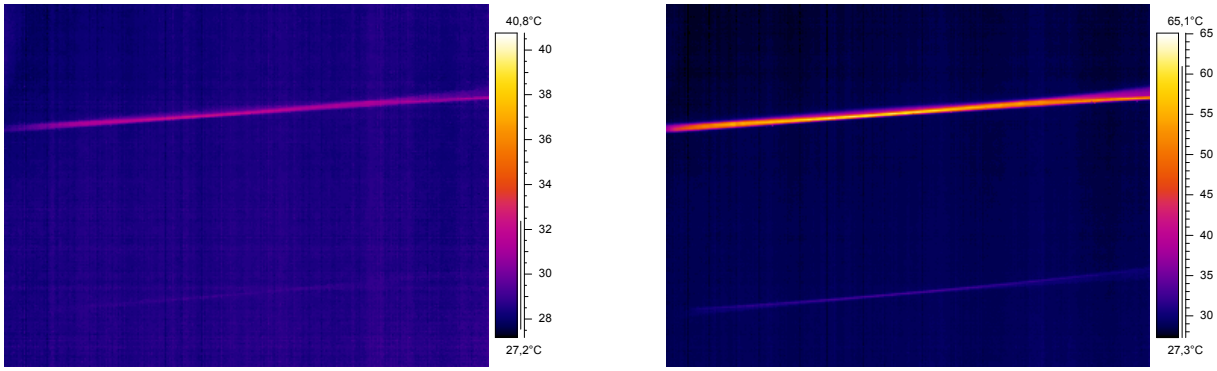
Figura III.13: Evolução da temperatura para 3 testes: (a) 10 N, (b) 30 N e (c) 60 N.



(a)



(b)

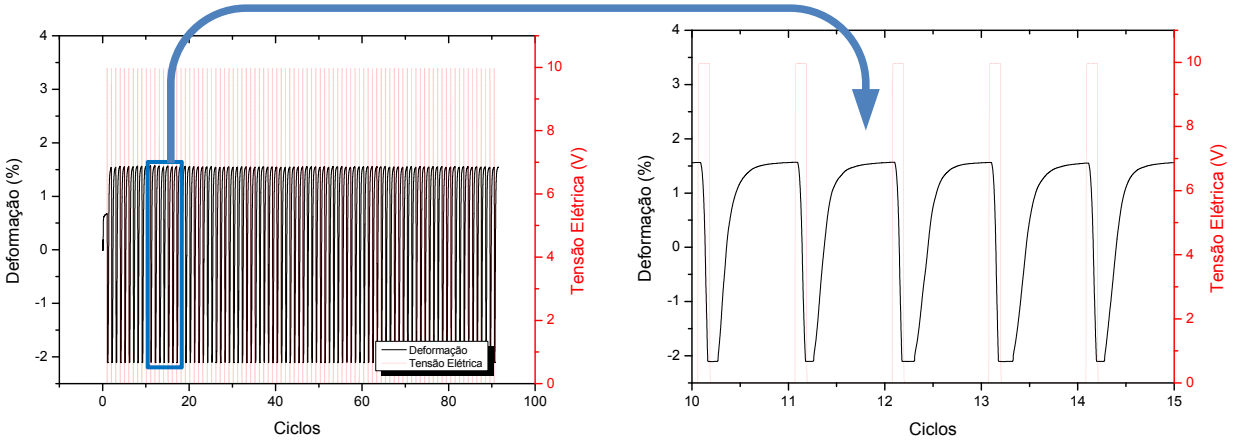


(c)

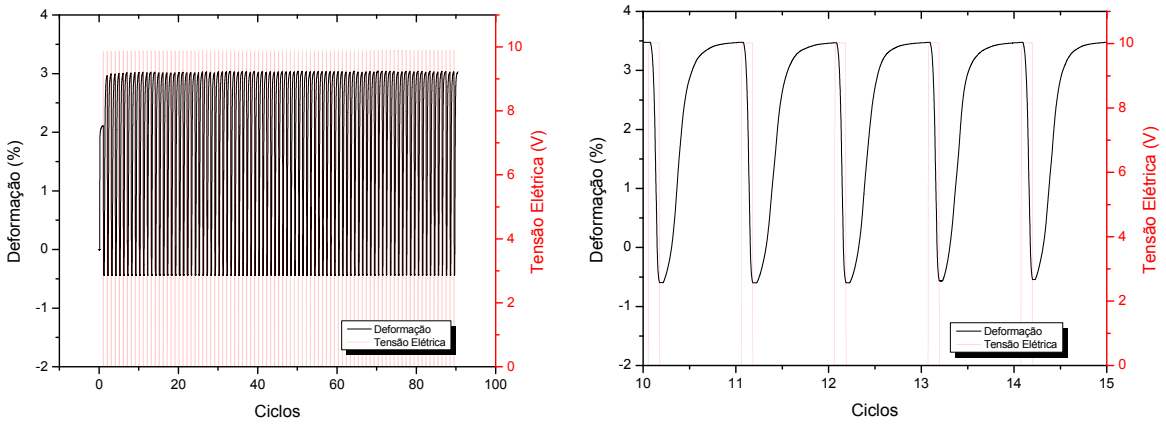
Figura III.14: Temperaturas do fio no ciclo nos testes: (a) 10 N, (b) 30 N e (c) 60 N. A coluna da esquerda mostra o comportamento do fio na fase de aquecimento e a coluna da direita o comportamento do fio na fase resfriamento durante o ciclo de deformação do fio.

Capítulo IV – Resultados e Discussões

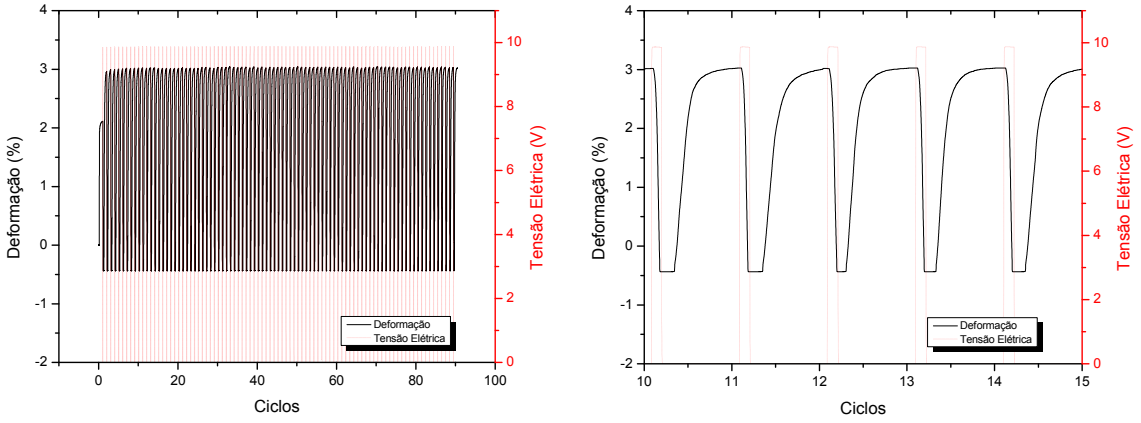
Esta seção apresenta os resultados dos testes desenvolvidos para identificar a fadiga funcional de fios de NiTi SMA de 0,380 mm. A análise de fadiga foi baseada em testes com condições distintas de carregamentos. Nesse experimento a carga mecânica aplicada foi constante e a temperatura varia de uma forma cíclica. Os ensaios envolveram a aplicação de 90 ciclos de carregamento térmico, sendo o ensaio interrompido caso ocorresse a ruptura do fio. A tensão mecânica e a temperatura são os dois parâmetros essenciais associados à fração volumétrica de fase de martensita transformada em austenita durante os testes. As Figs. de IV.1 a IV.9 mostram a evolução da deformação do fio (linha preta) e a variação de tensão elétrica (linha vermelha) dos testes considerando a aplicação de carregamentos mecânicos constantes de 10 a 90N. As deformações foram calculadas como sendo a razão entre o deslocamento obtido pelo transdutor de deslocamento e o comprimento inicial do fio. Após o posicionamento do fio de SMA no sistema de ensaios, a saída do transdutor de deslocamento foi zerada. Desta forma, o transdutor de deslocamento apresentou uma leitura nula antes do início do ensaio. Para cada figura, o teste completo é mostrado na coluna esquerda e um detalhe da região do início do teste (11º ao 15º ciclo) é mostrado na coluna direita.



(a)

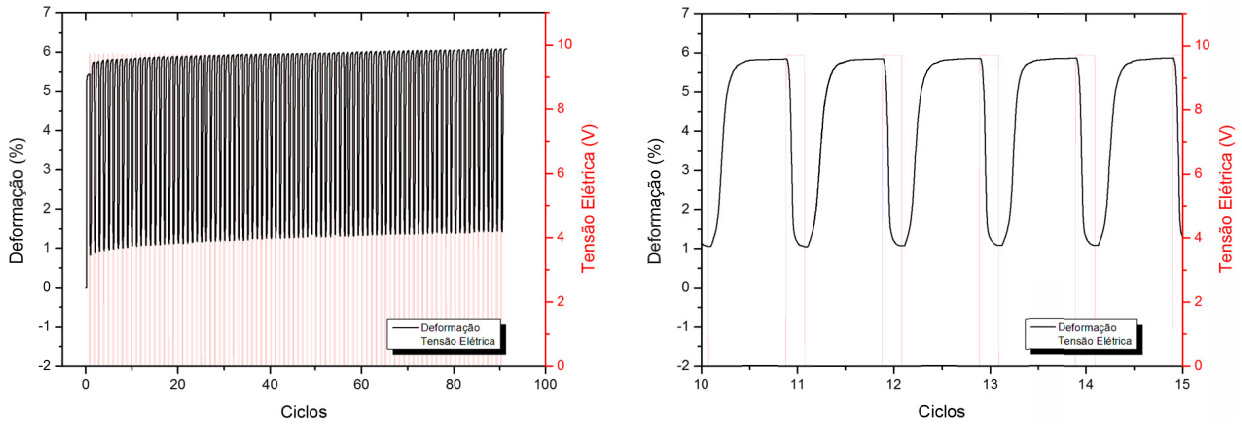


(b)

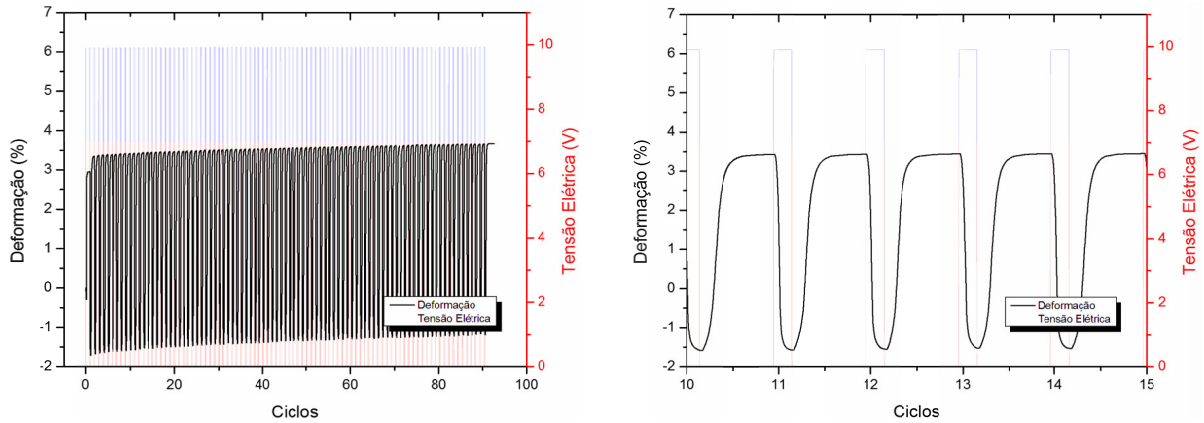


(c)

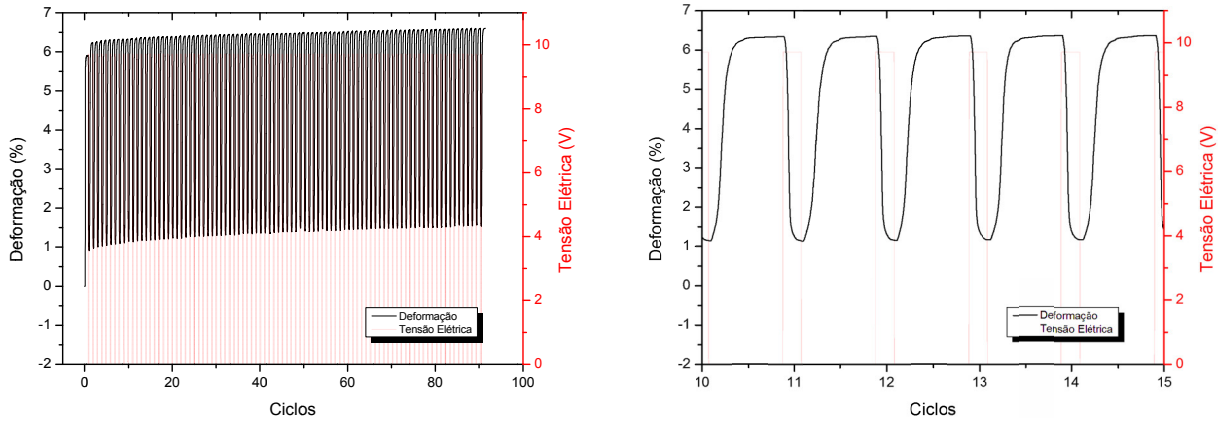
Figura IV.1: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 10 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

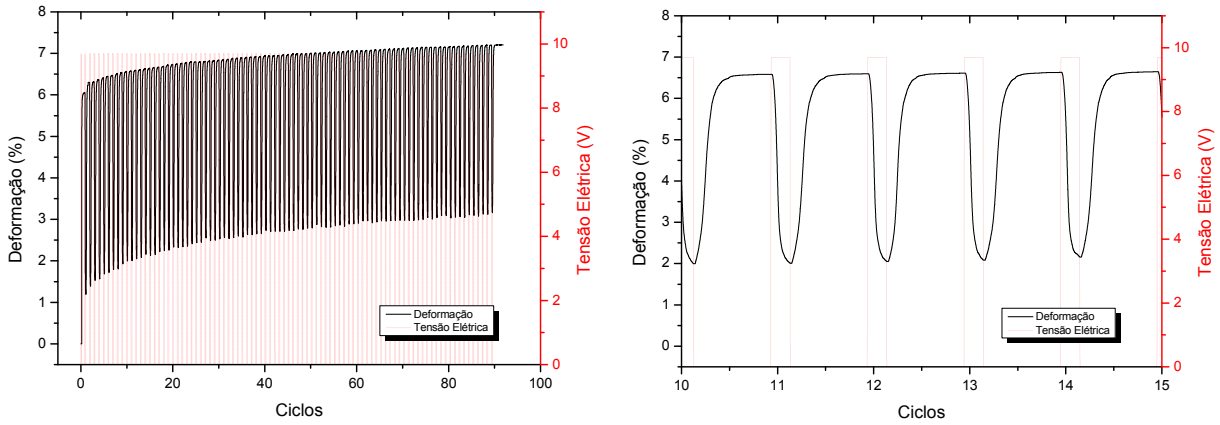


(b)

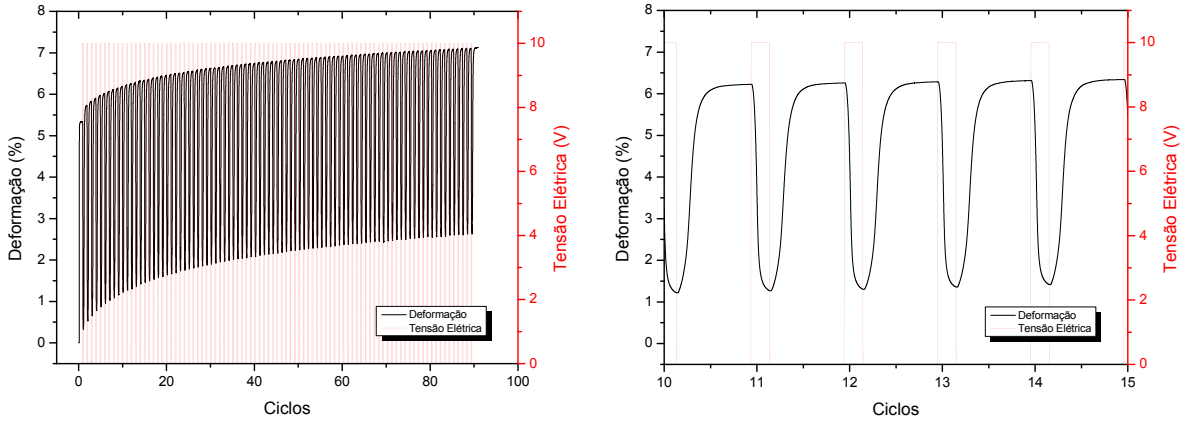


(c)

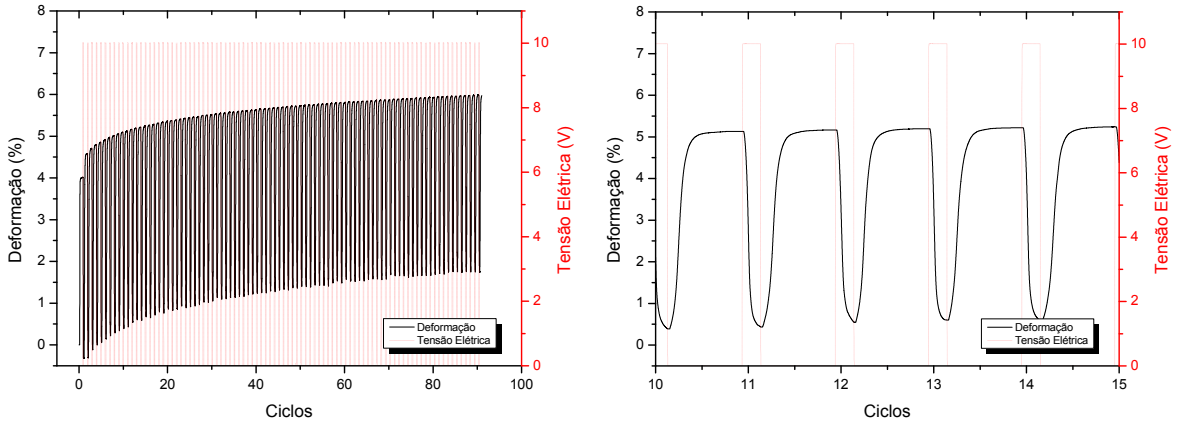
Figura IV.2: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 20 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

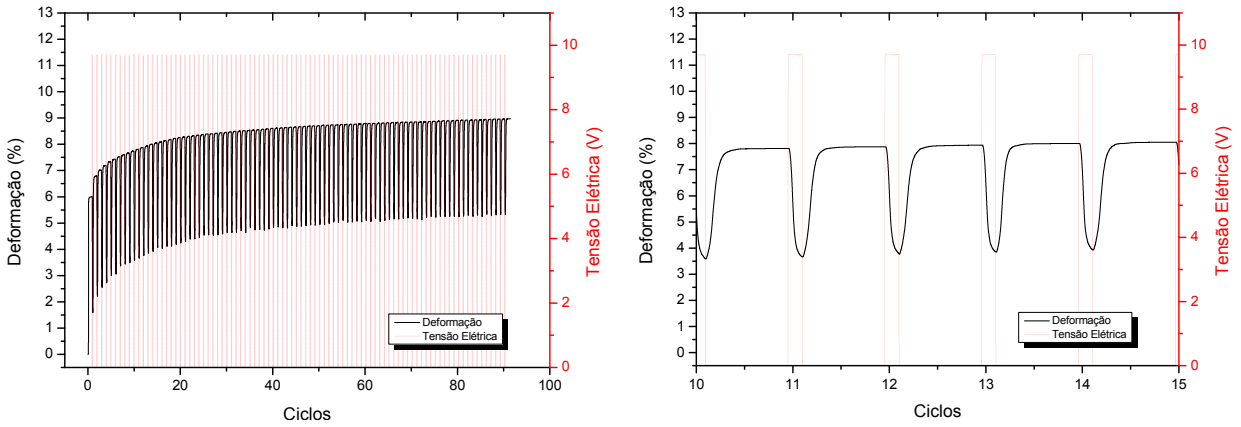


(b)

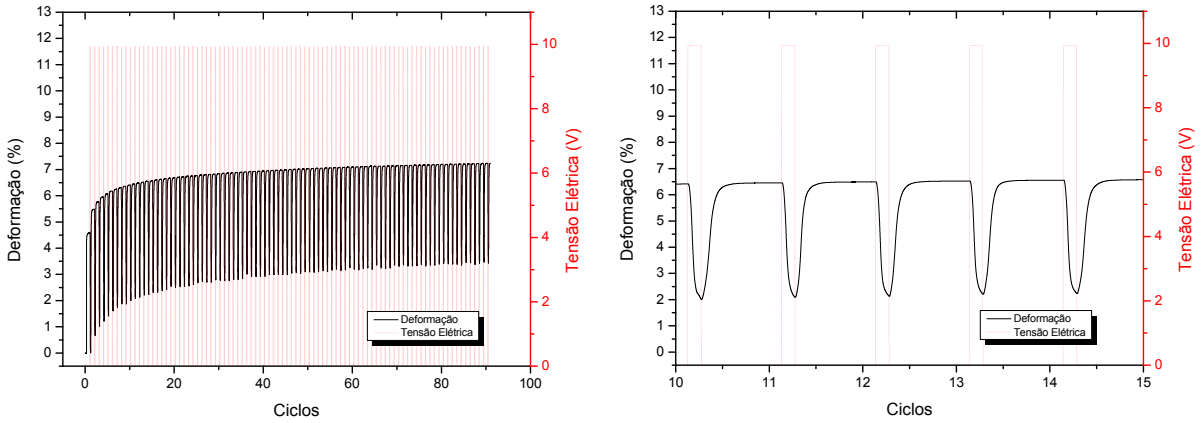


(c)

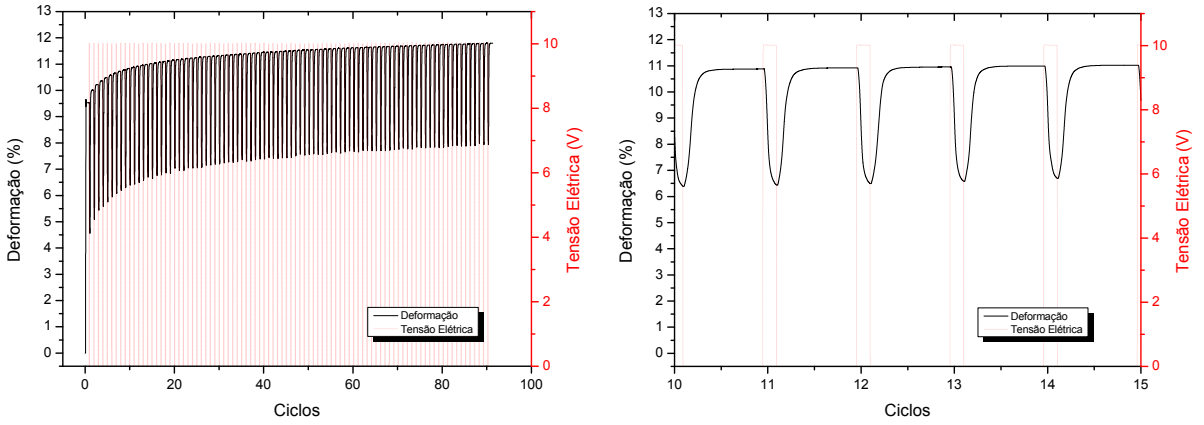
Figura IV.3: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 30 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

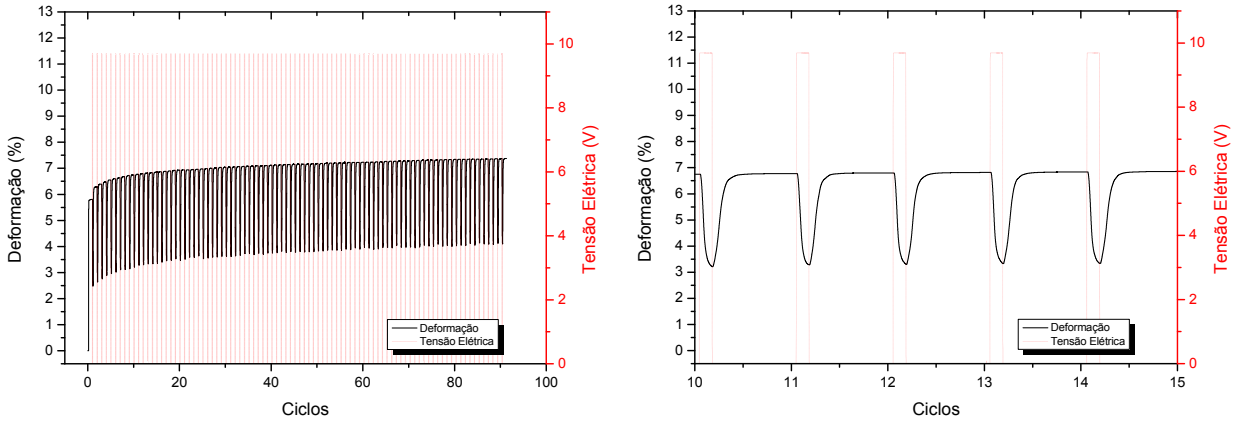


(b)

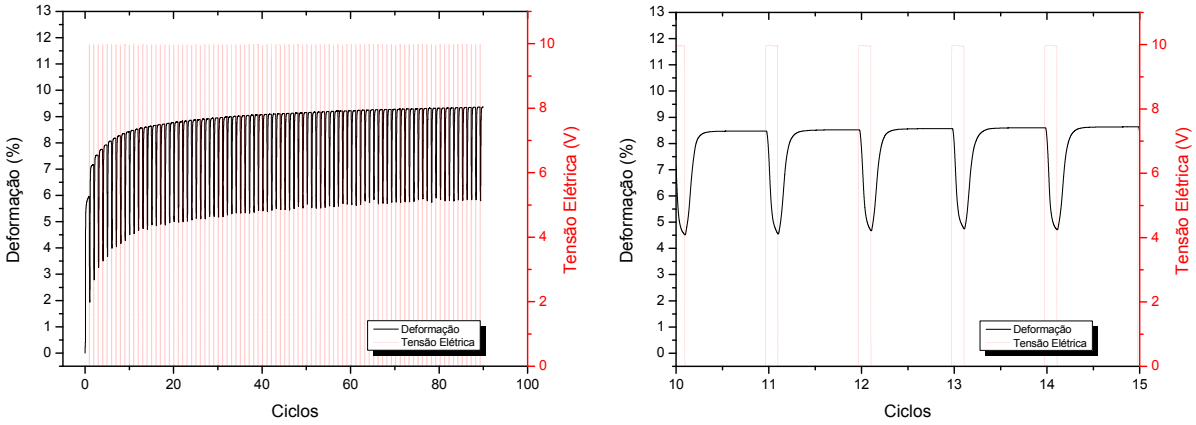


(c)

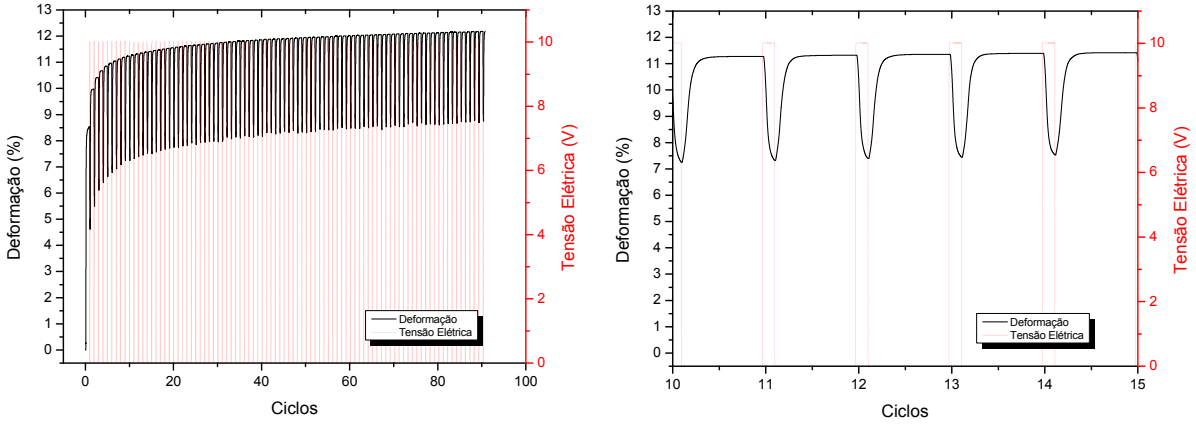
Figura IV.4: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 40 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

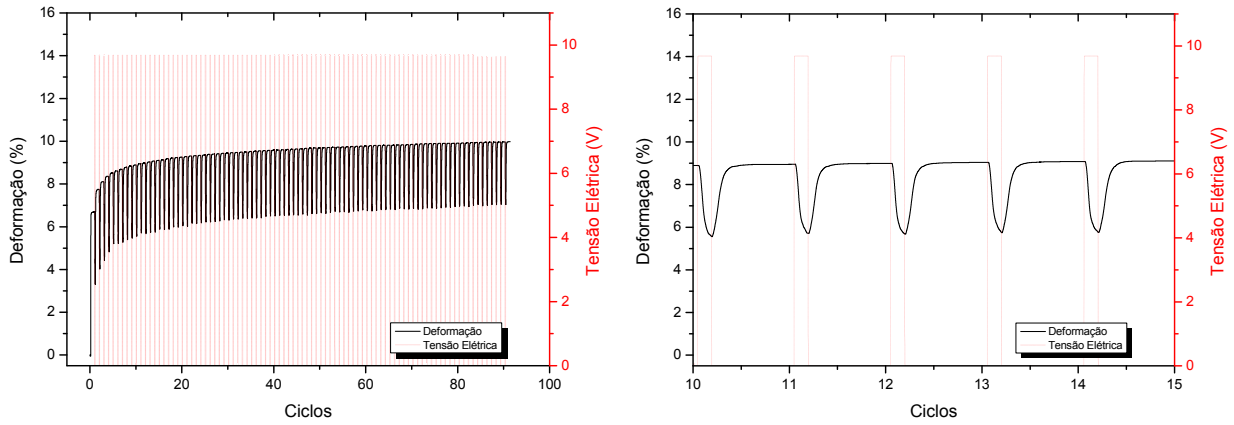


(b)

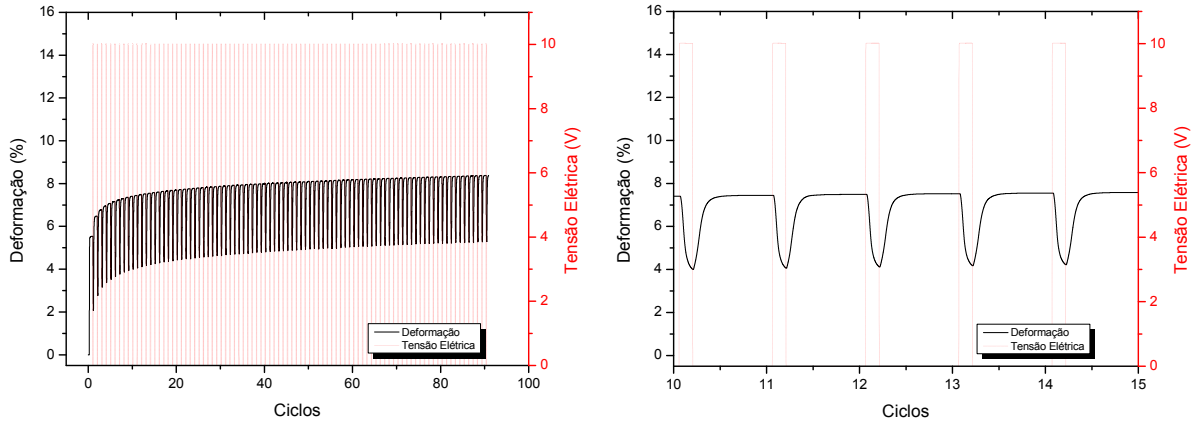


(c)

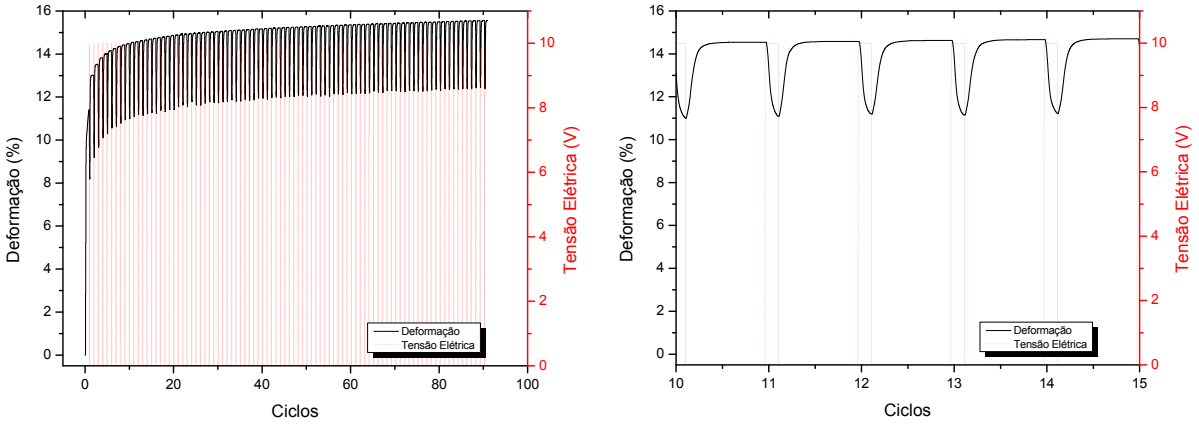
Figura IV.5: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 50 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

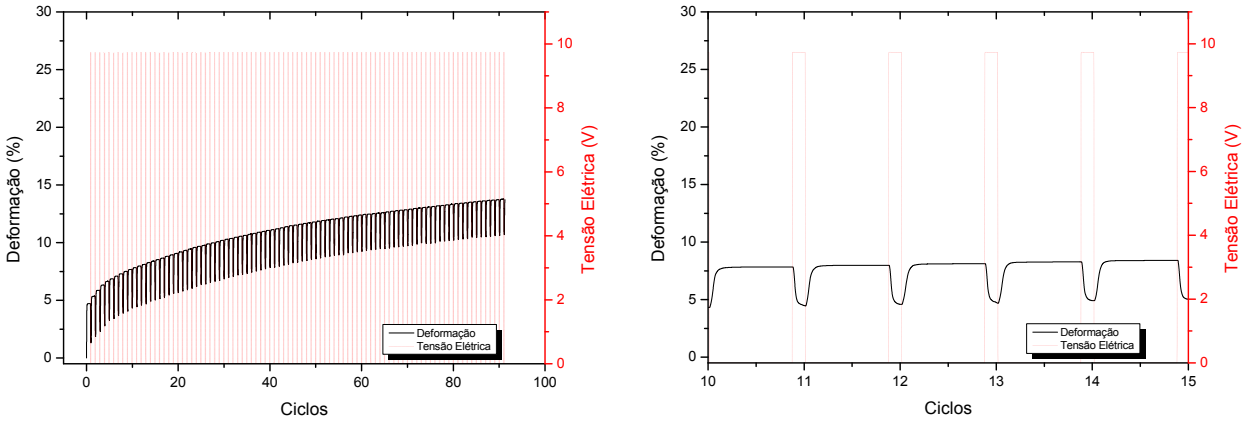


(b)

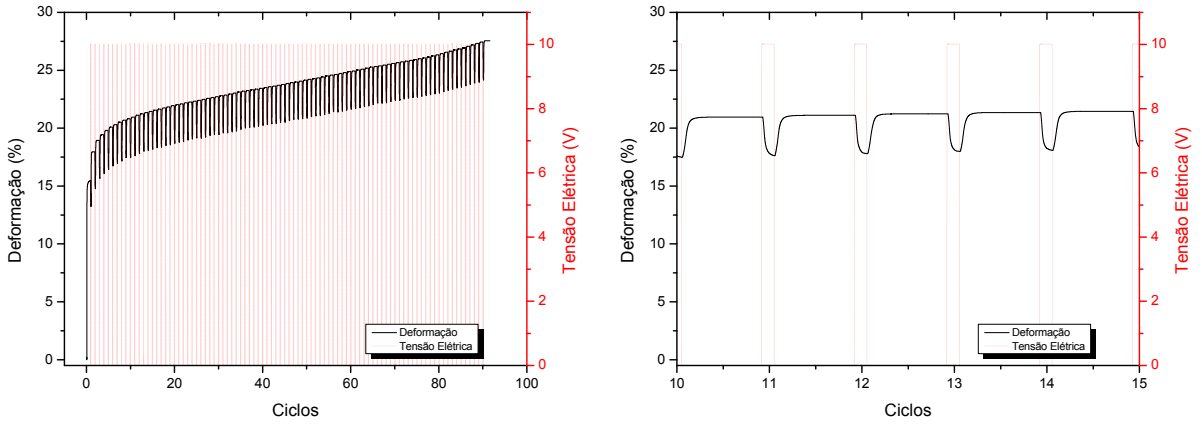


(c)

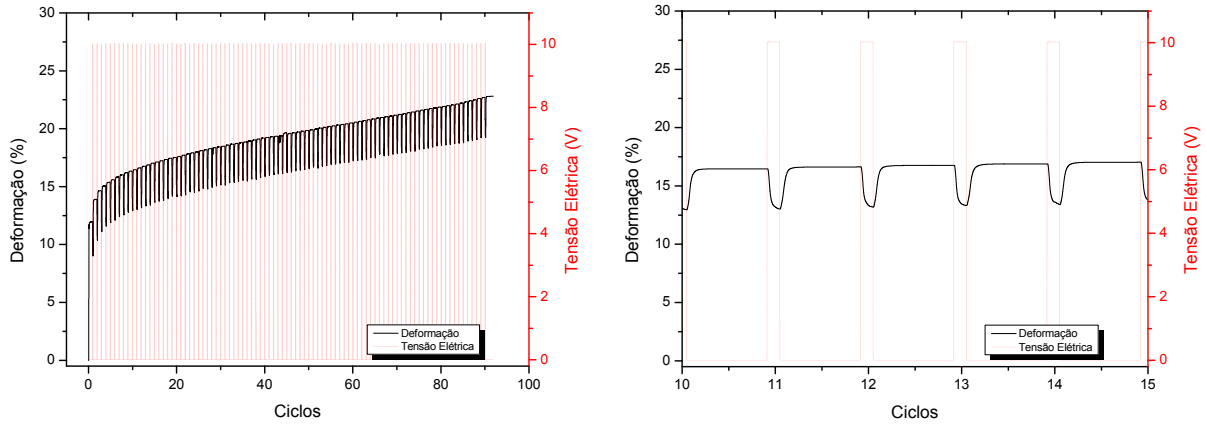
Figura IV.6: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 60 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

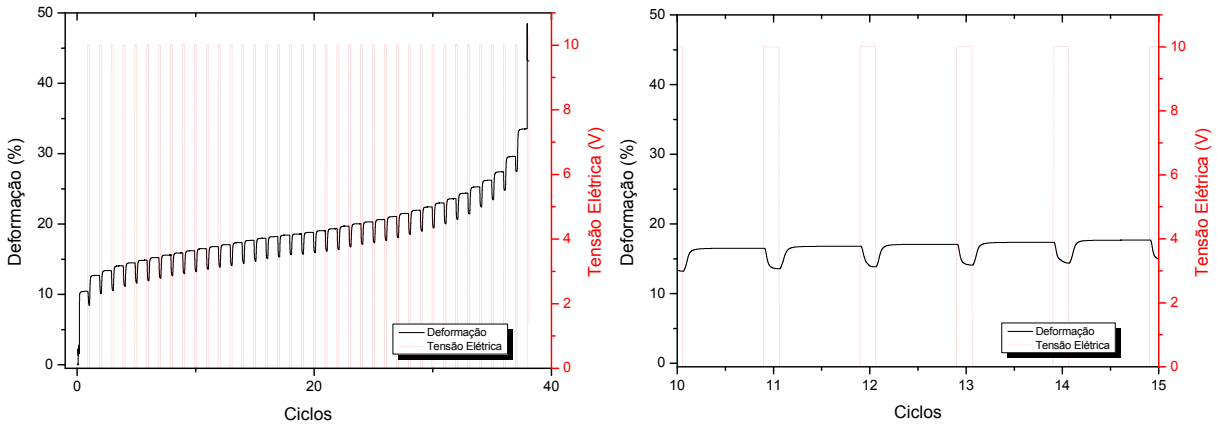


(b)

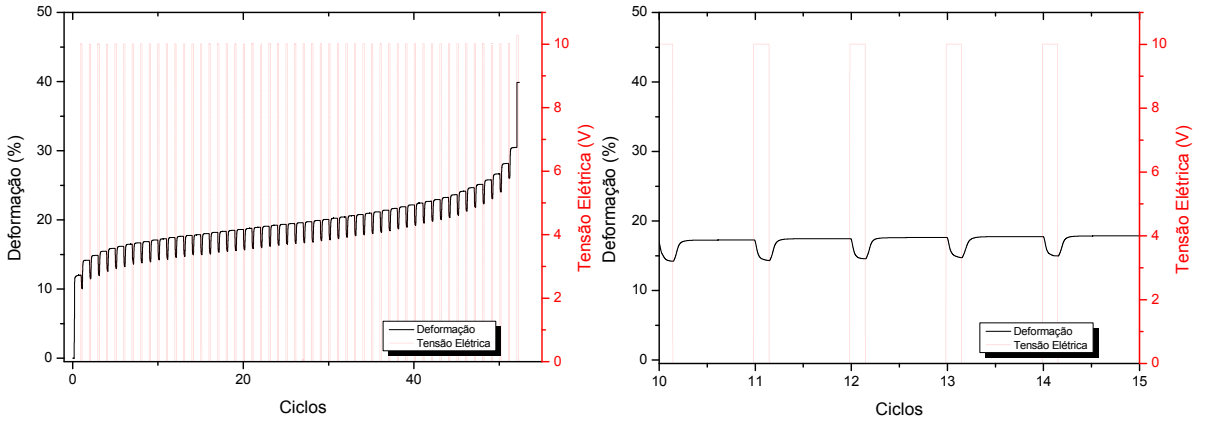


(c)

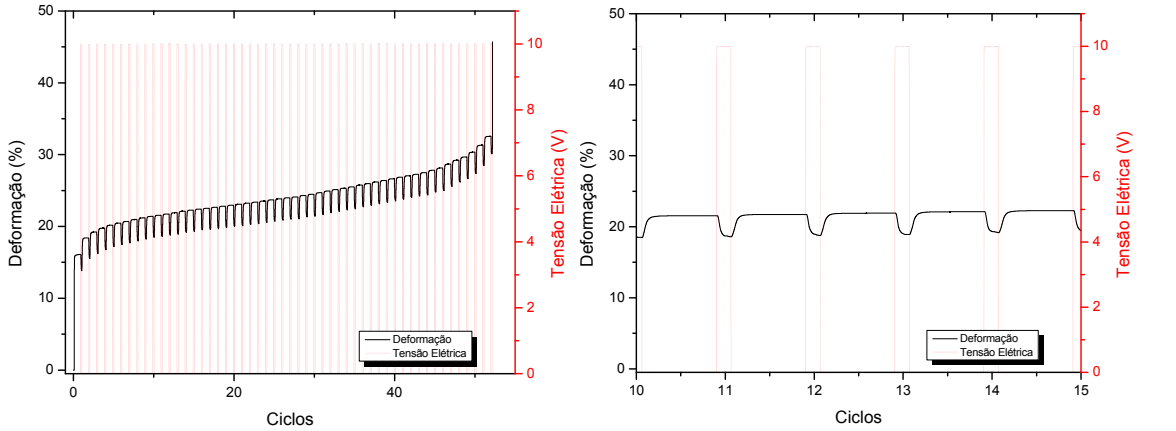
Figura IV.7: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 70 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

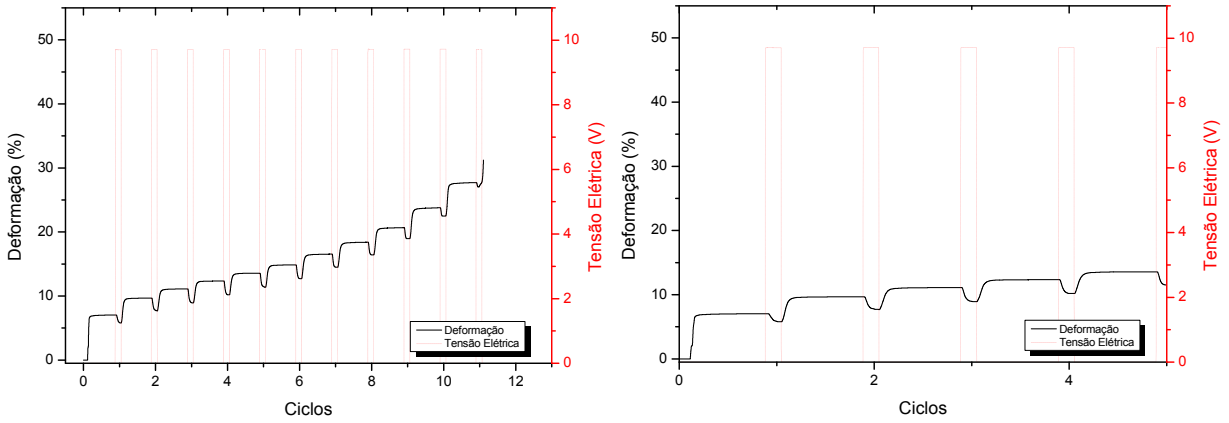


(b)

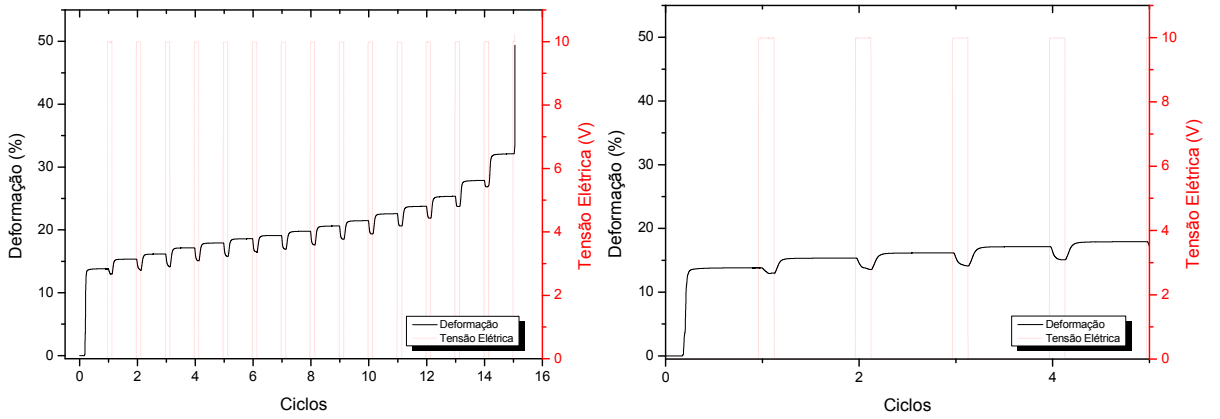


(c)

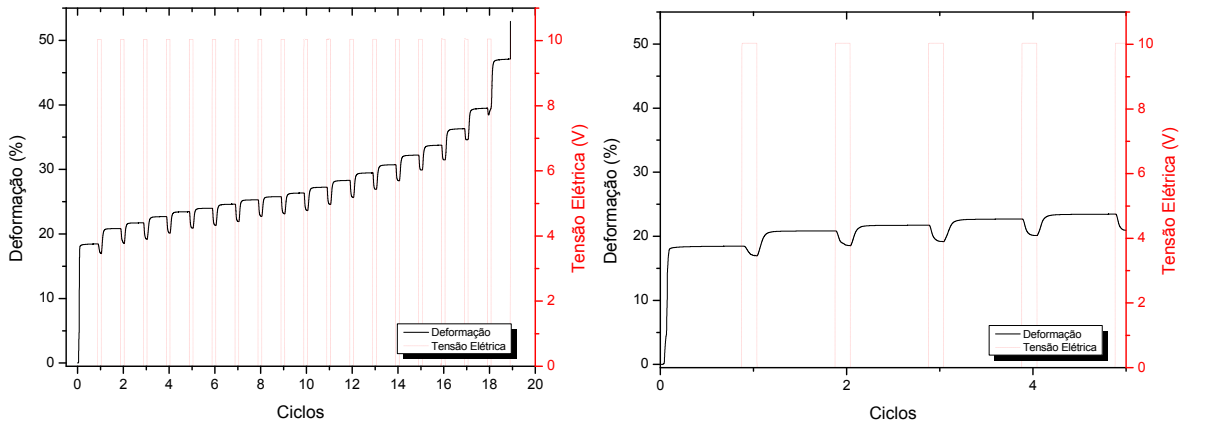
Figura IV.8: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 80 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)



(b)



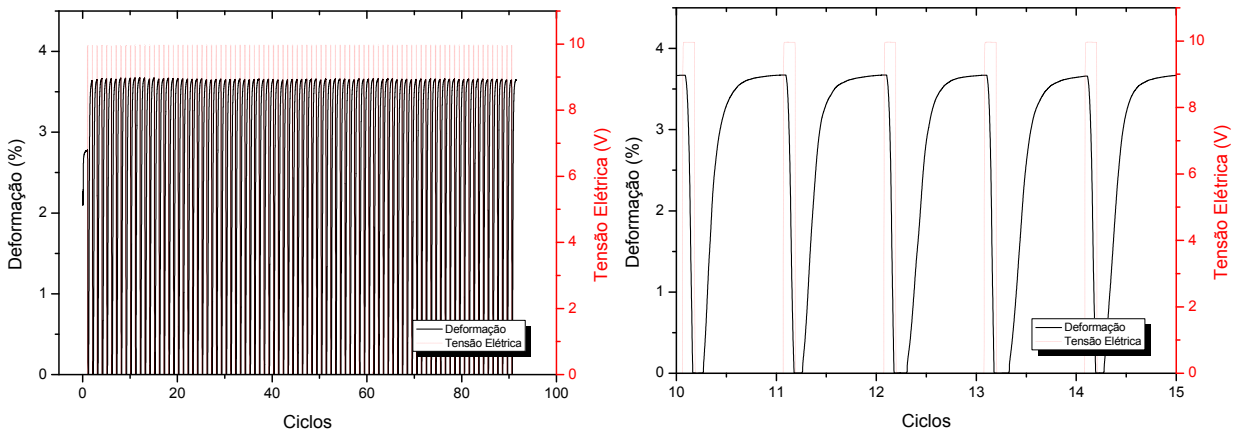
(c)

Figura IV.9: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 90 N: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (1º ao 5º ciclo).

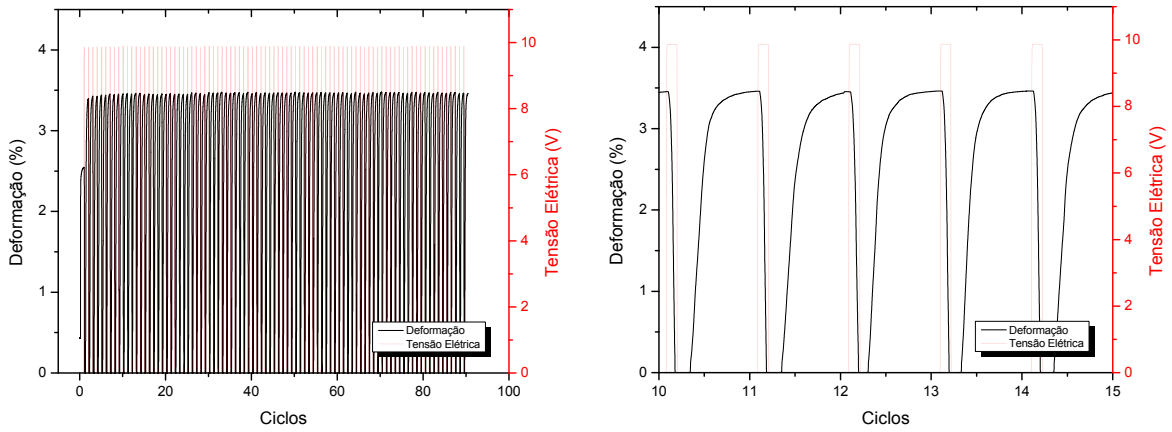
No primeiro ciclo de cada figura a deformação é maior, mostrando assim que existe uma deformação não recuperável com os ciclos termomecânicos. Para os ensaios com uma carga a partir de 30 N, as figuras mostram que a amplitude da curva de deslocamento apresenta claramente uma perda de recuperação, indicando que o fio não está consegui recuperar toda a deformação promovida pela carga. Para as cargas de 80 N e 90 N, ocorreu a falha por fadiga clássica antes dos 90 ciclos de experimento, com a ruptura do fio. O fio de SMA com 80 N falhou após 45 ciclos e com 90 N falhou após 14 ciclos, em média.

Esses resultados estão de acordo com os encontrados em PAPPAS *et al.* (2007) que fizeram um experimento com fios NiTi com efeito memória de forma de 0,3 mm de diâmetro, onde foi aplicada primeiro uma torção no fio seguida do aquecimento para recuperação da deformação induzida por transformação de fase. Eles observaram que após um longo período de ativação do sistema (ciclos ou contínuo) o material perde a função de recuperação mesmo havendo mudança de fase austenita para martensita. Também estão de acordo com os resultados obtidos por PAIXÃO (2014) que foram desenvolvidos com o objetivo de estabelecer uma metodologia experimental que proporcionasse a aquisição de dados para o desenvolvimento de estudos envolvendo a fadiga em fios com memória de forma de 0,375 mm submetidos a ciclos térmicos de atuação. Os resultados mostram que o aumento do carregamento aplicado no fio de SMA, resulta em uma maior perda de atuação ao longo dos ciclos.

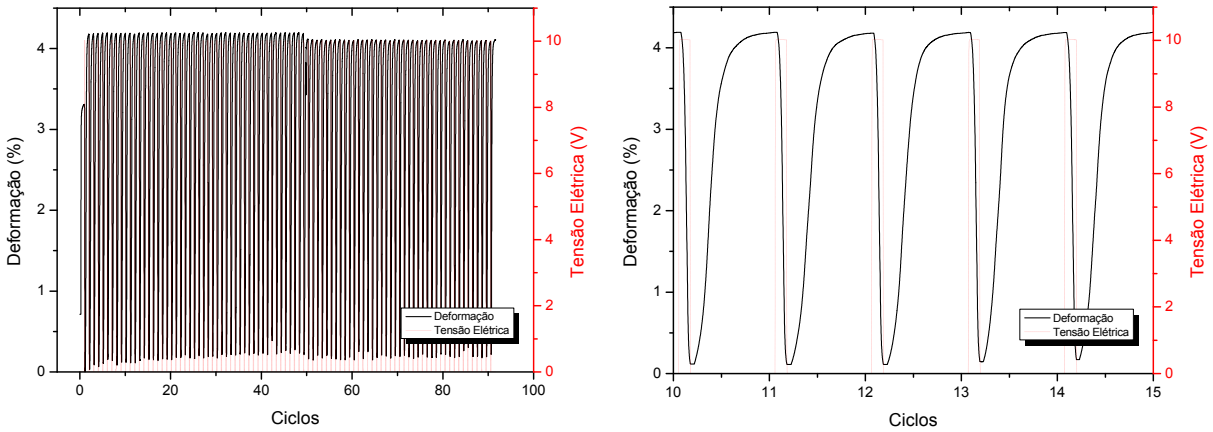
Para analisar o comportamento cíclico sem o efeito da deformação permanente inicial promovida pela aplicação do peso morto no fio de SMA, foram elaboradas novas figuras para as quais se utilizou o segundo ciclo de cada ensaio como um *offset*. Para cada ensaio, o valor de *offset* foi subtraído dos valores experimentais. Esses ajustes permitiram avaliar o comportamento da amplitude e do valor médio dos ciclos. As Figs. de IV.10 a, IV.18 mostram os gráficos com esses ajustes implementados.



(a)

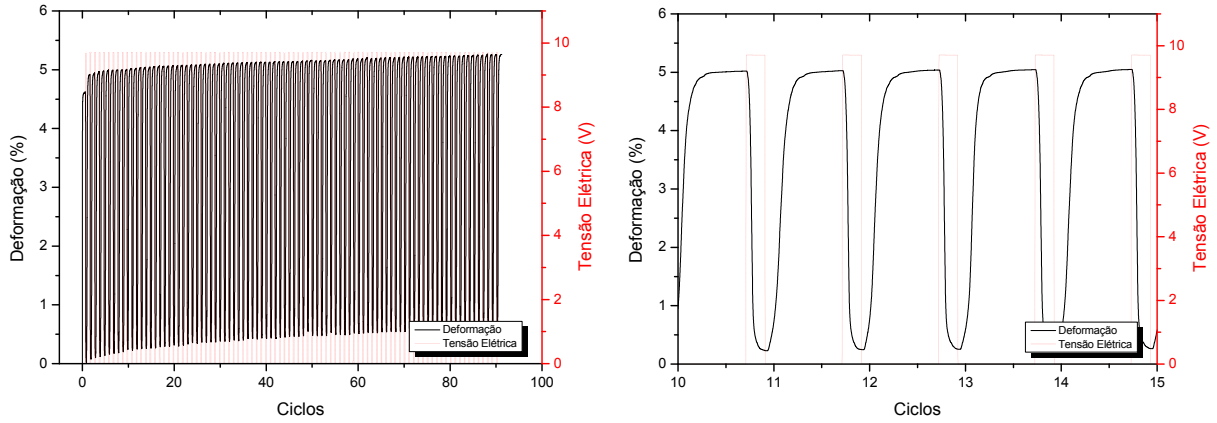


(b)

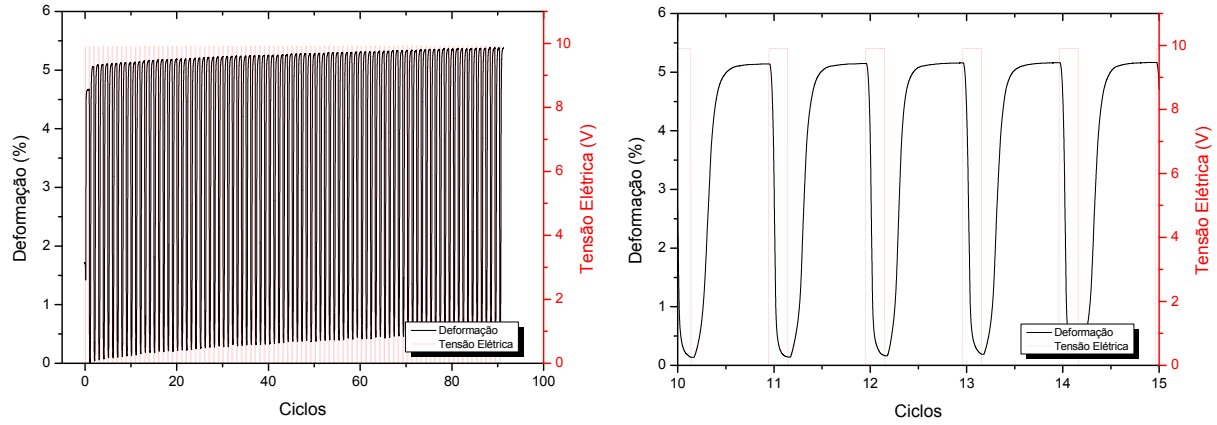


(c)

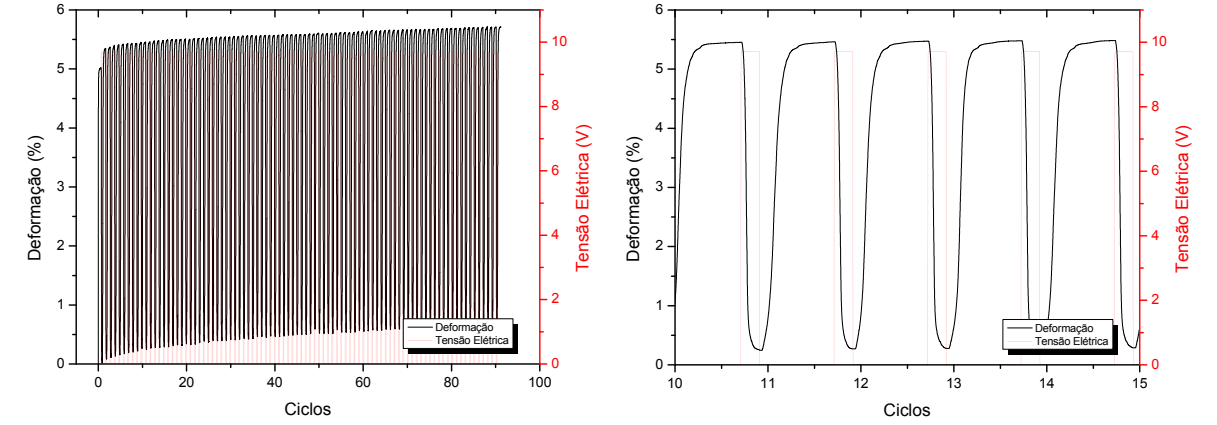
Figura IV.10: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 10 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

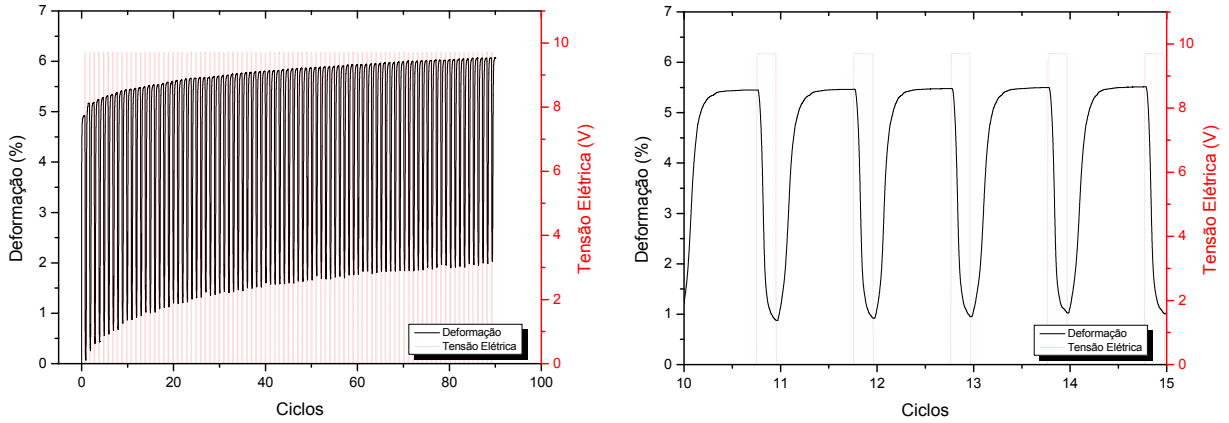


(b)

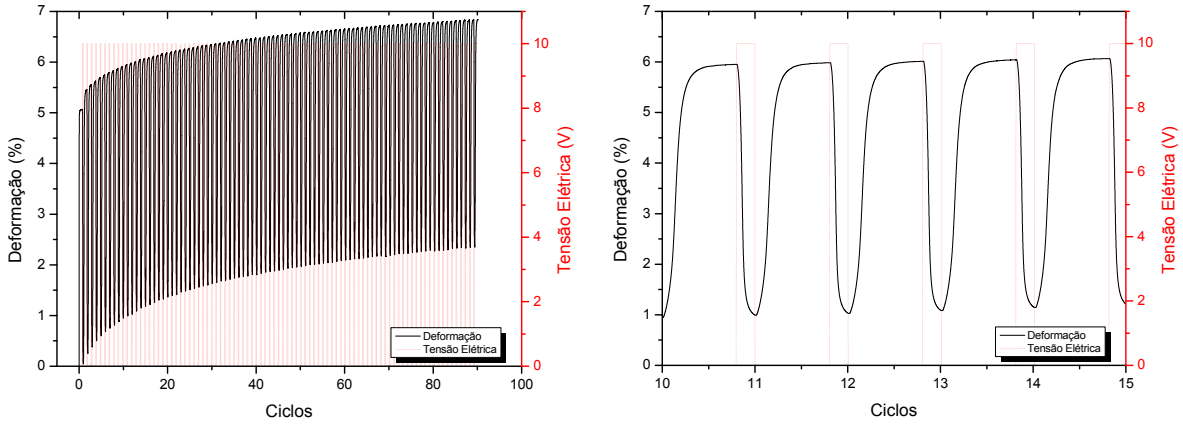


(c)

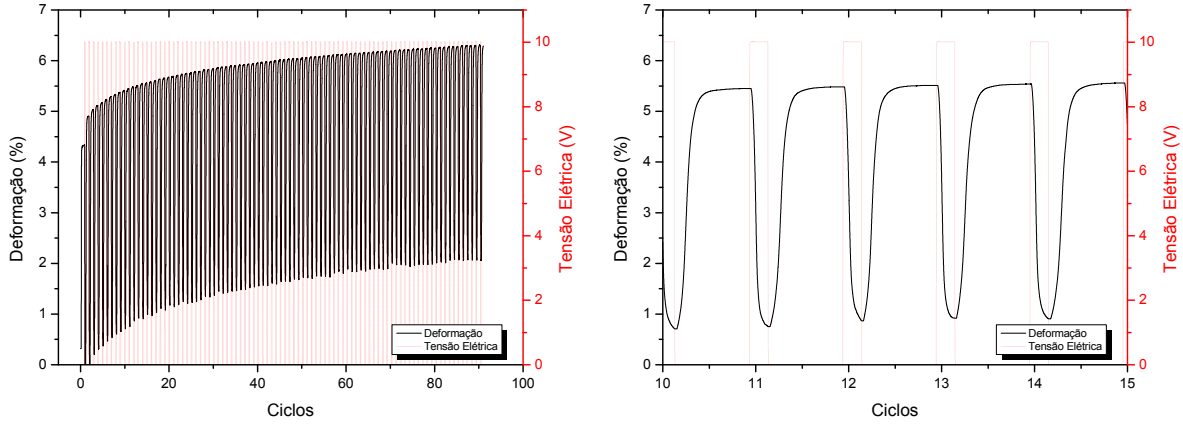
Figura IV.11: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 20 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

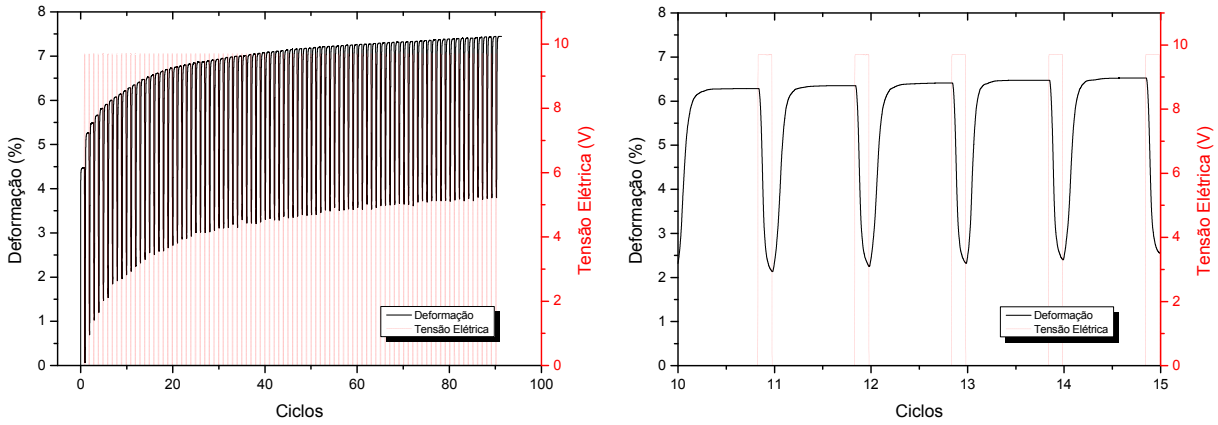


(b)

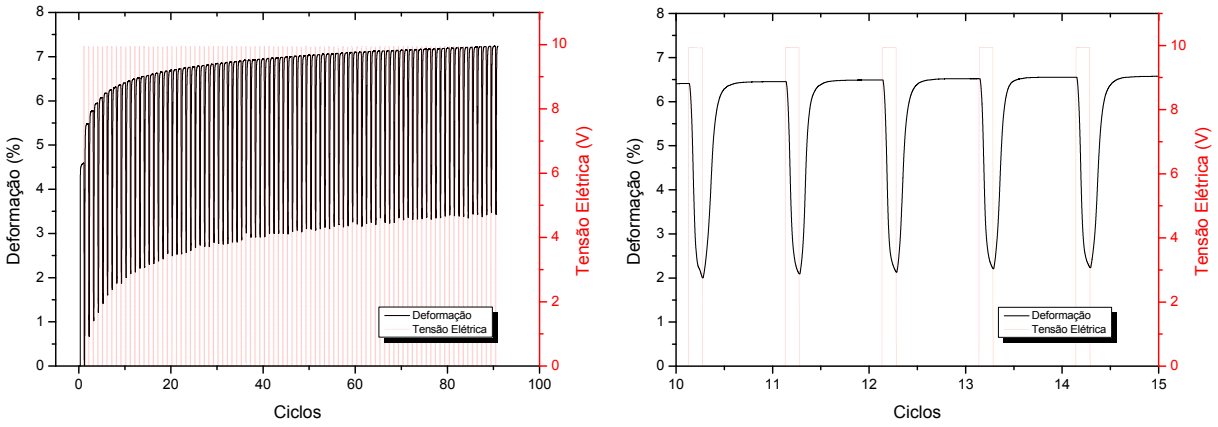


(c)

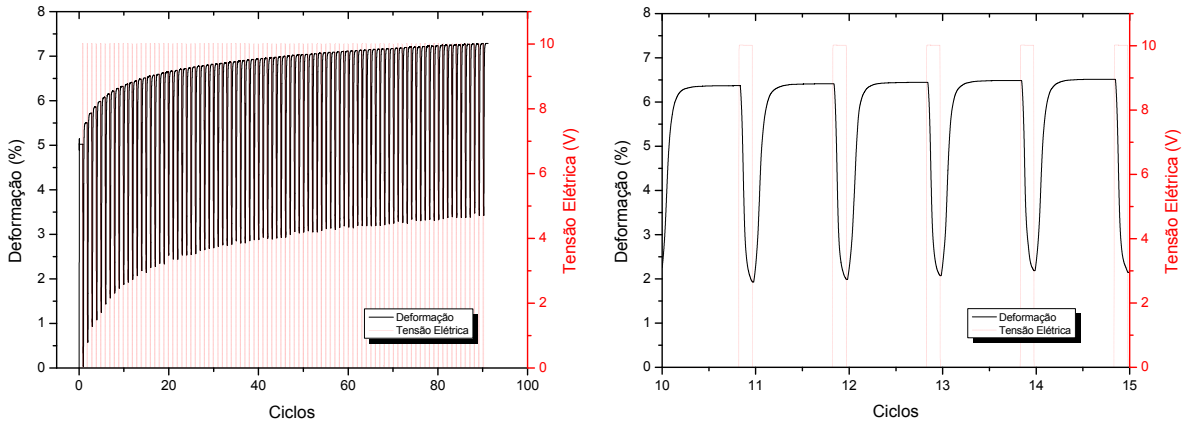
Figura IV.12: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 30 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

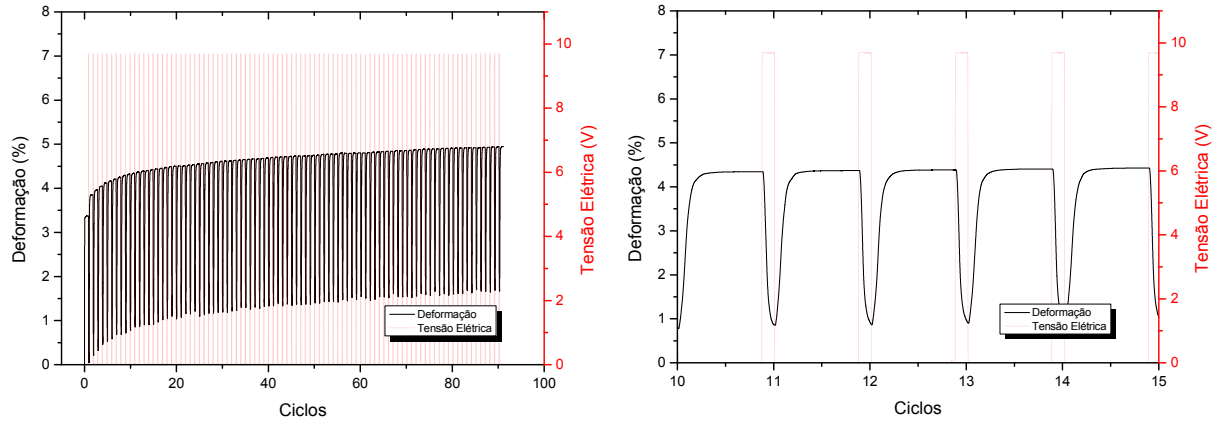


(b)

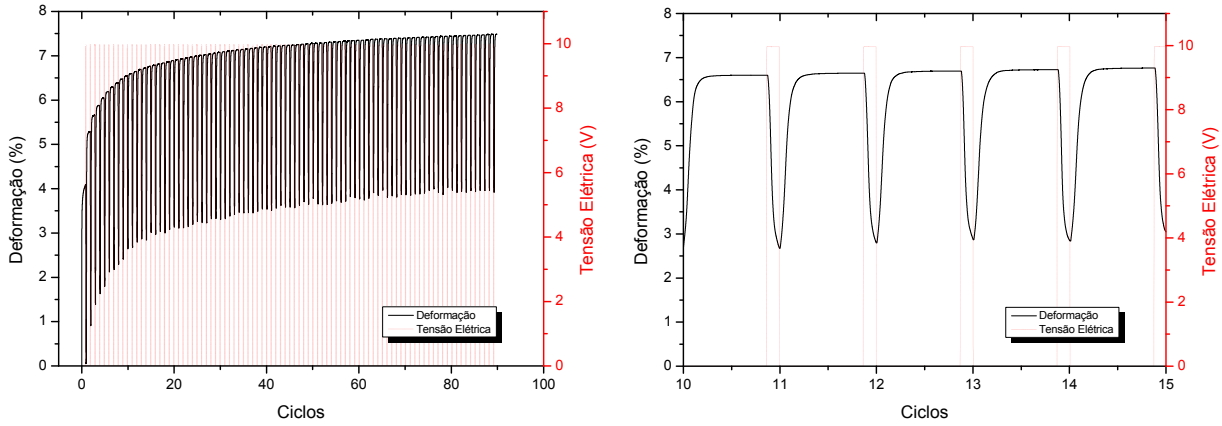


(c)

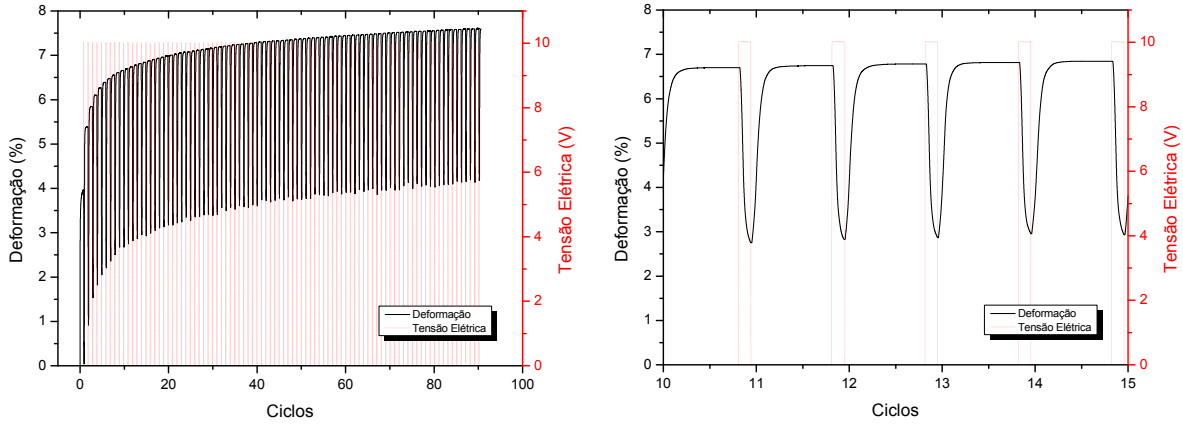
Figura IV.13: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 40 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

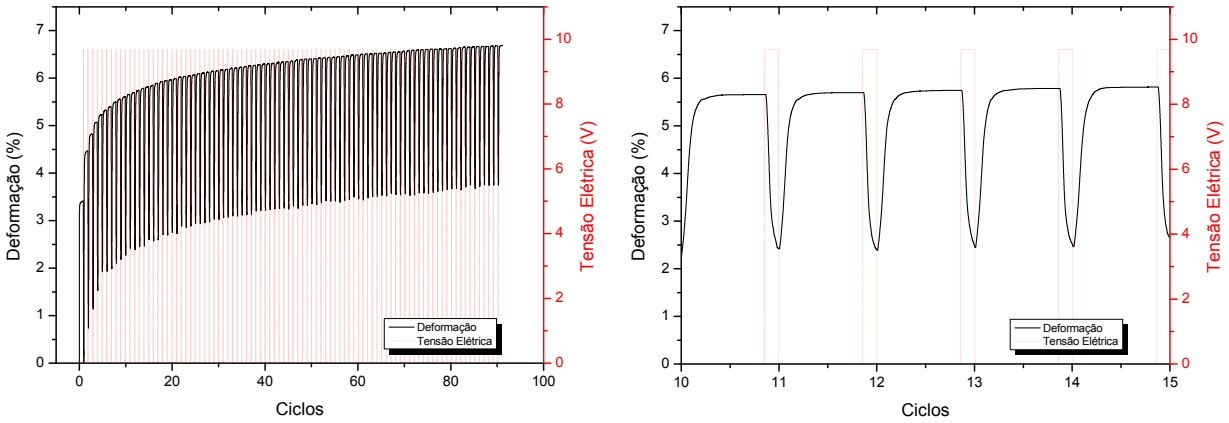


(b)

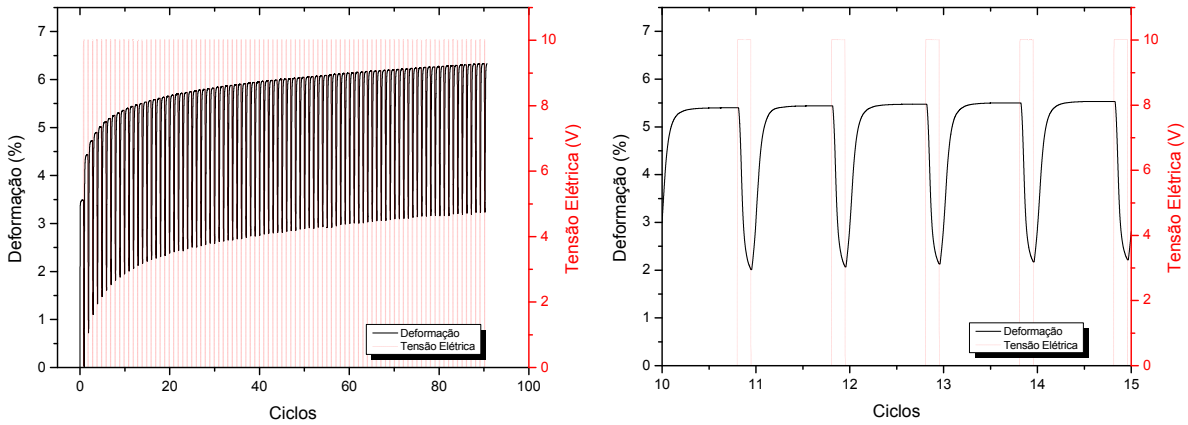


(c)

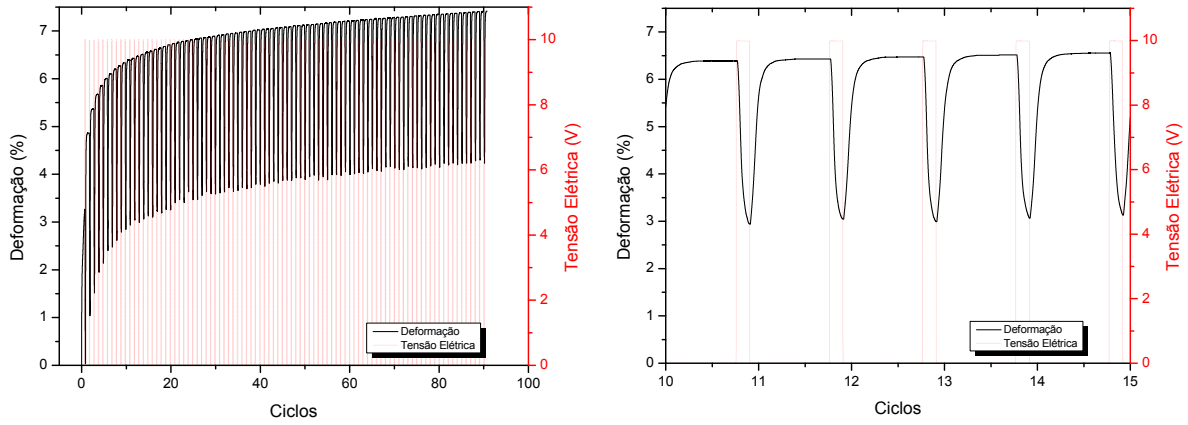
Figura IV.14: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 50 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

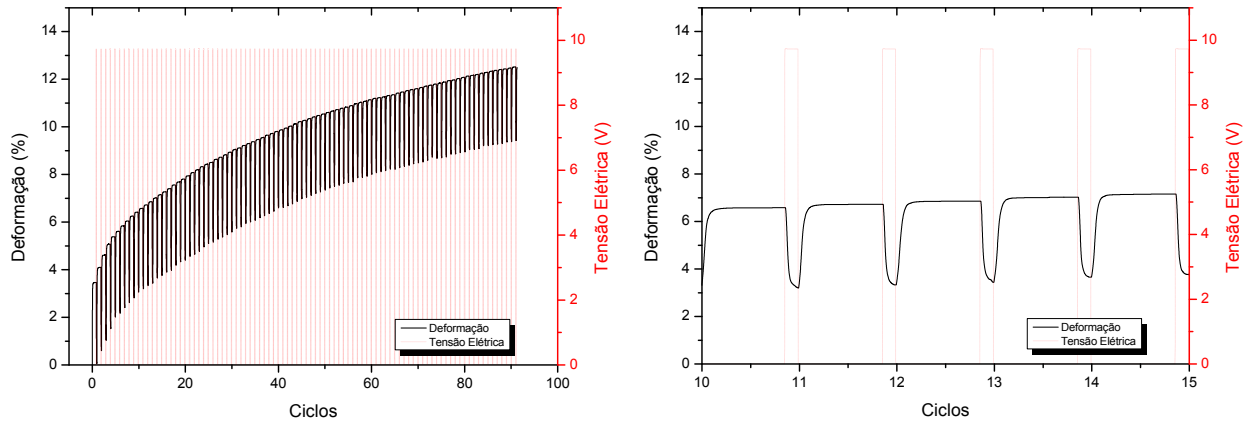


(b)

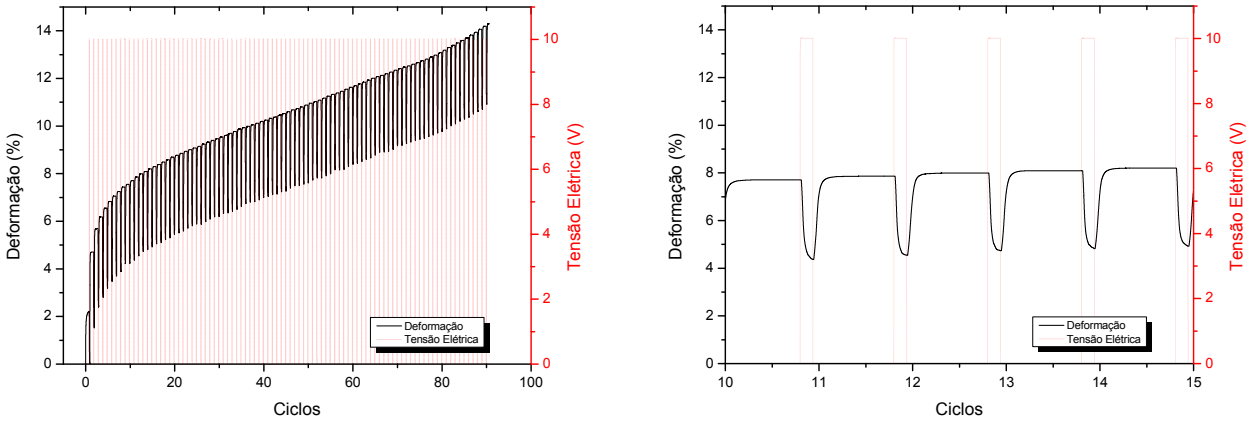


(c)

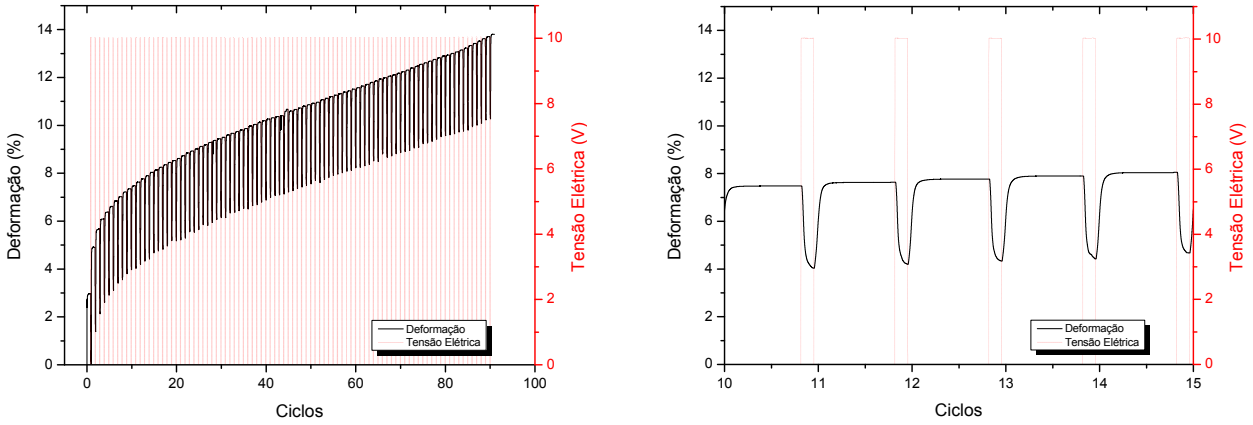
Figura IV.15: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 60 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

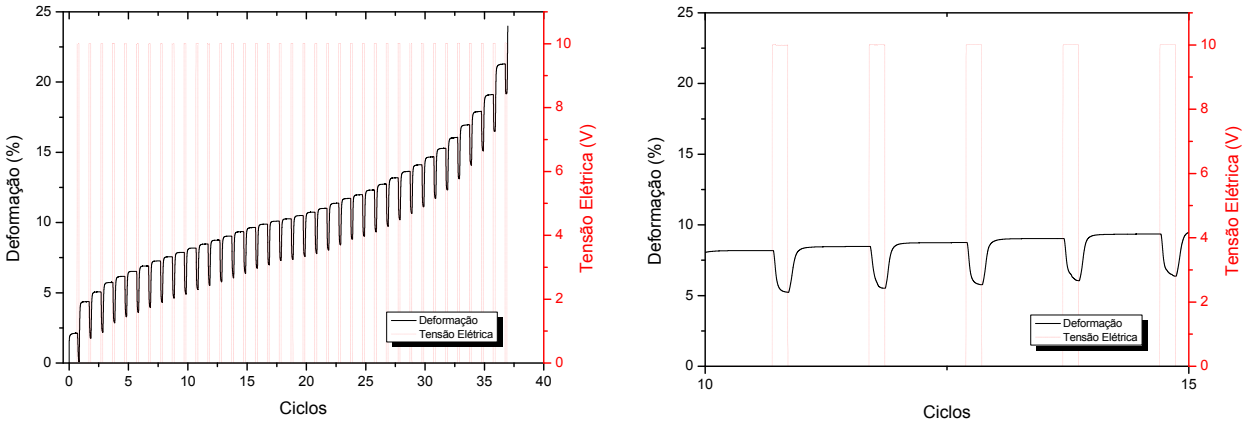


(b)

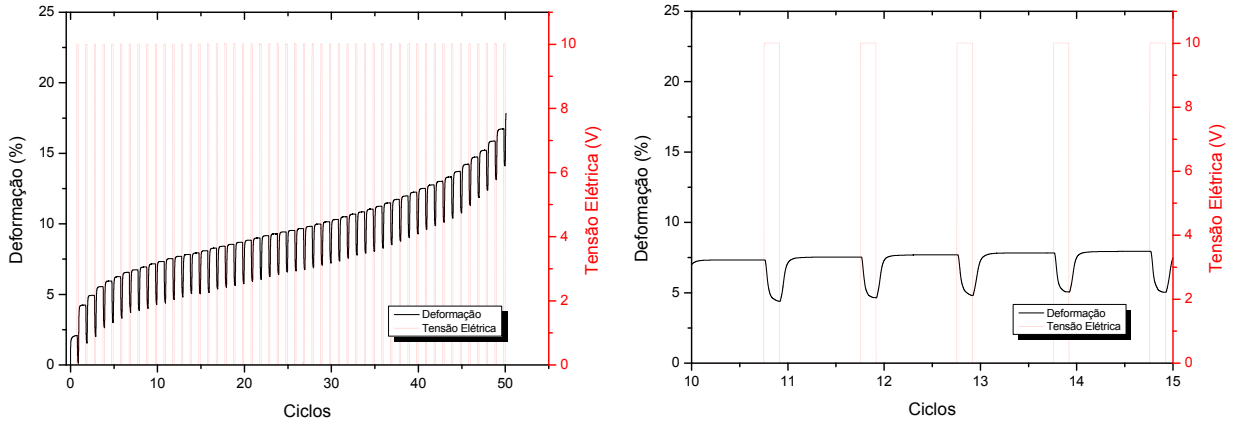


(c)

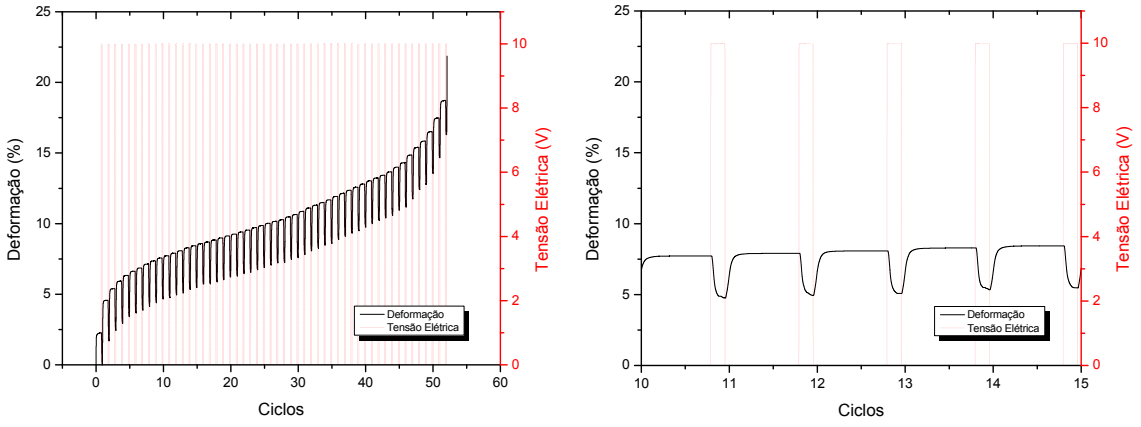
Figura IV.16: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 70 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)

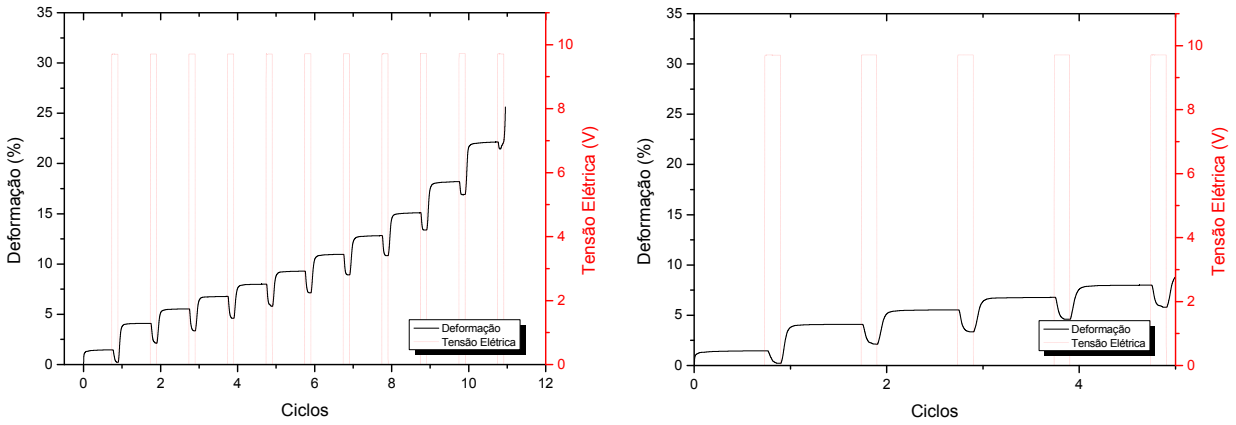


(b)

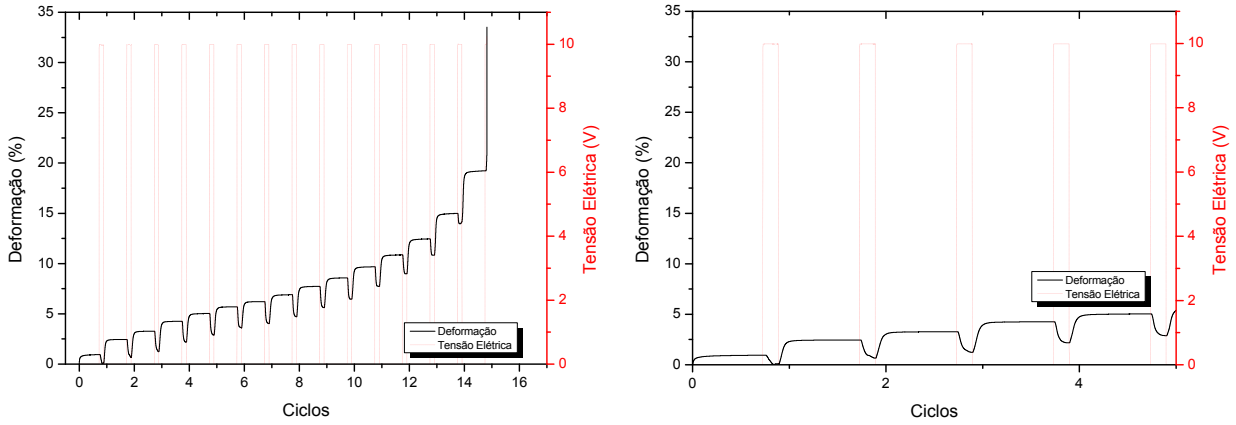


(c)

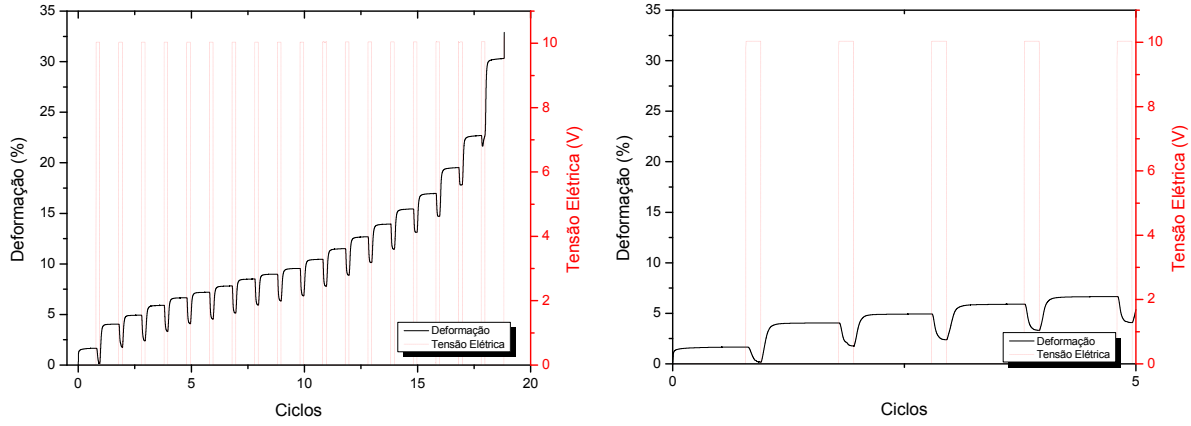
Figura IV.17 Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 80 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (11º ao 15º ciclo).



(a)



(b)



(c)

Figura IV.18: Evolução da deformação do fio e a variação de tensão para três testes de 90 N modificados: (a) primeiro teste, (b) segundo teste e (c) terceiro teste. As figuras na coluna à direita apresentam um detalhe da região do início dos testes (1º ao 5º ciclo).

Para estudar o comportamento dos fios de SMA submetidos aos carregamentos termomecânicos durante os ensaios desenvolvidos, foram introduzidos dois parâmetros de análise:

$$\alpha = \frac{\bar{\varepsilon}_f - \bar{\varepsilon}_i}{\bar{\varepsilon}_i} \tag{4.1}$$

$$\beta = \frac{\Delta\varepsilon_f - \Delta\varepsilon_i}{\Delta\varepsilon_i} \tag{4.2}$$

onde $\bar{\varepsilon}_i$ e $\bar{\varepsilon}_f$ são a deformação média inicial e final, respectivamente, e $\Delta\varepsilon_i$ e $\Delta\varepsilon_f$ representam a amplitude da deformação inicial e final, respectivamente. Assim sendo, *α* representa a variação percentual da deformação média em relação ao valor inicial e *β* a variação percentual da amplitude de deformações em relação ao valor inicial. O índice *i* está associado ao segundo ciclo, pois no primeiro existiu uma deformação irrecuperável, enquanto o índice *f* está associado ao último ciclo dos testes. No caso das cargas de 80 N e 90 N, esse índice representa o último ciclo antes da falha do material. As Figs. IV.19 e IV.20 ilustram a definição destes parâmetros.

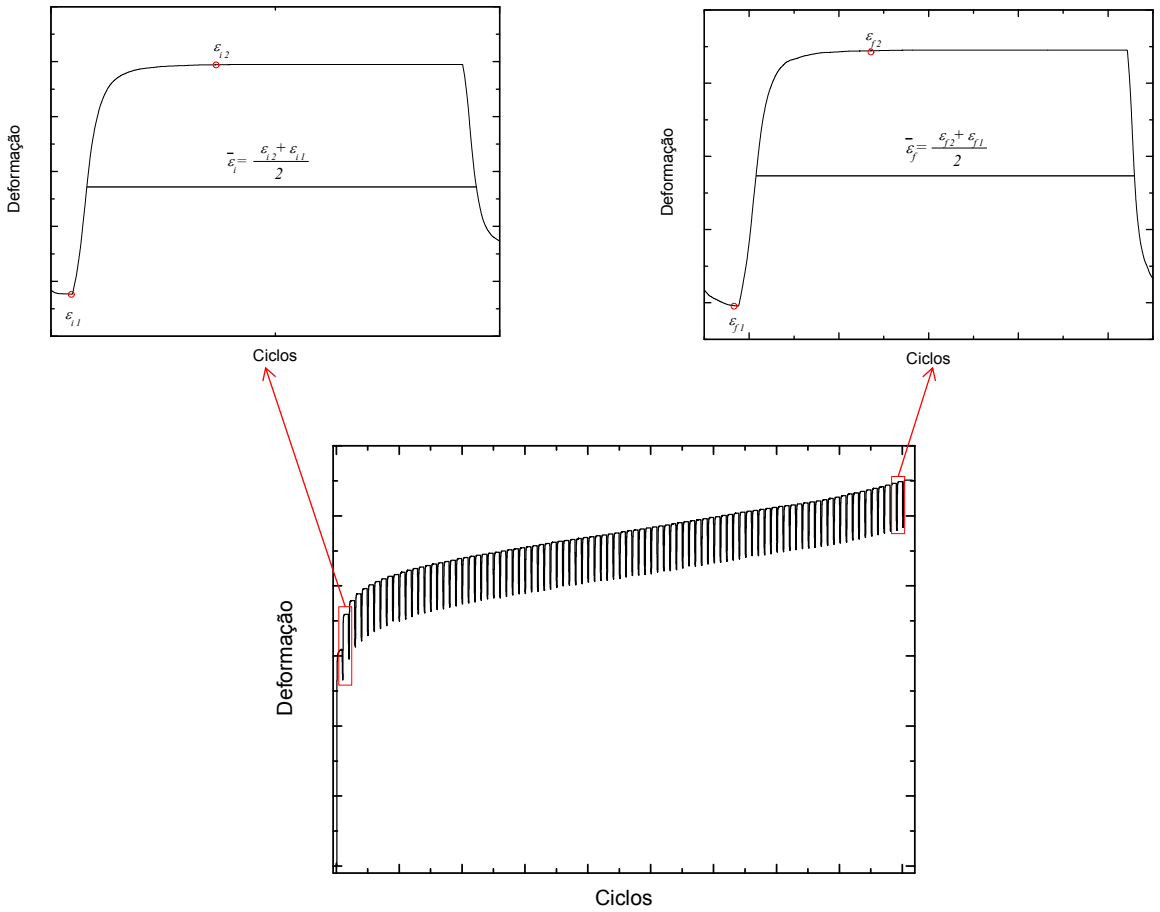


Figura IV.19: Parâmetro *α*.

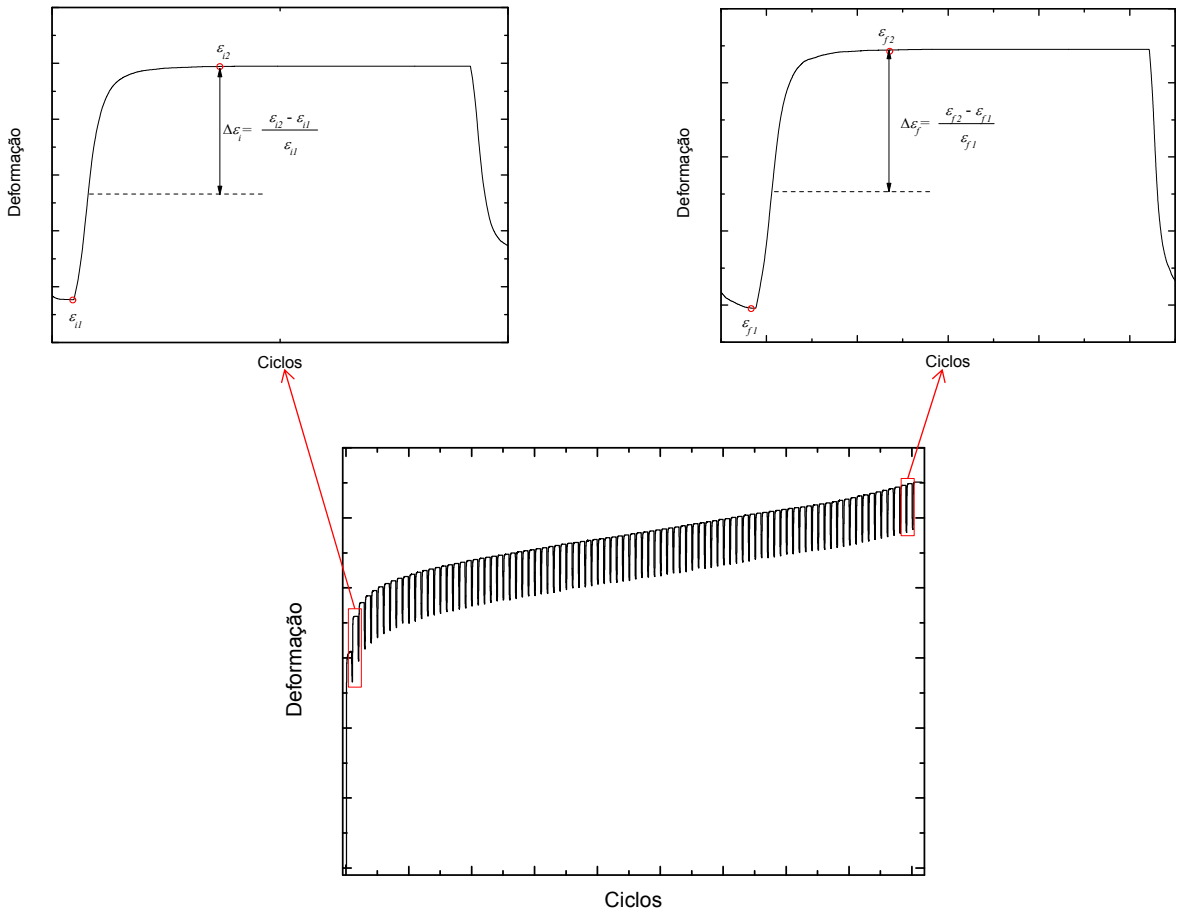
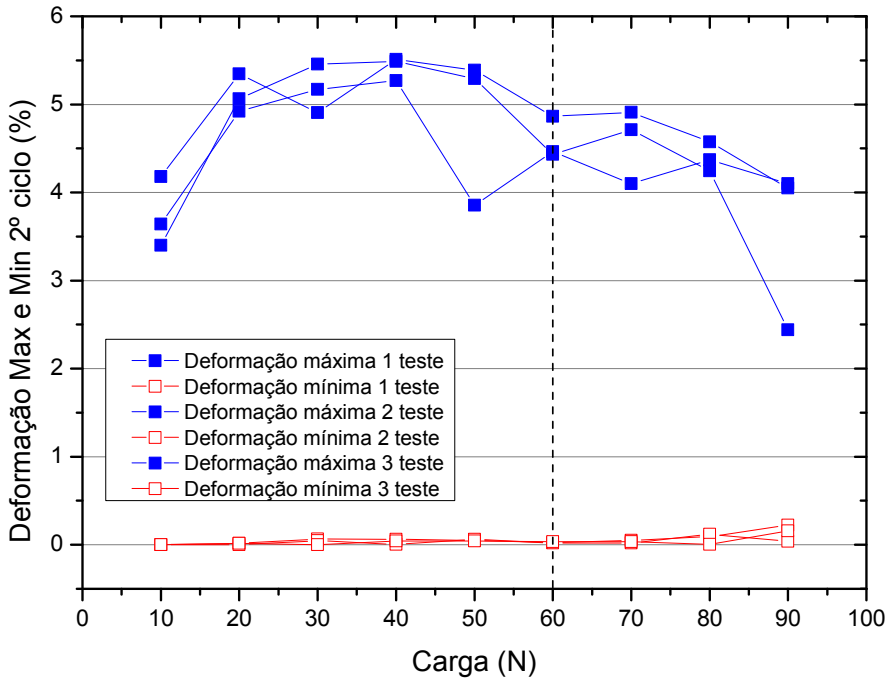
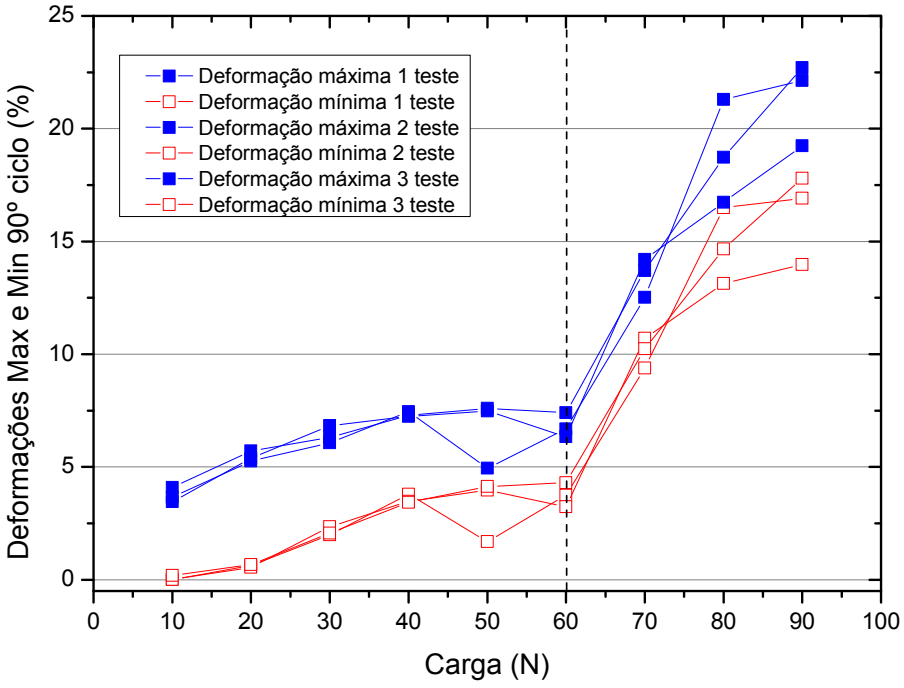


Figura IV.20: Parâmetro β.

A Fig. IV.21 mostra as deformações máximas e mínimas obtidas no 2º e no 90º ciclos em função do valor do carregamento mecânico aplicado. As deformações foram calculadas considerando-se o comprimento inicial do fio. A Fig. IV.22 mostra a deformação média e a amplitude de deformação inicial e final em função do valor do carregamento mecânico aplicado.

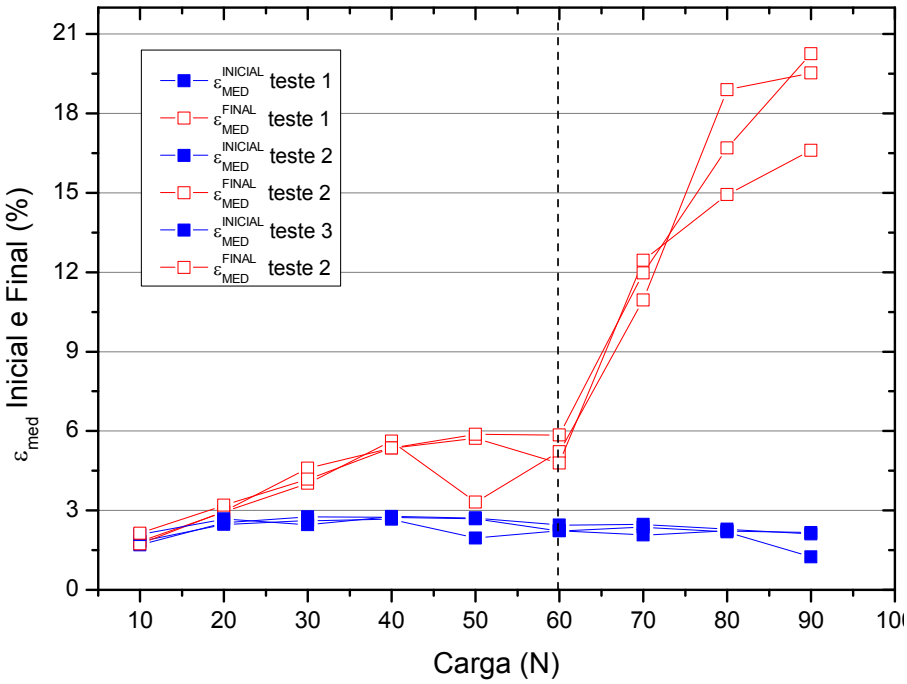


(a)

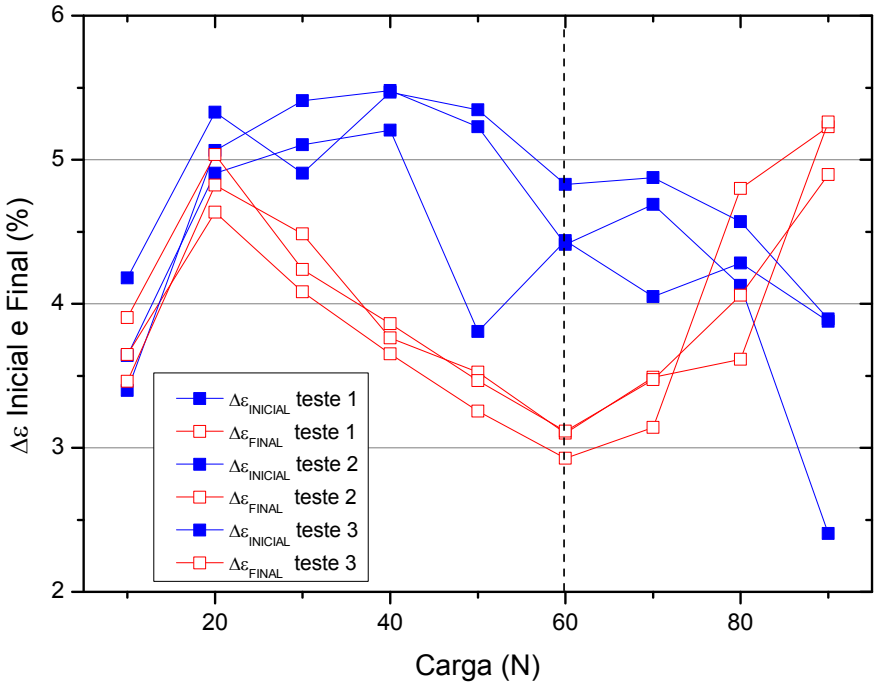


(b)

Figura IV.21: Deformação máxima e mínima: (a) 2º ciclo (b) 90º ciclo, em função do valor do carregamento mecânico aplicado.



(a)



(b)

Figura IV.22: (a) Deformação média inicial e final e (b) amplitude da deformação inicial e final, em função do valor do carregamento mecânico aplicado.

Os resultados observados mostram que para cargas maiores ocorrem maiores deformações e uma maior redução da amplitude de deformação com o decorrer dos ciclos. Como esperado, a fadiga funcional depende fortemente da carga aplicada. Esse comportamento pode afetar consideravelmente o desempenho dos elementos de SMA quando utilizados como atuadores.

As Figs.IV23 e IV24 mostram a variação dos parâmetros *α* e *β*, em relação à carga aplicada. Os resultados confirmam o limite recomendado pelo fabricante do fio, mostrando que a faixa de trabalho confiável do material para este diâmetro de fio SMA é de até 60 N e quando aplicadas cargas acima do recomendado o desempenho do fio SMA pode ser fortemente afetado, com a redução da amplitude das deformações.

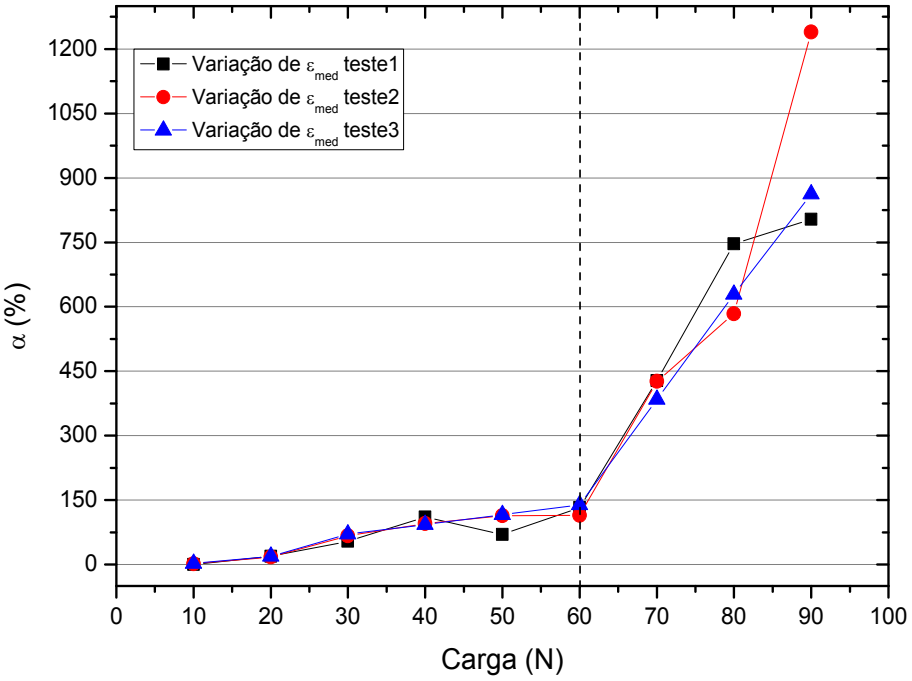


Figura IV.23: Variação percentual da deformação média em relação ao valor inicial, em função do valor do carregamento mecânico aplicado.

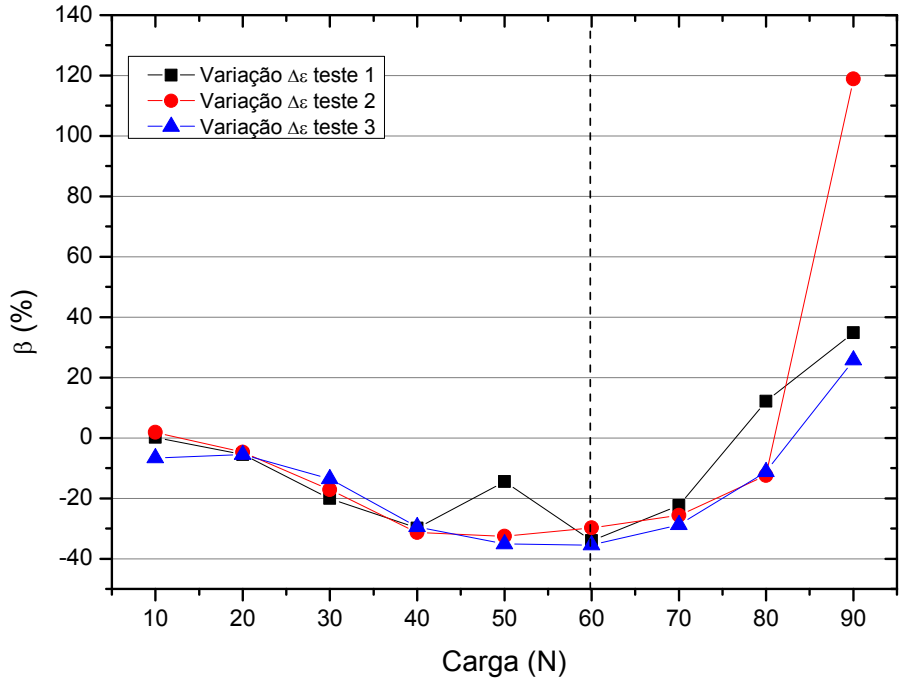
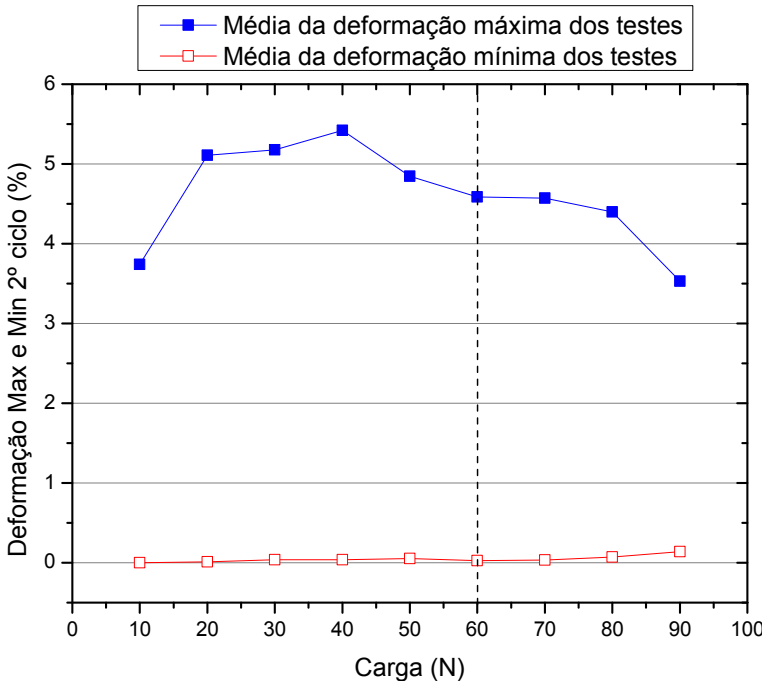
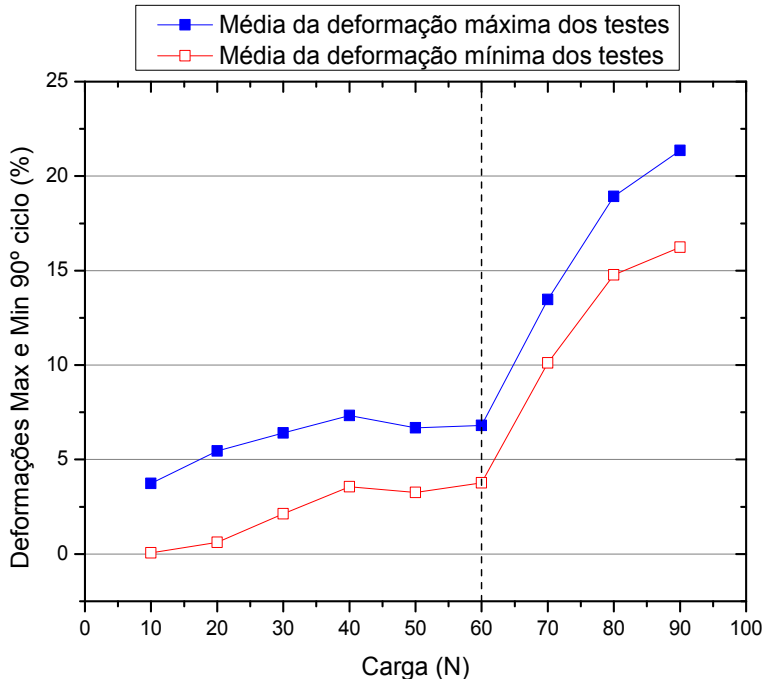


Figura IV.24: Variação percentual da amplitude de deformação em relação ao valor inicial, em função do valor do carregamento mecânico aplicado.

De modo a facilitar a compreensão dos fenômenos envolvidos durante os ensaios, apresenta-se a seguir os resultados dos ensaios considerando-se os valores médios entre três os ensaios. A Fig. IV.25 mostra as médias das deformações máximas e mínimas dos três ensaios obtidas no 2º e no 90º ciclos em função do valor do carregamento mecânico aplicado.



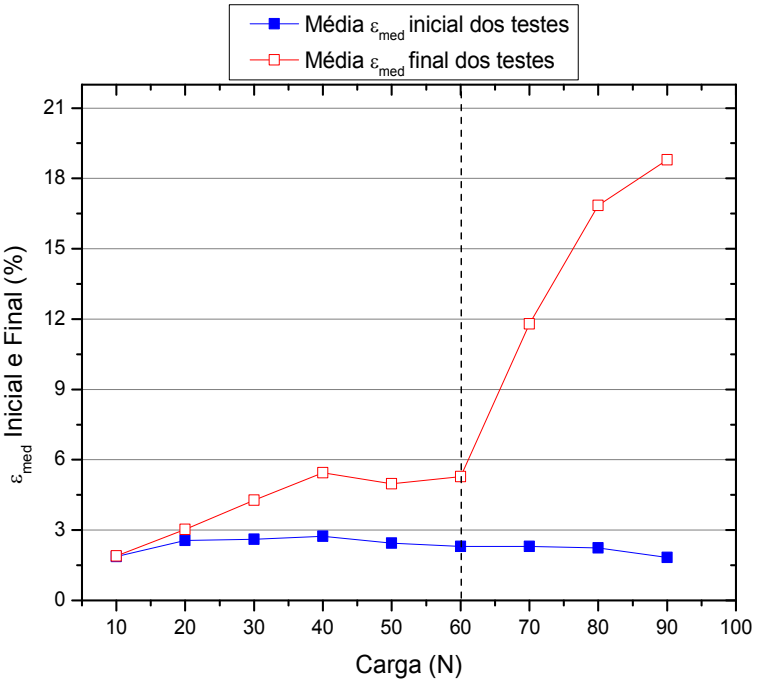
(a)



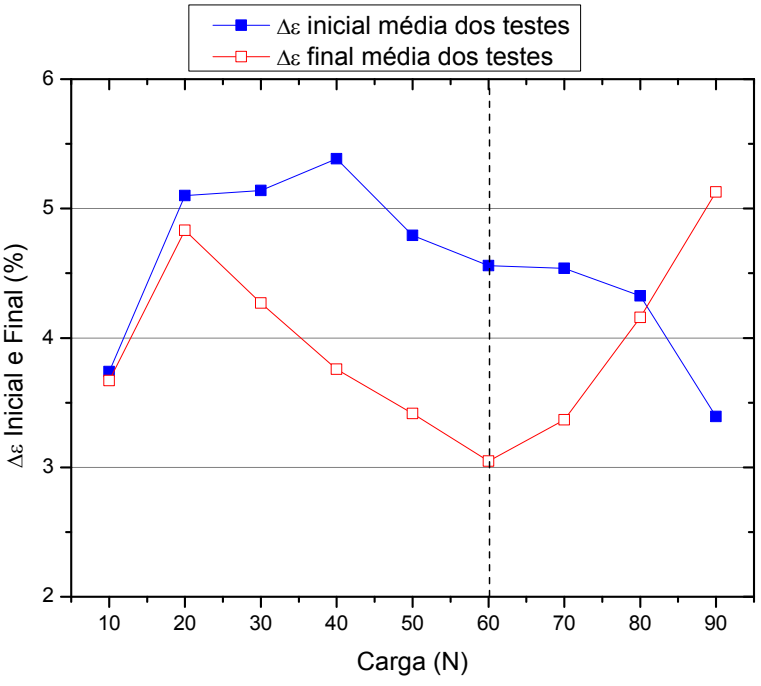
(b)

Figura IV.25: Deformação máxima e mínima: (a) 2º ciclo (b) 90º ciclo, em função do valor do carregamento mecânico aplicado dos valores médios dos ensaios.

A Fig. IV.26 mostra a deformação média e a amplitude de deformação inicial e final em função do valor do carregamento mecânico aplicado dos valores médios entre três os ensaios.



(a)



(b)

Figura IV.26: (a) Deformação média inicial e final e (b) amplitude da deformação inicial e final, em função do valor do carregamento mecânico aplicado dos valores médios dos ensaios.

As figuras IV.25 e IV.26 confirmam os resultados observados anteriormente que para cargas maiores ocorrem maiores deformações e uma maior redução da amplitude de

deformação com o decorrer dos ciclos. As Figs.IV27 e IV28 mostram a média dos três testes da variação dos parâmetros *α* e *β*, em relação à carga aplicada. Essa melhor visualização do fenômeno mostra que até o carregamento com 60 N não há muita alteração nas propriedades do material.

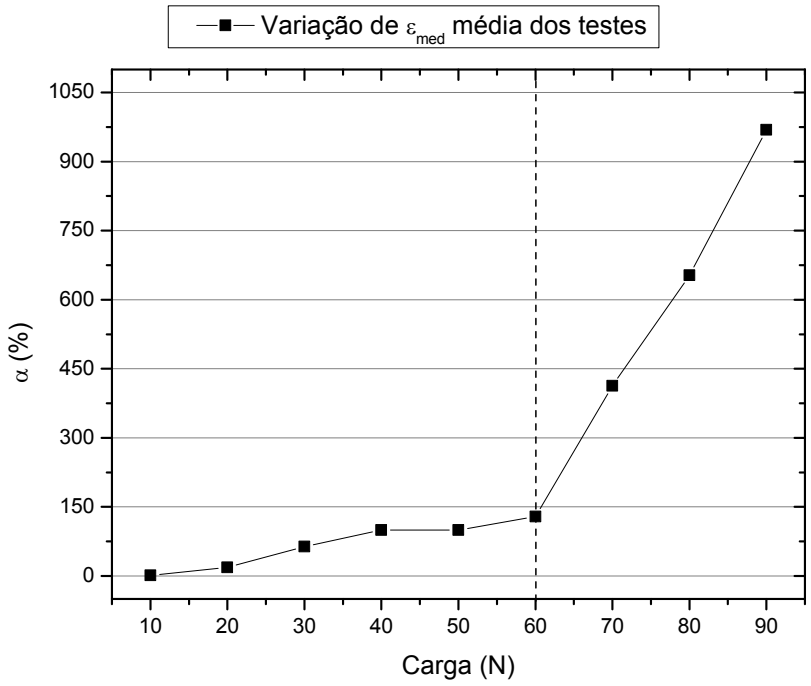


Figura IV.27: Variação percentual da deformação média em relação ao valor inicial, em função do valor do carregamento mecânico aplicado dos valores médios dos ensaios.

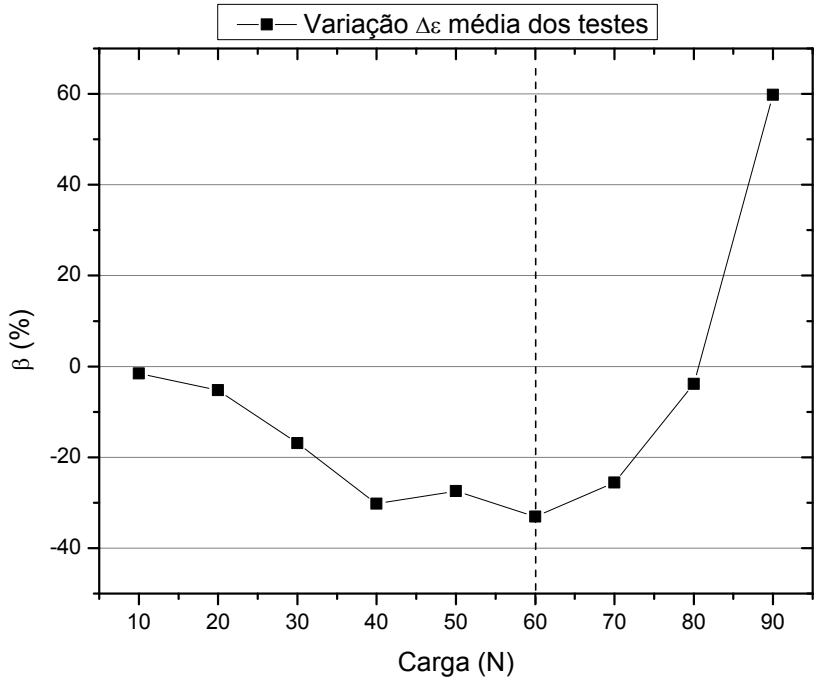


Figura IV.28: Variação percentual da amplitude de deformação em relação ao valor inicial, em função do valor do carregamento mecânico aplicado dos valores médios dos ensaios.

Capítulo V – Conclusão

As SMAs são materiais com características especiais que têm despertado nos últimos anos interesse de diversas áreas do conhecimento. Diversas aplicações utilizando elementos de SMA têm sido desenvolvidas, sendo que muitas delas envolvem a sua submissão a carregamentos cíclicos. Estes materiais, além de estarem sujeitos a falhas associadas à fadiga clássica, ou estrutural, presentes nas ligas metálicas, podem apresentar falhas por fadiga funcional, as quais estão normalmente associadas à perda de atuação ou da capacidade de dissipação de energia. Desta forma, o estudo do comportamento em fadiga de elementos de SMAs apresenta relevância científica e tecnológica.

Neste trabalho utilizou-se um dispositivo de baixo custo capaz de gerar dados experimentais para caracterizar a fadiga funcional de fios de SMA e poder identificar faixas operacionais confiáveis para este material. Os resultados experimentais mostram que o sistema se comportou de uma maneira apropriada e eficaz para análise de fadiga funcional de fios de SMAs, exibindo um comportamento semelhante aos encontrados na literatura. O sistema permite determinar as curvas de evolução no tempo do deslocamento do fio e da variação de tensão elétrica proporcional à corrente elétrica que passa pelo fio de SMA. O sistema foi utilizado para comparar o desempenho de fios de SMA submetidos a diferentes carregamentos termomecânicos envolvendo a aplicação de um carregamento mecânico constante e de um carregamento térmico cíclico.

Os resultados experimentais mostraram que as cargas maiores resultam em uma menor recuperação da transformação de fase induzida por tensão, o que resulta numa perda de efeito de atuação que tende a se deteriorar ainda mais quando o número de ciclos aumenta. Quanto maior a carga e maior o número de ciclos, menor é a eficiência da recuperação do material. Também se observou que as cargas intermediárias (de 20 a 50 N) são as mais apropriadas para trabalho por não afetarem o desempenho do material para este diâmetro de fio SMA durante o número de ciclos estudados. Além disso, quando aplicadas cargas acima da carga limite recomendada pelo fabricante do fio (60 N), o desempenho do fio SMA é fortemente afetado, com a redução da amplitude das deformações e da vida útil do material. Devido à boa repetibilidade do equipamento, os resultados indicam que o dispositivo pode também ser utilizado para estudar a fadiga clássica de fios SMA.

Os resultados experimentais deste trabalho abrem uma série de perspectivas de investigações futuras do material, como a análise de fadiga clássica, o estudo dos efeitos da variação de temperatura no comportamento termomecânico do fio, a análise da variação de corrente com carregamentos assistidos no comportamento termomecânico do material e estudos microestruturais nos fios após os ensaios com a finalidade de obter informações

relativas a distribuição as fases, ao surgimento de trincas e caracterização das falhas no material.

O dispositivo já se encontra preparado para possibilitar o desenvolvimento de estudos de fadiga clássica e funcional em fios com memória de forma submersos em fluidos de resfriamento, possibilitando assim a realização de testes com menores tempos de execução.

Referências Bibliográficas

AGUIAR, R. A. A., SAVI, M. A. and PACHECO, P. M. C. L. “Experimental and numerical investigations of shape memory alloy helical springs”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 19,025008 (9pp), 2010.

ANTON, S. R., and SODANO, H. A. “A review of power harvesting using piezoelectric materials”. *Smart Materials & Structures*, *16*, R1–R21, 2007.

AMEZQUITA-SANCHEZ, J. P., DOMINGUEZ-GONZALEZ, A., SEDAGHATI, R., de Jesus Romero-Troncoso, R., OSORNIO-RIOS, R. A. “Vibration Control on Smart Civil Structures: A Review”. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *21*(1), 23–38. 2014.

ATULASIMHA, J., and FLATAU, A. B. “A review of magnetostrictive iron–gallium alloys.” *Smart Materials and Structures*, *20*(4), 043001 (15pp), 2011.

BENAFAN, O., NOEBE, R. D., PADULA, S. a., BROWN, D. W., VOGEL, S., and VAIDYANATHAN, R. “Thermomechanical cycling of a NiTi shape memory alloy-macroscopic response and microstructural evolution”. *International Journal of Plasticity*, *56*, pp. 99–118, 2014.

BERTACCHINI, O. W., LAGOUDAS, D. C., and PATOOR, E. “Fatigue life characterization of shape memory alloys undergoing thermomechanical cyclic loading”. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 5053, pp. 612–624, 2003.

BOGUE, R. “Smart materials: A review of capabilities and applications. *Assembly Automation”*, *34*(1), 16–22, 2014.

DYNALLOY. “Flexinol® Actuator Wire Technical and Design Data”. 16 Feb. 2015, http://www.dynalloy.com/tech_data_wire.php, 2015.

EGGELER, G., HORNBOGEN, E., YAWNY, A., HECKMANN, A., and WAGNER, M. "Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys". *Materials Science and Engineering* A, Vol. 378, pp. 24–33, 2003.

FIGUEIREDO, A. M., MODENESI, P., and BUONO, V. “Low-cycle fatigue life of superelastic NiTi wires”. *International Journal of Fatigue*, Vol. 31(4), pp.751–758, 2009.

FOLLADOR, M., CIANCHETTI, M., ARIENTI, A., and LASCHI, C. “A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators”. *Smart Materials and Structures*, Vol.21,115029 (10pp), 2012.

GIRI, S. K., KRISHNAN, M., and RAMAMURTY, U.” Enhancement of fatigue life of Ni-Ti-Fe shape memory alloys by thermal cycling.” *Materials Science and Engineering A*, *528*(1), 363–370, 2010.

GLOANEC, a. L., CERRACCHIO, P., REYNIER, B., VAN HERPEN, A., and Riberty, P. “Fatigue crack initiation and propagation of a TiNi shape memory alloy”. *Scripta Materialia*, Vol. 62, pp.786–789, 2010.

GUO, Z., PAN, Y., WEE, L. B., and YU, H. “Design and control of a novel compliant differential shape memory alloy actuator”. *Sensors and Actuators, A: Physical*, *225*, pp. 71–80, 2015.

HECKMANN, A. and HORNBOGEN, E. “Microstructure and pseudo-elastic low-cycle high amplitude fatigue on NiTi”. *Journal of Physic IV*, Vol. 112, pp. 831-834, 2003.

HUMBEECK, J.V. and STALMANS, R. “Characteristics of shape memory alloys”*, In: Otsuka, K. and Wayman, C.M. Shape Memory Materials*, United Kingdom: Cambridge University Press, 1998.

HWANG, D., and HIGUCHI, T. “A Rotary Actuator Using Shape Memory Alloy (SMA) Wires”. *Transactions on Mechatronics*, Vol. 19, pp.1625–1635, 2014.

JANI, J.M., LEARY, M., SUBIC, A. and GIBSON, M.A. “A review of shape memory alloy research, applications and opportunities”. *Materials and Design*, Vo. 56, pp.1078–1113, 2013.

LAGOUDAS, D.C. “*Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Applications*.” Springer-Verlag, 2008.

LESTER, B. T., and BAXEVANIS, T. “Review and Perspectives : Shape Memory Alloy Composite Systems.” *Acta Mechanica, 2015.*

LIU, Y., XIE, Z., and VAN HUMBEECK, J. “Cyclic deformation of NiTi shape memory alloys”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 273-275, pp.673–678, 1999.

MALETTA, C., BRUNO, L., CORIGLIANO, P., CRUPI, V., and GUGLIELMINO, E. “Crack-tip thermal and mechanical hysteresis in Shape Memory Alloys under fatigue loading”. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 616, pp.281–287, 2014.

MALETTA, C., and FURGIUELE, F. “Fracture control parameters for NiTi based shape memory alloys”. *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 48, pp.1658–1664, 2011.

MAMMANO, S.G., and DRAGONI, E. “Functional fatigue of shape memory wires under constant-stress and constant-strain loading conditions”. *Procedia Engineering*, Vol. 10, pp. 3692–3707, 2011.

MAMMANO, S.G., and DRAGONI, E. “Functional fatigue of Ni-Ti shape memory wires under various loading conditions”. *International Journal of Fatigue*, Vol. 69, pp.71–83, 2012.

MAMMANO, G.S. and DRAGONI, E. “Functional fatigue of NiTi Shape Memory wires for a range of end loadings and constraints.”, *Frattura ed Integrità Strutturale*, Vol. 23 (2013), pp.25–33, 2013.

MELTON, K. N., and MERCIER, O. “The effect of the martensitic phase transformation on the low cycle fatigue behaviour of polycrystalline NiTi and CuZnAl alloys.” *Materials Science and Engineering*, *40*, 81–87, 1979.

MORIN, C., MOUMNI, Z., and ZAKI, W. “Thermomechanical coupling in shape memory alloys under cyclic loadings: Experimental analysis and constitutive modeling”. *International Journal of Plasticity*, Vol. 27, pp.1959–1980, 2011.

MIYAZAKI, S., IGO, Y. and OTSUKA, K. “Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of Ti-Ni alloys”. *Acta Metallurgica*, Vol. 34, No.10, pp. 2045- 2051, 1986.

MIYAZAKI, S., IGO, Y. and OTSUKA, K. “Effect of cyclic deformation on the pseudoelasticity characteristics of Ti-Ni alloys”. *Metallurgical Transactions A*, v. 17A, pp.115-120, 1986.

NAGHASHIAN, S., FOX, B. L., and BARNETT, M. R. “Actuation curvature limits for a composite beam with embedded shape memory alloy wires”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 23(6), pp.065002 (10pp), 2014.

NAVA, N., COLLADO, M., and CABÁS, R. “New Pin Puller Based on SMA Technology for Space Applications”. *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 23(7), pp.2712–2718, 2014.

PAIXÃO, R. B. “*Implementação de sistema de caracterização de fadiga em ligas de memória de forma submetidas a ciclos termomecânicos.”* Trabalho Final de Curso, CEFET/RJ – Departamento de Engenharia Mecânica, 2014.

PAPPAS, P., BOLLAS, D., PARTHENIOS, J., DRACOPOULOS, V., and GALIOTIS, C. “Transformation fatigue and stress relaxation of shape memory alloy wires”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 16, pp.2560–2570, 2007.

PETRINI, L., and MIGLIAVACCA, F. “Biomedical Applications of Shape Memory Alloys”. *Journal of Metallurgy*, pp.1–15, 2011.

PEREIRA, J.H.I. “*Um Estudo Sobre Atuadores Lineares com Molas Helicoidais de Ligas com Memória de Forma”*, Tese de Mestrado, CEFET/RJ – Prog. de Pós-Graduação em Tecnologia, Rio de Janeiro, 2009.

PREDKI, W., KLÖNNE, M., and KNOPIK, A. “Cyclic torsional loading of pseudoelastic NiTi shape memory alloys: Damping and fatigue failure.” *Materials Science and Engineering A*, *417*(1-2), 182–189, 2006.

ROYSE, F. “*Dimensionamento de um Equipamento para Ensaios de Fadiga em Fios de Ligas com Memória de Forma”,* Trabalho Final de Curso, CEFET/RJ – Departamento de Engenharia Mecânica, 2007.

RUTH, D. J. S., DHANALAKSHMI, K., and NAKSHATHARAN, S. S. “Bidirectional angular control of an integrated sensor/actuator shape memory alloy based system.” *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, *69*, pp. 210–221, 2015

SAVI, M.A., PACHECO, P.M.C.L., GARCIA, M.S., AGUIAR, R.A.A., SOUZA, L.F.G. and DA HORA, R.B. “Nonlinear geometric influence on the mechanical behavior of shape memory alloy helical springs”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 24, pp. 035012, 2015.

SCOPUS. “Scopus document search smarr material”. 2 Novembro. 2015, < http://www.scopus.com/>, 2015.

SONG, G., MA, N., and LI, H.N. “Applications of shape memory alloys in civil structures”. *Engineering Structures*, Vol. 28, pp.1266–1274, 2006.

SONG, D., KANG, G., KAN, Q., YU, C., and ZHANG, C. “The effect of martensite plasticity on the cyclic deformation of super-elastic NiTi shape memory alloy”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 23, 015008 (7pp), 2014.

SOUL, H., ISALGUE, a, YAWNY, a, TORRA, V., and LOVEY, F. C. “Pseudoelastic fatigue of NiTi wires: frequency and size effects on damping capacity”. *Smart Materials and Structures*, Vol. 19, pp.085006 (7pp), 2010.

TABANLI, R., SIMHA, N., and BERG, B. “Mean stress effects on fatigue of NiTi”. *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 273-275, pp.644–648, 1999.

VALADKHAN, S., MORRIS, K., and KHAJEPOUR, A. “Review and Comparison of Hysteresis Models for Magnetostrictive Materials.” *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, *20*(2), 131–142, 2008.

WAGNER, M., SAWAGUCHI, T., KAUSTRÄTER, G., HÖFFKEN, D., and EGGELER, G. “Structural fatigue of pseudoelastic NiTi shape memory wires”. *Materials Science and Engineering A*, Vol. 378(1-2 SPEC. ISS.), pp.105–109, 2004.