



**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL  
EM FIOS DE NiTi COM MEMÓRIA DE FORMA  
SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECAÑICOS**

**Arthur Pinheiro Barcelos**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL  
EM FIOS DE NiTi COM MEMÓRIA DE FORMA  
SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECAÑICOS**

**ARTHUR PINHEIRO BARCELOS**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. EDSON PAULO DA SILVA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS  
MECATRÔNICOS**

**Publicação: ENM.DM-137/18**

**Brasília/DF, 16 de março de 2018.**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL  
EM FIOS DE NiTi COM MEMÓRIA DE FORMA  
SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECAÑICOS**

**ARTHUR PINHEIRO BARCELOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM SISTEMAS MECATRÔNICOS.

**Banca Examinadora**

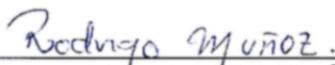


---

**Prof. Dr. EDSON PAULO DA SILVA,**

ENM/FT/UnB

Orientador



---

**Prof. Dr. RODRIGO ARBEY MUNÓZ MENESES,**

FGA/UnB

Examinador interno



---

**Prof. Dr. JORGE LUIZ DE ALMEIDA FERREIRA,**

ENM/FT/UnB

Examinador externo

**Brasília/DF, 16 de março de 2018.**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ARTHUR PINHEIRO BARCELOS

Fadiga funcional e estrutural em fios de NiTi com memória de forma submetidos a ciclos termomecânicos. [Distrito Federal] 2018.

xi, 52p., 210 × 297 mm (ENM/FT/UnB), Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2018  
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. Ligas com memória de forma

2. Fadiga funcional

3. Fadiga estrutural

4. Ciclagem termomecânica

I. ENM/FT/UnB

II. ENM.DM-137/2018

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARCELOS, A.P. (2018). Fadiga funcional e estrutural em fios de NiTi com memória de forma submetidos a ciclos termomecânicos, Publicação ENM.DM-137/2018, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 52p.

## CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Arthur Pinheiro Barcelos.

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Fadiga funcional e estrutural em fios de NiTi com memória de forma submetidos a ciclos termomecânicos.

GRAU / ANO: Mestre / 2018

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.



---

Arthur Pinheiro Barcelos  
barcelosarthur@hotmail.com

## **Agradecimentos**

*Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me abençoar todos os dias e me capacitar para desenvolver este trabalho.*

*Agradeço ao meu orientador, Professor Edson, por mais uma oportunidade de expandir meus conhecimentos na área que me apaixonei.*

*Agradeço também ao meu companheiro de laboratório, Tadeu, com quem passei meses projetando e discutindo todos os pormenores da bancada experimental. Nesse âmbito, agradeço aos técnicos de laboratório do SG-9 e do GRACO que contribuíram com a construção da bancada.*

*Agradeço à Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal (FAP-DF) que financiou este projeto (processo: 0193.001351/2016).*

*Agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de auxílio concedida por meio do PPMEC.*

*Agradeço aos meus familiares, especialmente aos meus pais, Evaldo e Maria do Socorro, e meus irmãos mais velhos, Marlos e Heitor. A família é o bem mais precioso que um ser humano pode ter e eu sei que a minha sempre estará ao meu lado, mesmo quando tudo parecer perdido.*

*Por fim, agradeço à Renata, que me acompanhou com paciência e me aconselhou em cada etapa. É com ela que divido vitórias e alegrias.*

*Arthur Pinheiro Barcelos*

# RESUMO

## FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL EM FIOS DE NiTi COM MEMÓRIA DE FORMA SUBMETIDOS A CICLOS TERMOMECÂNICOS

**Autor: Arthur Pinheiro Barcelos**

**Orientador: Prof. Edson Paulo da Silva**

**Brasília, março de 2018**

As Ligas com Memória de Forma (LMF) apresentam dois comportamentos termomecânicos diferenciados que podem ser explorados para o desenvolvimento de muitas aplicações: o efeito memória de forma e a pseudoelasticidade. O efeito memória de forma é caracterizado por deformações reversíveis originárias de variações de temperatura do material devido a transformações martensíticas termoelásticas. Esse princípio de funcionamento estimula a aplicação de LMF como atuadores, apresentando algumas vantagens em relação a outros atuadores convencionais devido à sua excepcional redução de peso e volume de projetos. A escassez na literatura de métodos definitivos para prever a vida útil do atuador de LMF motiva o estudo de seu comportamento cíclico e fadiga. Os atuadores baseados em ligas com memória de forma podem acumular deformações plásticas e sofrer ruptura, além de perder gradualmente a capacidade de recuperação da forma, conhecida como fadiga funcional, associada às repetidas transformações induzidas por temperatura. Nesse âmbito, a fadiga estrutural e a fadiga funcional de fios NiTi *SmartFlex*® submetidos à transformação de fase martensítica induzida termicamente sob tensão mecânica constante são investigadas. Foram realizados 24 ensaios de ciclagem termomecânica em diferentes condições de aquecimento e resfriamento e sob quatro diferentes níveis de tensão axial. A influência dessas condições de ensaio foram analisadas, a degradação do efeito memória de forma foi visualizada em curvas de evolução da deformação e a fadiga estrutural foi estudada por meio de três diferentes curvas de ajuste: curvas S-N, curvas que relacionam a deformação plástica com a vida em fadiga baseadas nas relações de Coffin-Manson e curvas baseadas no modelo de plano crítico de Smith, Watson e Topper. Conclui-se que o aumento na taxa de aquecimento e resfriamento e na tensão mecânica pode resultar em falha precoce do material. No âmbito de fadiga funcional, as condições estabelecidas nos ensaios resultaram em alteração na deformação recuperável inferior a 1% para o material estudado.

Palavras-chave: Ligas com Memória de Forma, Fadiga Funcional, Fadiga Estrutural, Ciclagem Termomecânica.

# **ABSTRACT**

## **FUNCTIONAL AND STRUCTURAL FATIGUE OF NiTi SHAPE MEMORY WIRES SUBJECTED TO THERMOMECHANICAL CYCLING**

**Author: Arthur Pinheiro Barcelos**

**Supervisor: Prof. Edson Paulo da Silva**

**Brasília, March of 2018**

Shape Memory Alloys (SMA) presents two exceptional thermomechanical behaviors that can be used for development of many applications: shape memory effect and superelasticity. The shape memory effect is characterized by reversible deformation under thermal load due to thermoelastic martensitic transformations. This operation principle encourages the application of SMA as actuators, presenting some advantages over other conventional actuators because of their weight and volume saving. The lack of definite methods for predicting SMA actuator lifetime motivates the study of its cyclic behavior and fatigue. SMA actuators may accumulate plastic deformations and suffer rupture, in addition to gradually losing shape recovery, known as functional fatigue, associated with the repeated thermal induced transformations. The structural thermomechanical fatigue and functional fatigue of NiTi SmartFlex® wires undergoing thermally induced martensitic phase transformation with constant stress are investigated. An amount of 24 thermomechanical cycling tests were performed under different heating and cooling conditions and under four different axial stress levels. The influence of these test conditions was analyzed, the wire strain evolution was evaluated to determine the degradation of shape memory effect and three power law curves were used to fit fatigue failure data: S-N curves, plastic strain versus fatigue life curves based on Coffin-Manson relation, and curves based on the critical plane model of Smith, Watson, and Topper. It can be concluded that the application of high heating/cooling rate and high stress can result in early failure of the material. The test conditions did not imply significant functional fatigue (recoverable strain below 1%).

Key-words: Shape Memory Alloys, Functional Fatigue, Structural Fatigue, Thermomechanical Cycling.

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 MOTIVAÇÃO .....	1
1.2 DESCRIÇÃO DO ESTADO DA ARTE.....	2
1.3 OBJETIVOS .....	4
1.4 METODOLOGIA .....	5
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>6</b>
2.1 FENOMENOLOGIA DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA .....	6
2.2 O COMPORTAMENTO CÍCLICO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA .....	10
2.3 FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA.....	13
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>18</b>
3.1 MATERIAL INVESTIGADO .....	18
3.2 BANCADA DE ENSAIOS TERMOMECÂNICOS .....	20
3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO .....	23
3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE .....	24
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>28</b>
4.1 EVOLUÇÃO DAS DEFORMAÇÕES E FADIGA FUNCIONAL .....	28
4.2 FADIGA ESTRUTURAL .....	38
4.3 INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO.....	42
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>47</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>49</b>

# LISTA DE FIGURAS

1.1	Pistão atuador utilizando ligas com memória de forma.....	2
2.1	Fração Volumétrica de Martensita $\times$ Temperatura (Esquemático) .....	7
2.2	Pseudoelasticidade em LMF, diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$ esquemático.....	8
2.3	O Efeito Memória de Forma (EMF), diagrama $\sigma$ - $\varepsilon$ - $T$ esquemático .....	8
2.4	Ensaio de tração em materiais com memória de forma em diferentes temperaturas .....	9
2.5	Influência da tensão aplicada nas temperaturas de transformação de fase .....	10
2.6	Evolução das temperaturas características de transformação de fase em uma liga NiTi .....	11
2.7	Ciclos térmicos realizados com equipamento DSC .....	11
2.8	Representação do TWSME.....	12
2.9	Termos utilizados no trabalho para definir fadiga em LMF .....	14
2.10	Evolução das deformações de LMF submetidas a ciclos termomecânicos .....	14
2.11	Exemplo de curva S-N de fadiga termomecânica de ligas NiTi.....	15
2.12	Curva $\varepsilon_p \times N_f$ de ensaios termomecânicos para diferentes tratamentos de recozimento da liga NiTiCu .....	16
2.13	Percurso da ciclagem dos ensaios de fadiga (Esquemático).....	17
3.1	Curva de Calorimetria Diferencial de Varredura do material <i>Smartflex</i> <sup>®</sup> como recebido .....	18
3.2	Mudança de resistividade elétrica do material <i>Smartflex</i> <sup>®</sup> ao variar sua temperatura .....	19
3.3	Ensaio de tração de fios <i>Smartflex</i> <sup>®</sup> em condição $T < M_f$ .....	19
3.4	Desenho esquemático da bancada.....	20
3.5	Elementos da bancada .....	21
3.6	Foto aproximada da bancada de ciclagem termomecânica em fios com memória de forma.....	22
3.7	Evolução do deslocamento durante os ensaios de fadiga termomecânica .....	23
3.8	Etapas iniciais do ensaio termomecânico.....	25
3.9	Evolução da deformação do fio atuador em um ciclo termomecânico (Esquemático) .....	27
4.1	Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 125 MPa .....	29
4.2	Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 150 MPa .....	30
4.3	Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 175 MPa .....	31
4.4	Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 200 MPa .....	32
4.5	Evolução das deformações $\varepsilon_A$ e $\varepsilon_M$ em ensaios da série A .....	33
4.6	Evolução das deformações, Série B.....	34
4.7	Evolução das deformações, Série C.....	35
4.8	Evolução das deformações $\varepsilon_A$ e $\varepsilon_M$ em ensaios da série B.....	36
4.9	Evolução das deformações $\varepsilon_A$ e $\varepsilon_M$ em ensaios da série C.....	36
4.10	Variação de <i>EMF</i> nos ensaios .....	38
4.11	Curva S-N da série A .....	39
4.12	Curvas S-N dos ensaios de fadiga termomecânica .....	40
4.13	Relação entre a deformação plástica e a quantidade de ciclos até a falha do material .....	40
4.14	Relação entre o parâmetro $\sigma_{EMF}$ e a quantidade de ciclos até a falha do material .....	41
4.15	Relação entre a corrente aplicada e a quantidade de ciclos até a falha do material.....	42
4.16	Ciclos iniciais dos ensaios termomecânicos com 200 MPa.....	43
4.17	Relação entre a taxa de atuação média e a vida em fadiga.....	44
4.18	Relação entre a taxa de atuação média e a vida em fadiga.....	45

## LISTA DE TABELAS

3.1	Condições dos 24 ensaios realizados.....	23
4.1	Resultados dos ensaios da série A.....	28
4.2	Resultados dos ensaios das séries B e C.....	37
4.3	Medida de dispersão dos valores de vida em fadiga dos ensaios da série A.....	39

# LISTA DE SÍMBOLOS

## Símbolos Latinos

$A$	Área de seção transversal	[m <sup>2</sup> ]
$\hat{A}$	Parâmetro estimativo	
$A_f$	<i>Austenite Finish</i>	[°C]
$A_s$	<i>Austenite Start</i>	[°C]
$a$	Coeficiente de curvas SWT	
$\hat{B}$	Parâmetro estimativo	
$b$	Expoente de curvas SWT	
$d$	Diâmetro	[m]
$EMF$	Deformação recuperável, efeito memória de forma	
$F$	Força	[N]
$K$	Coeficiente de curvas S-N	
$k$	Número de amostras	
$L_{A, inicial}$	Comprimento em fase austenita no primeiro ciclo	[m]
$L_A$	Comprimento em fase austenita	[m]
$L_{M, inicial}$	Comprimento em fase martensita no primeiro ciclo	[m]
$L_M$	Comprimento em fase martensita	[m]
$L_i$	Comprimento inicial	[m]
$M_f$	<i>Martensite Finish</i>	[°C]
$M_s$	<i>Martensite Start</i>	[°C]
$m$	Expoente de curvas S-N	
$N$	Ciclos	
$N_f$	Ciclos até a falha, vida em fadiga	
$S$	Tensão nominal	[N/m <sup>2</sup> ]
$S_a$	Amplitude de tensão nominal	[N/m <sup>2</sup> ]
$T$	Temperatura	[°C]
$t$	Tempo	[s]
$X, Y$	Variáveis genéricas	

## Símbolos Gregos

$\alpha$	Coeficiente de ductibilidade	
$\beta$	Expoente de ductibilidade	
$\Delta$	Variação	
$\varepsilon$	Deformação	
$\varepsilon_p$	Deformação plástica	
$\varepsilon_M$	Deformação em fase martensita	
$\varepsilon_A$	Deformação em fase austenita	
$\varepsilon^\sigma$	Deformação resultante de aplicação de tensão axial	
$\xi$	Fração volumétrica de martensita	
$\sigma$	Tensão de engenharia (axial)	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{max}$	Tensão máxima	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{min}$	Tensão mínima	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{A \rightarrow M}^S$	Tensão de início de transformação de austenita para martensita	[N/m <sup>2</sup> ]

$\sigma_{A \rightarrow M}^f$	Tensão de conclusão de transformação de austenita para martensita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{M \rightarrow A}^S$	Tensão de início de transformação de martensita para austenita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{M \rightarrow A}^f$	Tensão de conclusão de transformação de martensita para austenita	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{MM \rightarrow MD}^S$	Tensão de início de formação de martensita demaçada	[N/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_{MM \rightarrow MD}^f$	Tensão de conclusão de formação de martensita demaçada	[N/m <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Trabalho de atuação por unidade de volume	[J/m <sup>3</sup> ]

## Siglas

DSC	Calorimetria Diferencial de Varredura ( <i>Differential Scanning Calorimetry</i> , do inglês)
EMF	Efeito Memória de Forma
LMF	Liga(s) com Memória de Forma
TWSME	Efeito Memória de Forma Bidirecional ( <i>Two Way Shape Memory Effect</i> , do inglês)

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) possuem uma combinação única de propriedades que diferenciam seu comportamento termomecânico de outras ligas. A capacidade de recuperação de forma e/ou tamanho dessas ligas em até 8% de seu tamanho inicial, observada com a aplicação de temperatura ou tensão, é uma característica atrativa para aplicações de engenharia (Humbreeck, 2001).

Os dois principais processos para recuperação de forma estão associadas às transformações martensíticas dessas ligas: o efeito memória de forma e a pseudoelasticidade. O primeiro acontece quando o material é aparentemente deformado plasticamente (quasiplasticidade) e, quando submetido a um aumento de temperatura, retorna a seu formato inicial. O segundo acontece com o material em fase austenita termodinamicamente estável em uma temperatura específica, permitindo aplicação de tensão mecânica e deformação com recuperação de forma após subsequente alívio (Krishnan *et al.*, 1974).

As ligas com memória de forma, em especial as de NiTi, podem ser utilizadas na medicina como dispositivos biomédicos. Seu comportamento pseudoelástico é muito semelhante às curvas tensão-deformação de materiais biológicos, como tendões e ossos humanos, aliado a sua biocompatibilidade, tornam-se materiais interessantes para uso em procedimentos médicos, garantindo recuperações de pacientes mais rápidas e com menos dores e traumas. As ligas NiTi, conhecidas também como nitinol, já são bastante utilizadas para confeccionar *stents* e instrumentais endodônticos (Duerig *et al.*, 1999; Thompson, 2000).

Na engenharia civil e em projetos de máquinas, elementos com ligas com memória de forma podem ser utilizados como dissipadores de energia, com elevados fatores de amortecimento, devido à histerese dos ciclos pseudoelásticos (Song *et al.*, 2006).

A transformação martensítica induzida pela simples aplicação de temperatura possui diversas aplicações e inspira a criação de patentes, como os componentes atuadores de turbinas de avião ou *morphing chevrons* e os acoplamentos expansíveis de tubos metálicos *Cryofit* para locais confinados ou de difícil acesso (Yamauchi *et al.*, 2011). Esse fenômeno motiva a substituição de atuadores convencionais pneumáticos, hidráulicos e elétricos por atuadores de SMA ativados termicamente.

As principais vantagens de atuadores com memória de forma se encontram em seu trabalho de atuação por unidade de volume muito superior a outros atuadores convencionais, possibilitando a redução de peso em projetos e a utilização em escalas microscópicas, e na grande quantidade de deformação recuperável (Huber *et al.*, 1997; Fumagalli *et al.*, 2009; Rao *et al.*, 2015). A figura (1.1) exemplifica um pistão atuador que utiliza uma mola de liga com memória de forma, um projeto simples de atuador que explora a recuperação de forma dessas ligas.

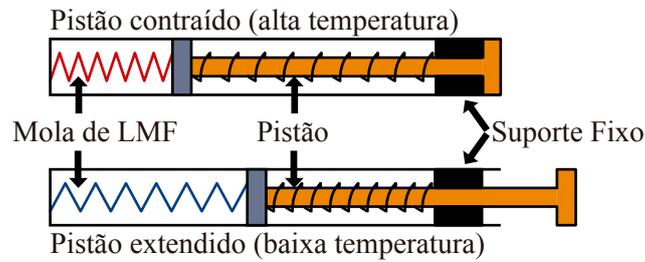


Figura 1.1. Pistão atuador utilizando ligas com memória de forma.

Existem muitas outras aplicações que exploram as transformações martensíticas reversíveis das ligas com memória de forma, o que motiva seu estudo para melhor entender sua fenomenologia, que ainda carece de modelos precisos do seu comportamento termomecânico.

Ao verificar a viabilidade de materiais com memória de forma como atuadores nos mais diversos projetos de engenharia, exige-se investigar o comportamento cíclico desses materiais. Percebe-se que boa parte das aplicações citadas exige que o material utilizado possua uma boa vida útil, uma vez que o processo de transformação martensítica pode ocorrer numerosas vezes. Esses materiais sofrem processos de fadiga após serem submetidos a ciclos térmicos e/ou mecânicos e perdem suas propriedades de recuperação de forma com o passar do tempo de utilização. Para o presente trabalho, enfatiza-se o comportamento das ligas com memória de forma submetidas a ciclos termomecânicos, isto é, quando há variação de temperatura no material sob tensão mecânica constante.

## 1.2 DESCRIÇÃO DO ESTADO DA ARTE

Miyazaki *et al.* (1986) percebem que ciclos termomecânicos aplicados em ligas com memória de forma podem alterar as temperaturas características de mudança de fase, sendo os primeiros autores a explicar profundamente esse tipo de modificação do material devido aos ciclos termomecânicos aplicados. Visualizados por microscopia eletrônica de transmissão, o aparecimento de deslocamentos com o passar dos ciclos é crucial na alteração das temperaturas de transformação de fase, uma vez que gera campos de tensão locais.

Humbeeck (1991) sugere que a vida útil de um material com memória de forma submetido a ciclos não está apenas relacionada à fadiga clássica de falha estrutural. Com aplicação de ciclos termomecânicos, é possível verificar alterações nas temperaturas de mudança de fase, defeitos microestruturais ou a degradação do efeito memória de forma. Motivado por essa sugestão, Araújo *et al.* (1997) analisa experimentalmente a fadiga e degradação de propriedades de fios de liga TiNiCu submetidos a ciclos termomecânicos, observando que o aumento na tensão mecânica gera aumento na deformação plástica do material ensaiado.

McCormick e Liu (1994) verificam o aumento da densidade de deslocamentos e visualizam a alteração de temperaturas características, principalmente a diminuição de  $M_s$  (temperatura de início de formação de martensita no resfriamento), em uma liga NiTi submetida a ciclos térmicos e mecânicos (pseudoelásticos). Em ciclos termomecânicos, ou seja, variações de temperatura com tensão mecânica

constante aplicada, o autor visualiza um acúmulo de martensita residual retida na fase austenita termodinamicamente estável no decorrer da ciclagem, fato também observado futuramente por Miller e Lagoudas (2000).

O aparecimento de deformações plásticas irreversíveis é inevitável em ligas com memória de forma submetidas a ciclos de transformação de fase, sejam eles ciclos térmicos ou mecânicos. Bo e Lagoudas (1999) aproveitam os estudos de *training* por transformação de fase induzida termicamente para descrever o comportamento cíclico de ligas com memória de forma. Até então, os estudos sobre *training* eram focados na estabilização do *two-way shape memory effect* (TWSME) (Hebda e White, 1995), mas sem o intuito de verificar a evolução das deformações plásticas induzidas. Experimentalmente, Bo e Lagoudas (1999) visualizam o aumento de deformações plásticas concomitante ao aumento dos ciclos termomecânicos, buscando comparar o resultado experimental com um modelo proposto de evolução de deformações plásticas.

O estudo de comportamento cíclico de metais remete a análises de fadiga. Morgan e Friend (2001) citam Humbeeck (1991), propondo que a definição de fadiga para ligas com memória de forma se divide em três: a fadiga que resulta em fratura do material, por meio de ciclos controlados de tensão mecânica ou deformação; alterações em propriedades mecânicas, térmicas ou de memória de forma por meio de ciclos termomecânicos; alterações em propriedades mecânicas, térmicas ou de memória de forma por meio de ciclos mecânicos.

Eggler *et al.* (2004) dividem a fadiga em materiais com memória de forma em fadiga estrutural e fadiga funcional, sendo os autores precursores do termo fadiga funcional. Quando um material é submetido a ciclos mecânicos, a iniciação e propagação de trincas no material caracteriza a fadiga estrutural clássica de materiais; nas ligas com memória de forma, a degradação da pseudoelasticidade ou do efeito memória de forma caracteriza a fadiga funcional, mesmo que não se verifique qualquer indício de iniciação de trincas. Para Hornbogen (2004), de fadiga estrutural se entende a fadiga que, após ciclos mecânicos, apresenta defeitos ou falhas na microestrutura do material; por outro lado, de fadiga de memória de forma se entende a perda crescente de capacidade de memória de forma, ou a perda, em materiais pseudoelásticos, da capacidade de dissipação de energia ou, ainda, a alteração nas temperaturas características de mudança de fase.

Genericamente, Lagoudas *et al.* (2009) utilizam o termo fadiga termomecânica para definir ciclos térmicos com tensão constante que culminam em falhas estruturais ou perdas de características funcionais do material. Especificamente, o termo fadiga de atuação é utilizado para tratar da fadiga por ciclos termomecânicos que analisam a degradação do efeito memória de forma. Os autores utilizam corpos de prova com diferentes tratamentos térmicos de recozimento para serem submetidos a testes de fadiga termomecânica com tensão mecânica axial constante, verificando a perda de deformação útil de transformação, e a vida em fadiga dos materiais. Bertacchini *et al.* (2009) usam a mesma metodologia em seus ensaios, comparando corpos de prova em ambiente corrosivo com corpos de

prova em condições livres de corrosão, concluindo que a vida em fadiga diminui em ambiente corrosivo.

A recuperação de forma apresenta mudanças com aplicação de ciclos termomecânicos, onde se observa alteração de todas as temperaturas de transformação de fase, alteração do calor latente de transformação de fase e mudança no laço de histerese (Jones e Dye, 2011; Pelton *et al.*, 2012), mas em níveis diferenciados, a depender do tratamento térmico adotado na liga, da sua composição e da tensão mecânica aplicada no material (Li *et al.*, 2009; Benafan *et al.*, 2014).

Ramaiah *et al.* (2011) realizam ensaios em fios de liga NiTi submetidos a ciclos térmicos com tensão mecânica constante e examinam a superfície da seção transversal dos corpos de prova para avaliar o mecanismo de falha envolvido e a direção de propagação das trincas. Zhang *et al.* (2016) também visualiza a fratura da seção transversal de fios de NiTi em ensaios de mesma natureza, além de realizar uma intensa análise de probabilidade com 70 corpos de prova.

Mammano e Dragoni (2011, 2014) avaliam experimentalmente a fadiga funcional e estrutural de fios de NiTi em quatro condições: tensão constante, deformação constante, tensão constante com deformação limitada e variando a tensão e deformação linearmente. Mais tarde, Mammano e Dragoni (2015) também avaliam o efeito da tensão mecânica aplicada, da taxa de aquecimento do fio atuador e do grau de transformação martensítica.

A vida à fadiga estrutural de ligas com memória de forma submetidas a ciclos termomecânicos pode ser estudada através de curvas convencionais de fadiga, como as curvas S-N modificadas e as relações de Coffin-Manson de fadiga de baixo ciclo (Lagoudas *et al.*, 2009; Agboola *et al.*, 2012; Zhang *et al.*, 2016) ou os modelos baseados nos parâmetros de Smith-Watson-Topper (Calhoun *et al.*, 2015; Mahtabi *et al.*, 2015; Wheeler e Lagoudas, 2017).

### 1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é avaliar as consequências da ciclagem termomecânica em fios atuadores de NiTi em relação às fadigas funcional e estrutural do material.

Nos objetivos específicos do trabalho, busca-se compreender:

- A evolução das deformações máxima e mínima e da deformação recuperável dos fios ensaiados.
- A fadiga estrutural dos corpos de prova submetidos a ciclos termomecânicos através de curvas S-N modificadas, curvas  $\epsilon_p \times N$  baseadas nas relações de Coffin-Manson e curvas baseadas no modelo de Smith, Watson e Topper;
- A influência da carga mecânica (tensão) na vida em fadiga do material;
- A influência da taxa de aquecimento/resfriamento na vida em fadiga do material.

## 1.4 METODOLOGIA

O comportamento cíclico de fios NiTi *SmartFlex*<sup>®</sup> de 0,15 mm de diâmetro com 54% de Níquel é avaliado quanto à fadiga funcional e quanto à fadiga estrutural em um trabalho de natureza experimental. A fadiga funcional é analisada em curvas que apresentam a evolução das deformações dos fios ensaiados, onde se visualiza a variação do efeito memória de forma. A fadiga estrutural é analisada por meio de três curvas: curvas S-N, curvas que relacionam a deformação plástica com a vida em fadiga e curvas baseadas no modelo de plano crítico de Smith, Watson e Topper. A norma ASTM *Standard* E-739-10 (2015) regulamenta o levantamento das curvas de ajuste de fadiga estrutural.

Os dados para o levantamento dessas curvas são obtidos por meio de 24 ensaios de fadiga em ciclos termomecânicos, variando a temperatura do fio sob carga mecânica constante. Os ensaios de fadiga termomecânica são realizados em aparato experimental adequado, capaz de aquecer e resfriar ciclicamente o fio testado até sua ruptura. O aquecimento é feito por meio de aplicação de corrente elétrica no fio (efeito *Joule*) e o resfriamento é feito por convecção forçada.

O resultado dos ensaios é comparado com resultados da literatura, principalmente com os resultados encontrados por Mammano e Dragoni (2014), que realizam ensaios de fadiga termomecânica com o mesmo material estudado.

## 1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação é composta por cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica de ligas com memória de forma, sua fenomenologia de transformação martensítica e seu comportamento cíclico, além de revisar o conteúdo de fadiga estrutural termomecânica e fadiga funcional da literatura. O terceiro capítulo, denominado materiais e métodos, especifica o material utilizado nos ensaios, apresenta a descrição da bancada de ensaios de fadiga termomecânica, detalha as condições designadas em cada ensaio e apresenta o procedimento de análise dos resultados. O quarto capítulo apresenta e discute os resultados dos ensaios de fadiga, com curvas de evolução das deformações nos fios atuadores e curvas de ajuste de fadiga estrutural, além de abordar a influência da taxa de aquecimento e resfriamento dos fios. Por fim, o quinto capítulo apresenta as conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 FENOMENOLOGIA DE TRANSFORMAÇÃO DE FASE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Ligas com Memória de Forma (LMF) possuem uma capacidade de recordar tratamentos termomecânicos a que foram submetidas previamente. De forma mais específica, as LMF são capazes de passar por transformações de fase reversíveis, através da aplicação de campos de tensão mecânica ou gradiente de temperatura, e lembrar tamanho e/ou forma preliminares. A mudança de estrutura cristalina ocorre entre a fase austenita, fase de temperatura mais alta, e as variantes de martensita, conhecida como transformação martensítica termoelástica, transformação fundamental para descrever o comportamento único de recuperação de forma das LMF (Lexcelent, 2013).

Nas ligas metálicas em geral, a transformação martensítica ocorre sem difusão a partir da fase austenita. O que é característico na transformação martensítica das LMF, diferentemente de outros metais, é o processo de transformação de fase reversível entre austenita e martensita. Nessas ligas, enquanto diminui-se a temperatura, é possível constatar a estrutura do material formando e crescendo lamelas de martensita continuamente e, no processo reverso, o aumento de temperatura causa o desaparecimento contínuo dessas lamelas (Delaey *et al.*, 1974).

As duas fases cristalinas, austenita e martensita, possuem propriedades materiais diversas, o que chama atenção nas aplicações de engenharia, uma vez que uma mesma peça ou estrutura composta desses materiais pode apresentar características versáteis e mutáveis com a alteração da estrutura cristalina. Nota-se que a mudança de temperatura e/ou a aplicação de carga mecânica são responsáveis pela alteração na estrutura cristalina das ligas. A fase martensítica possui diversas variantes que podem ser agrupadas de duas maneiras: a martensita maclada, também chamada de autoacomodada, e a martensita demaçada, também chamada de martensita reorientada, que é uma variante que acompanha a direção da carga aplicada na liga (Krishnan *et al.*, 1974, Lagoudas, 2008).

Observam-se duas transformações martensíticas: induzida termicamente e induzida mecanicamente. Resfriando gradativamente o material, partindo da fase austenita, a estrutura cristalina começa a se tornar martensita; ao aquecê-lo, partindo da fase martensita, a estrutura cristalina começa a se tornar austenita. Ao aplicar tensão mecânica adequada ao material, é possível alterar a estrutura cristalina de austenita para martensita demaçada, isto é, uma variante de martensita que é reorientada na direção da carga aplicada; por outro lado, apesar de não sugerir uma transformação de fase, uma LMF em fase termodinamicamente estável martensita maclada, ou seja, não orientada por tensão, pode se tornar martensita demaçada com aplicação de carga mecânica (Humbeeck, 2001, Lagoudas, 2008).

A figura (2.1) apresenta o esquemático da transformação martensítica induzida termicamente. A transformação martensítica direta ocorre durante o resfriamento da liga. Trata-se da transformação de fase de austenita para martensita, que se inicia em temperatura  $M_s$  (*Martensite start*) e completa a transformação de fase em temperatura inferior, denominada  $M_f$  (*Martensite finish*). De forma semelhante, a transformação martensítica reversa ocorre durante o aquecimento da liga, onde a liga se transforma de martensita para austenita, iniciando em temperatura  $A_s$  (*Austenite start*) e finalizando a transformação em uma temperatura superior, denominada  $A_f$  (*Austenite finish*). O percurso de ida e volta da transformação martensítica não ocorre da mesma maneira, visto que as temperaturas  $M_f$ ,  $M_s$ ,  $A_s$  e  $A_f$  se diferem, e isso justifica a presença de uma histerese térmica. A figura (2.1) mostra a evolução de fração volumétrica de martensita ( $\xi$ ) percorrendo as temperaturas características de transformação de fase citadas anteriormente (Humbeeck, 2001).

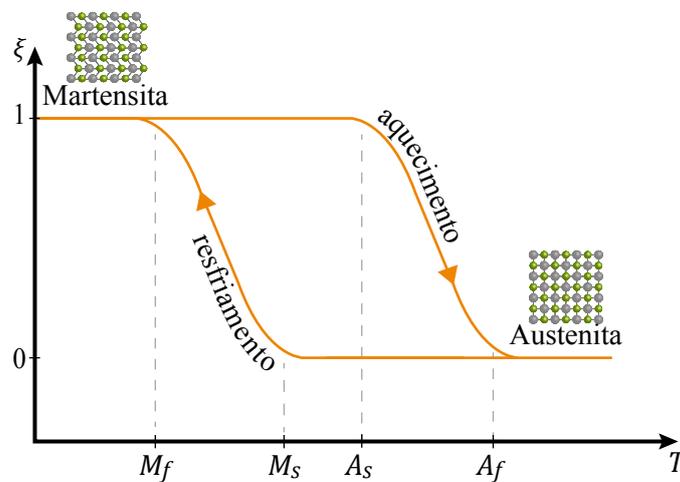


Figura 2.1. Fração Volumétrica de Martensita  $\times$  Temperatura (Esquemático).

Quando uma LMF se encontra em temperatura maior que  $A_f$ , temperatura em que a fase austenita é termodinamicamente estável, é possível visualizar o fenômeno da pseudoelasticidade (às vezes chamado de superelasticidade), que ocorre com aplicação e subsequente alívio de tensão mecânica na liga com recuperação de forma, isto é, na transformação de fase induzida por tensão. Nessa condição, ao aplicar carga mecânica no material, até um nível de tensão específico, inicia-se a formação de martensita demaçada, orientada na direção da aplicação da carga, vide o diagrama tensão-deformação ( $\sigma \times \epsilon$ ) da Fig. (2.2). O alívio da tensão retorna todo o material à sua forma inicial, com desprezíveis deformações plásticas (Delaey *et al.*, 1974, Miyazaki *et al.*, 1981) O prefixo pseudo sugere que a aplicação e subsequente alívio de tensão na liga ocorre diferentemente de outros materiais com comportamento elástico, já que apresenta um laço de histerese no diagrama tensão-deformação.

Na transformação induzida por tensão direta, o material inicia a transformação de austenita para martensita ao alcançar a tensão de indução  $\sigma_{A \rightarrow M}^S$ , completando a transformação em  $\sigma_{A \rightarrow M}^f$ . Por outro lado, o material inicia a transformação de martensita para austenita no alívio de tensão ao alcançar  $\sigma_{M \rightarrow A}^S$ , completando a transformação em  $\sigma_{M \rightarrow A}^f$ .

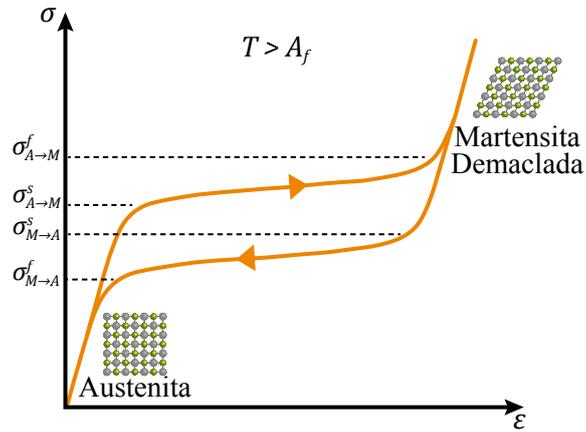


Figura 2.2. Pseudoelasticidade em LMF, diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  esquemático.

Caso o material receba tensão mecânica enquanto sua temperatura se encontra menor que  $M_f$ , seu comportamento será distinto da pseudoelasticidade. O material em estado martensítico passará a formar martensita demaçada, iniciando sua formação em  $\sigma_{MM \rightarrow MD}^s$  e finalizando em  $\sigma_{MM \rightarrow MD}^f$ , orientada na direção da carga mecânica aplicada e, caso aconteça o alívio da carga, o material apresentará, aparentemente, uma deformação plástica (quasiplasticidade), persistindo em martensita demaçada. Essa deformação pode ser recuperada através do aquecimento da liga e total formação de austenita. Tal aquecimento garantirá recuperação de forma e tamanho prévios do material. A esse tipo de recuperação de forma, dá-se o nome Efeito Memória de forma (EMF), vide Fig. (2.3) (Krishnan *et al.*, 1974, Humbeek, 2001).

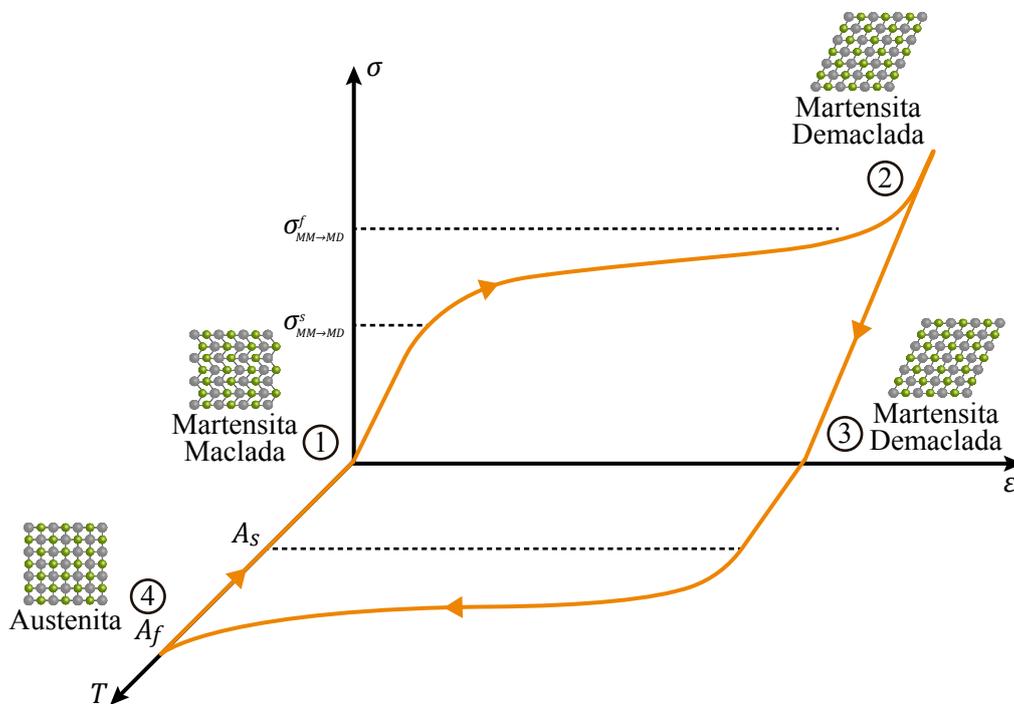


Figura 2.3. O Efeito Memória de Forma (EMF), diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$ - $T$  esquemático.

Na figura (2.3), o ponto 1 indica o material em estado martensítico que inicialmente recebe uma carga mecânica até 2 e se torna martensita demaada, depois é aliviado até o ponto 3. O material é aquecido acima de  $A_f$  (ponto 4), recupera sua forma e pode regredir, por meio de resfriamento, ao ponto 1 novamente.

Miyazaki *et al.* (1981) realiza uma coleção de ensaios de tração em um material com memória de forma em diferentes temperaturas. A figura (2.4) mostra alguns dos ensaios, onde se verifica que em temperaturas mais baixas o material tende a se comportar quasiplasticamente e em temperaturas mais altas, pseudoelasticamente. O autor, ao aquecer os materiais que possuem comportamento quasiplástico, consegue retomar o tamanho inicial, evidenciando o efeito memória de forma.

Tamura *et al.* (1995) percebem experimentalmente que as temperaturas características de transformação de fase se alteram linearmente com a aplicação de tensão, como sugere a relação de Clausius-Clapeyron. Uma carga mecânica modifica e estabiliza a estrutura martensítica, levando a um aumento nas temperaturas de transição.

O gráfico que relaciona tensão e temperatura é útil para visualizar os percursos que o material pode realizar e suas conseqüentes mudanças de fase cristalina, devido às transformações martensíticas, seja induzida por temperatura ou induzida por tensão. Na figura (2.5), Fumagalli *et al.* (2009) encontra uma inclinação de  $\Delta\sigma/\Delta T = 8,2 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$  para o material NiTi *SmartFlex*<sup>®</sup>.

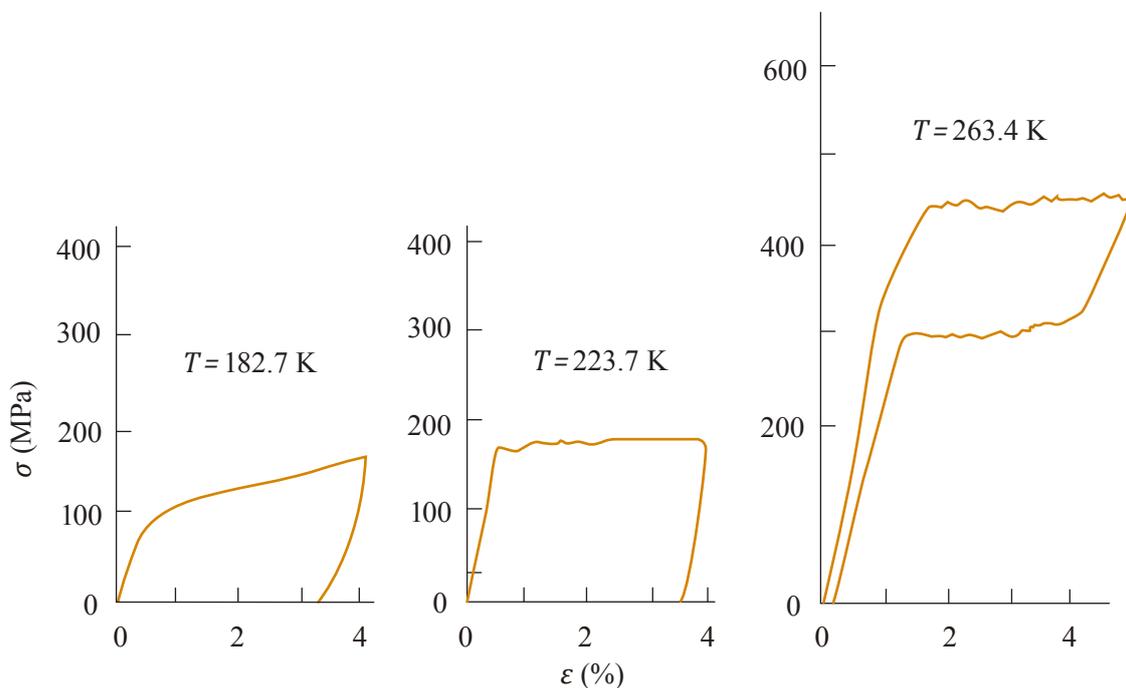


Figura 2.4. Ensaio de tração em materiais com memória de forma em diferentes temperaturas (Miyazaki *et al.*, 1981).

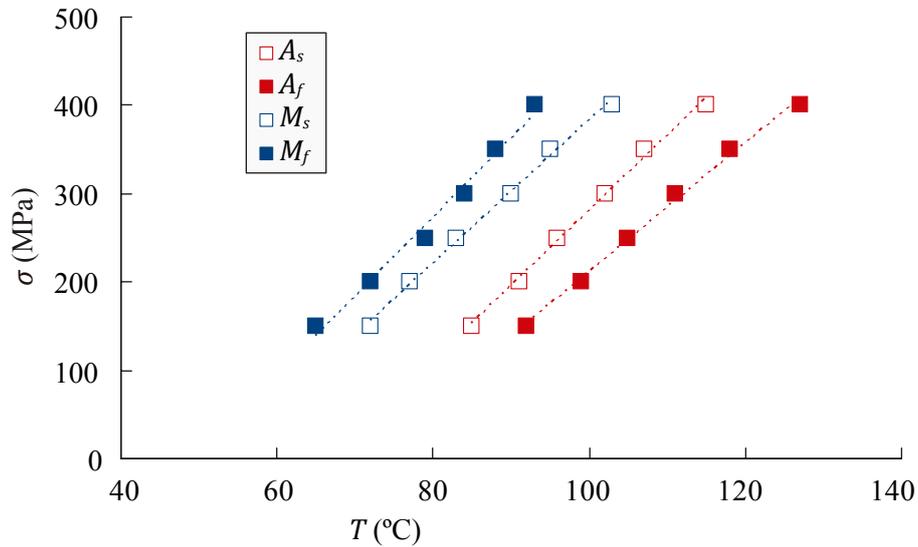


Figura 2.5. Influência da tensão aplicada nas temperaturas de transformação de fase (Fumagalli *et al.*, 2009)

## 2.2 O COMPORTAMENTO CÍCLICO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Até agora, descreveu-se a teoria de LMF e o comportamento das LMF quando submetidas a alguma tensão mecânica ou gradiente de temperatura. A reincidência cíclica das transformações martensíticas é objeto de estudo no uso das LMF como atuadores, uma vez que suas aplicações exigem que o material transforme de fase muitas vezes durante a sua vida útil.

As consequências da ciclagem puramente térmica, puramente mecânica ou termomecânica em ligas com memória de forma já foram observadas com frequência na literatura. Em linhas gerais, percebe-se a diminuição nas temperaturas características e no calor latente de mudança de fase, as alterações no laço de histerese térmica (deformação-temperatura), a degradação do efeito memória de forma, e a própria falha mecânica conduzida pela evolução de deformações plásticas no material com o passar dos ciclos (Mahtabi, *et al.*, 2015).

A ciclagem em LMF pode gerar acúmulo de martensita residual retida na fase austenita termodinamicamente estável e aparecimento de deslocamentos na microestrutura do material (Miyazaki *et al.*, 1986; McCormick e Liu, 1994; Miller e Lagoudas, 2000). As diversas ocorrências na estrutura do material com a ciclagem explicam algumas alterações nas propriedades físicas do material. As temperaturas de transformação de fase, o calor latente de transformação de fase são propriedades que tendem a diminuir com o passar dos ciclos (Pelton *et al.*, 2012).

A figura (2.6) apresenta a evolução das temperaturas de transformação de fase em uma liga NiTi ao executar ciclos térmicos de tensão nula. A figura (2.7), de forma semelhante, apresenta o resultado de 100 ciclos térmicos realizados em equipamento DSC (Calorimetria Diferencial de Varredura), evidenciando a diminuição no calor latente e temperaturas de transformação de fase.

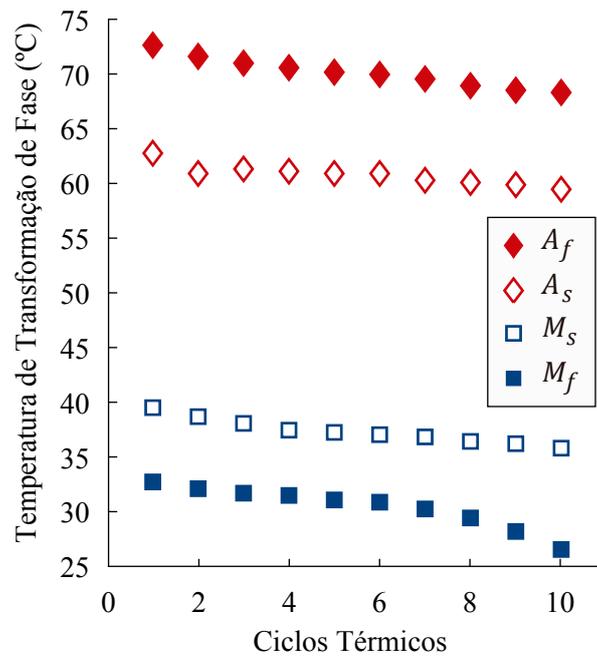


Figura 2.6. Evolução das temperaturas características de transformação de fase em uma liga NiTi (Silva *et al.*, 2017).

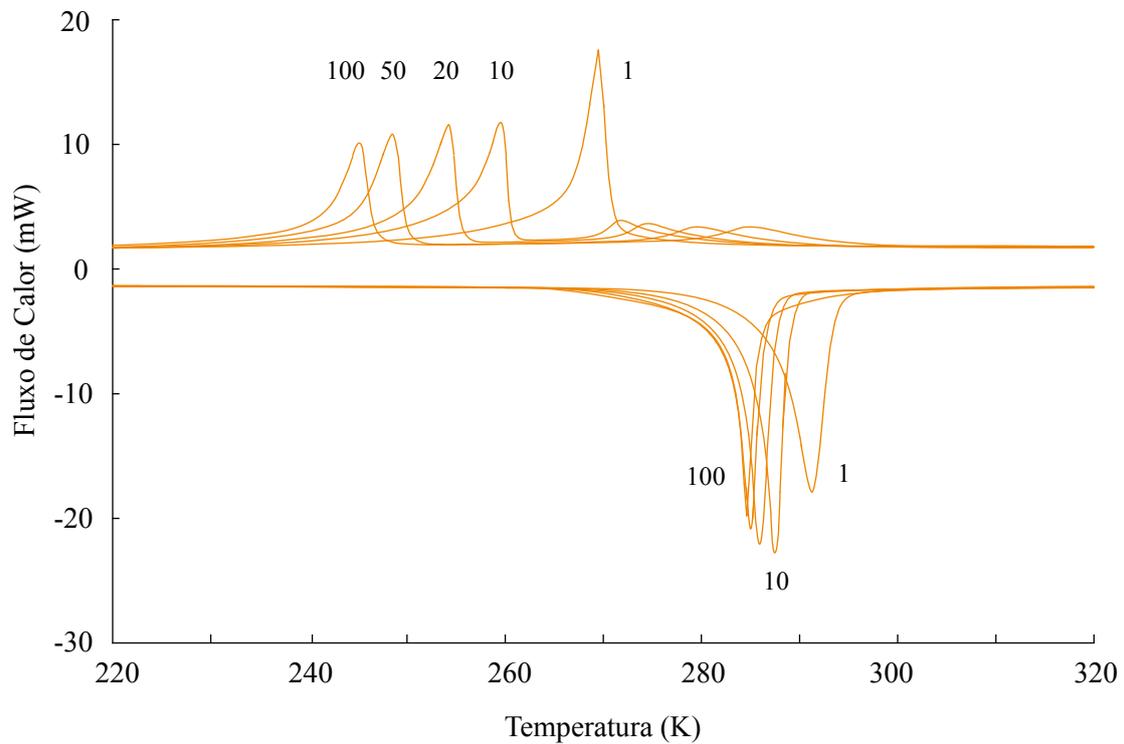


Figura 2.7. Ciclos térmicos realizados com equipamento DSC, endotérmico para baixo (Pelton *et al.*, 2012).

As ligas com memória de forma podem apresentar mudanças de forma e tamanho repetidas vezes, submetidas a ciclos térmicos e com uma tensão mecânica constante (até mesmo nula), em um comportamento conhecido como *two-way shape memory effect* (TWSME), em que se procura a memorização de apenas duas formas distintas e bem definidas, uma delas quando o material se encontra em fase martensita e a outra em fase austenita. Para apresentar o TWSME, a liga precisa passar por um processo de *training*, que nada mais é do que exposição cíclica da liga a um caminho específico de aquecimento e resfriamento, para estabilizar o laço de histerese. Também é possível treinar a liga, em temperaturas acima de  $A_f$  e estabilizar o comportamento pseudoelástico (Contardo e Guénin, 1990).

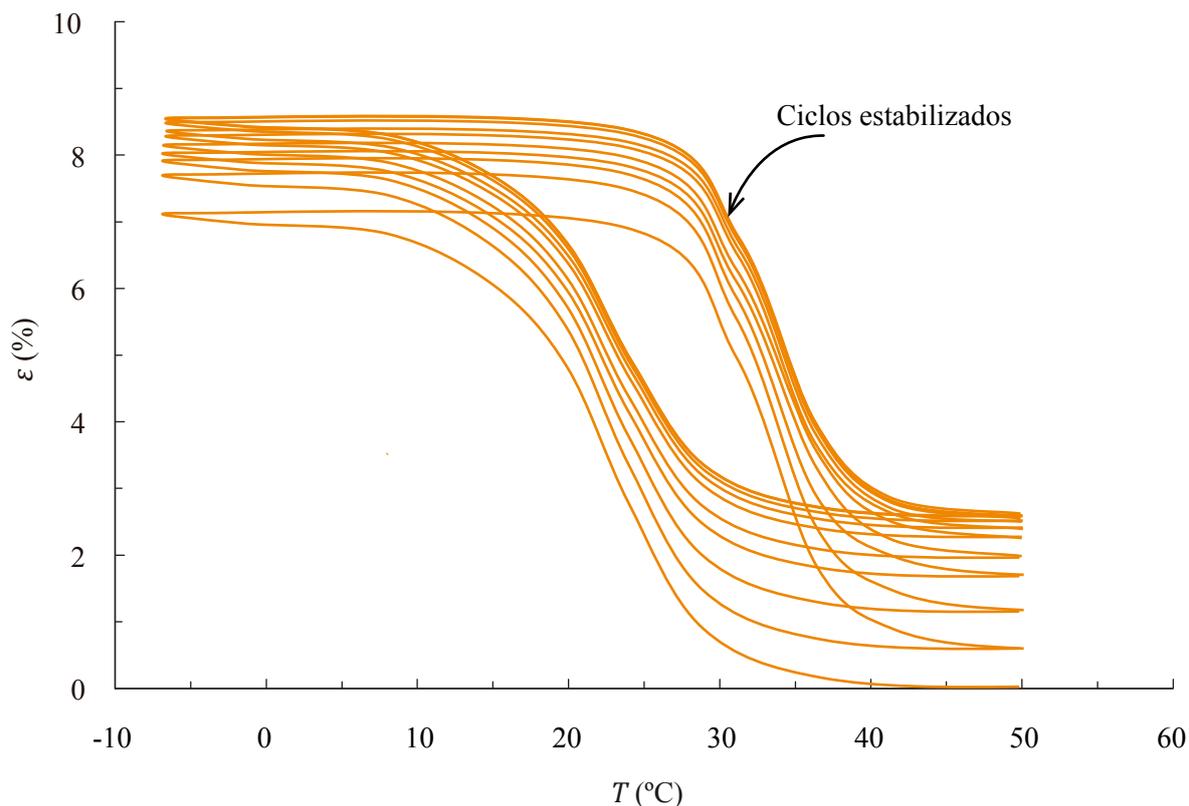


Figura 2.8. Representação do TWSME, evidenciando o laço de histerese estabilizado com o passar dos ciclos (Miller e Lagoudas, 2000).

Em resumo, o TWSME corresponde à introdução de defeitos na estrutura que facilitam o material a optar por uma variante de martensita preferida, estabilizando o laço de histerese, como se vê na Fig. (2.8). Para uso em aplicações, é interessante que o laço de histerese térmica seja estável, mas para Perkins e Muesing (1983) e Hornbogen (2002) a utilização do *training* pseudoelástico ou de TWSME pode ser considerada uma etapa inicial para a fadiga do material com memória de forma, já que introduz tensões locais na microestrutura.

## 2.3 FADIGA FUNCIONAL E ESTRUTURAL DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

Falhas por fadiga podem ser inesperadas e imprevisíveis. Segundo Stephens *et al.* (2001), essas falhas constituem entre 50% a 90% das falhas mecânicas. No geral, a fadiga é um fenômeno complexo e de característica estatística, que depende de diversos fatores, desde fatores ambientais e condição de carregamento, até os processos de fabricação, material e geometria da peça ou estrutura analisada (Stephens *et al.*, 2001)

Fadiga se refere à modificação de propriedades de metais e outros materiais pela aplicação de ciclos de tensão ou deformação mecânica, que podem resultar em futura fratura (Bathias e Pineau, 2010). Em linhas gerais, quando o material é submetido a altas tensões, tende a falhar mais rapidamente, verificando significativas deformações plásticas, o que se denomina fadiga de baixo ciclo. Na fadiga de alto ciclo, a solitação é de carga mais baixa, permitindo que o material dure por mais tempo, predominando deformações elásticas no lugar de deformações plásticas (Bathias e Pineau, 2010; Dowling, 2013).

Para a maioria dos autores, a falha por fadiga se refere a ciclos mecânicos de tensão ou deformação (Stephens *et al.*, 2001; Bathias e Pineau, 2010; Dowling, 2013). No entanto, Sehitoglu (1992) se preocupa também com a ciclagem térmica ou termomecânica em metais, principalmente em altíssimas temperaturas, próximas às temperaturas de fluência. Para o autor, a fadiga, quando isotérmica, pode ser dividida em fadiga de baixo ciclo ou alto ciclo, mas quando se trata da fadiga relacionada a ciclos térmicos, divide-as em fadiga térmica: ciclos de variação de temperatura sem aplicação de tensão mecânica; e fadiga termomecânica: ciclos térmicos com aplicação de tensão mecânica, que pode ser também cíclica ou constante. A fadiga por ciclos termomecânicos e a fadiga de baixo ciclo são muito similares, pela presença contundente de deformações plásticas.

Para o presente trabalho, o termo ciclagem termomecânica será utilizado para denominar a ciclagem em que há variação de temperatura com carga mecânica constante. Por ciclagem térmica se entende a ciclagem sob carga mecânica nula. A ciclagem mecânica é caracterizada pelas variações de tensão mecânica. Em LMF, as ciclagens pseudoelásticas são exemplo de ciclagem puramente mecânica com temperatura constante. O diagrama apresentado na Fig. (2.9) resume a nomenclatura que será utilizada no decorrer do trabalho.

O termo fadiga funcional é utilizado para definir a evolução das deformações do material com memória de forma nas fases martensita e austenita, e subsequente perda do efeito memória de forma. Por fadiga termomecânica estrutural, entende-se a falha do material por meio de aplicação de ciclos de variação de temperatura, recebendo tensão mecânica nominal constante durante o processo, até que o material rompa por completo (Eggleter *et al.*, 2004). Esses termos também estão inclusos no diagrama da Fig. (2.9).

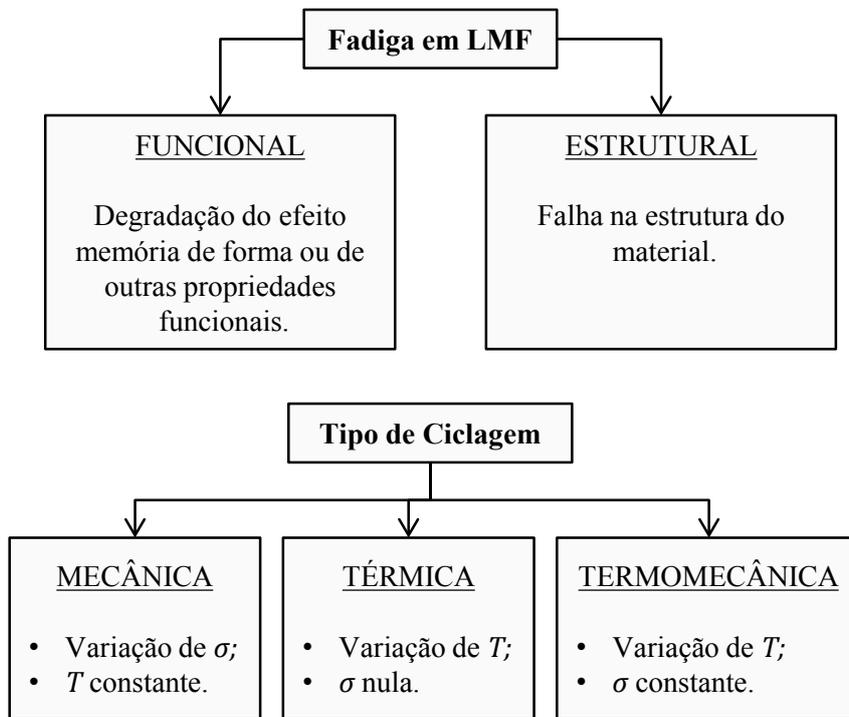


Figura 2.9. Termos utilizados no trabalho para definir fadiga em LMF.

A figura (2.10) retrata a fadiga funcional de LMF submetidas a ciclos termomecânicos,  $N$ , por meio da evolução das deformações no material. A curva  $\varepsilon_M$  define o pico máximo de deformação do fio em cada ciclo quando em temperatura inferior a  $M_f$ . A curva  $\varepsilon_A$  define o valor mínimo de deformação do fio quando em temperatura superior a  $A_f$ . A curva  $EMF$  representa a deformação recuperável do fio, diferença entre a deformação em austenita e a deformação em martensita, que exibe a degradação do efeito memória de forma em função da ciclagem.

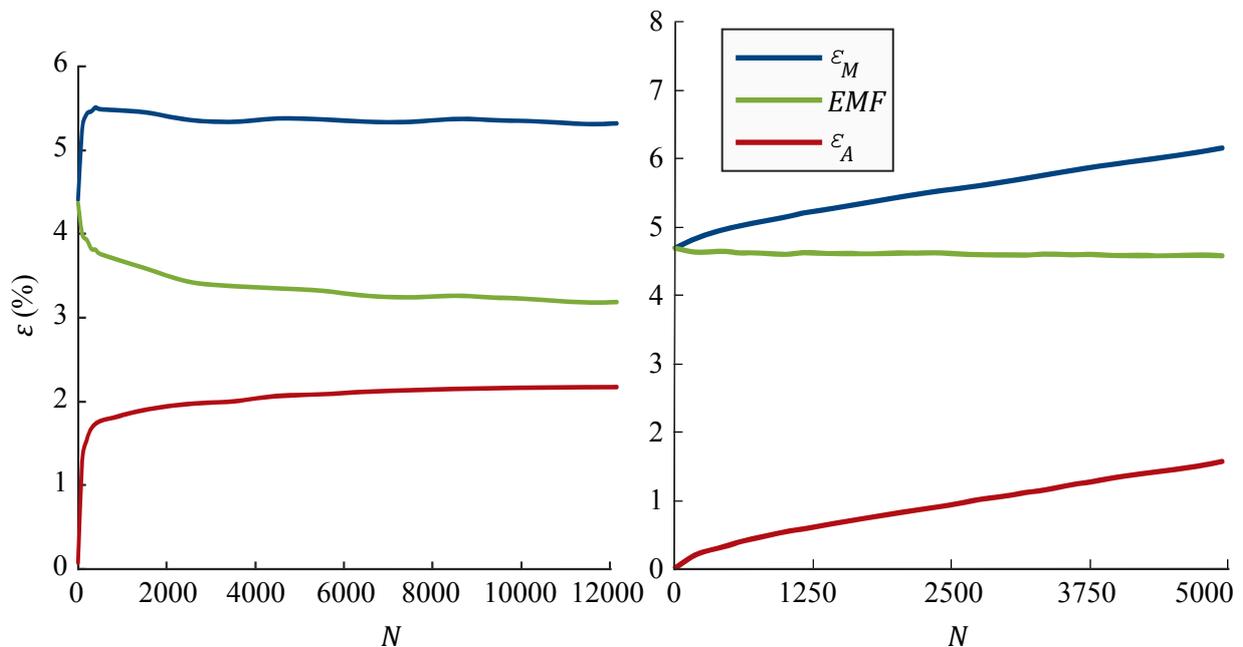


Figura 2.10. Evolução das deformações de LMF submetidas a ciclos termomecânicos. Esquerda: fadiga funcional de TiNiCu com 54 MPa de Bertacchini *et al.* (2009). Direita: fadiga funcional de NiTi *SmartFlex*<sup>®</sup> com 200 MPa de Mammano e Dragoni (2014).

Empiricamente, Wöhler (1860) levantou os dados de fadiga de eixos ferroviários em flexão, originando as curvas S-N. As curvas S-N configuram o método mais simples de verificar a fadiga de metais, controlado pelas tensões mecânicas nominais aplicadas,  $S$ , geralmente em fadiga de alto ciclo, que possui fácil aplicação e uma vasta coleção de dados já determinados na literatura para metais em geral. Trata-se de levantamentos estatísticos de curvas que relacionam a amplitude de tensão utilizada, equivalente à metade da diferença entre tensões máxima e mínima, e o número de ciclos até a falha,  $N_f$  (Stephens *et al.*, 2001; Dowling, 2013).

Normalmente, ensaios de tensão mecânica cíclica variam a tensão entre  $\sigma_{max}$  e  $\sigma_{min}$ . Portanto, é mais comum que se utilize a amplitude de tensão,  $S_a$ , em curvas S-N tradicionais de ciclos mecânicos, pois expressam melhor as condições de ciclagem mecânica (Dowling, 2013), vide Eq. (2.1).

$$S_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}. \quad (2.1)$$

No contexto de fadiga termomecânica de ligas com memória de forma, vários autores já desenvolveram curvas S-N de fadiga, mesmo que em ciclos termomecânicos, estabelecendo a relação entre a tensão nominal aplicada no corpo de prova ensaiado e o número de ciclos termomecânicos de completa transformação martensítica. É importante que a transformação martensítica direta e reversa se dê completamente para cada ciclo. A figura (2.11) exemplifica um levantamento em conformidade com a proposta de curva S-N.

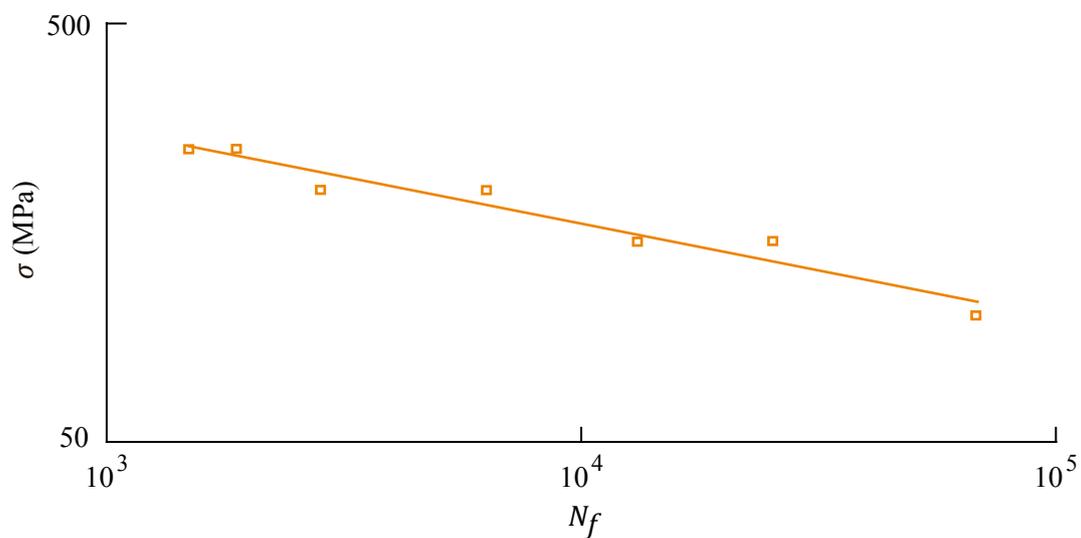


Figura 2.11. Exemplo de curva S-N de fadiga termomecânica de ligas NiTi (Agboola *et al.*, 2012).

Diferentemente das curvas S-N tradicionais, o termo de tensão em ciclos termomecânicos de transformação de fase em LMF não considera a amplitude de tensão aplicada, mas sim a tensão de engenharia externa aplicada ( $\sigma$ ), que é constante durante todo o ensaio. Para ensaios de ciclagem termomecânica em LMF, a tensão nominal é equivalente à tensão de engenharia, constante durante todo o ensaio, conforme apresenta a Eq. (2.2). A tensão nominal ( $S$ ) de ensaios de tensão axial é igual em qualquer ponto do corpo de prova.

$$S = \sigma. \quad (2.2)$$

A tensão axial pode ser calculada através da Eq. (2.3), onde  $A$  representa a área da seção transversal do fio e  $F$  representa a força axial aplicada.

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (2.3)$$

A ciclagem termomecânica em LMF resulta em acúmulo de uma quantidade de deformação irrecuperável conforme os ciclos transcorrem. Por essa razão, a fadiga termomecânica das LMF se assemelha à fadiga de baixo ciclo em metais convencionais. Macroscopicamente, a fadiga de baixo ciclo é caracterizada pelo surgimento de deformação plástica ciclo a ciclo, condição que facilita a ocorrência de falha no material muito mais cedo do que em condições onde a ciclagem envolve apenas deformações elásticas, isto é, na fadiga de alto ciclo (Schijve, 2009).

A relação de Coffin-Manson é a mais utilizada em fadiga de baixo ciclo. Coffin (1954) e Manson (1953) foram capazes de estabelecer, independentemente, uma relação entre o número de ciclos até a falha, melhor expresso em reversões até a falha, e a amplitude de deformação plástica durante o ensaio de fadiga. A figura (2.12) mostra uma curva que expõe essa relação em ensaios de fadiga termomecânica em corpos de prova de NiTiCu (Lagoudas *et al.*, 2009).

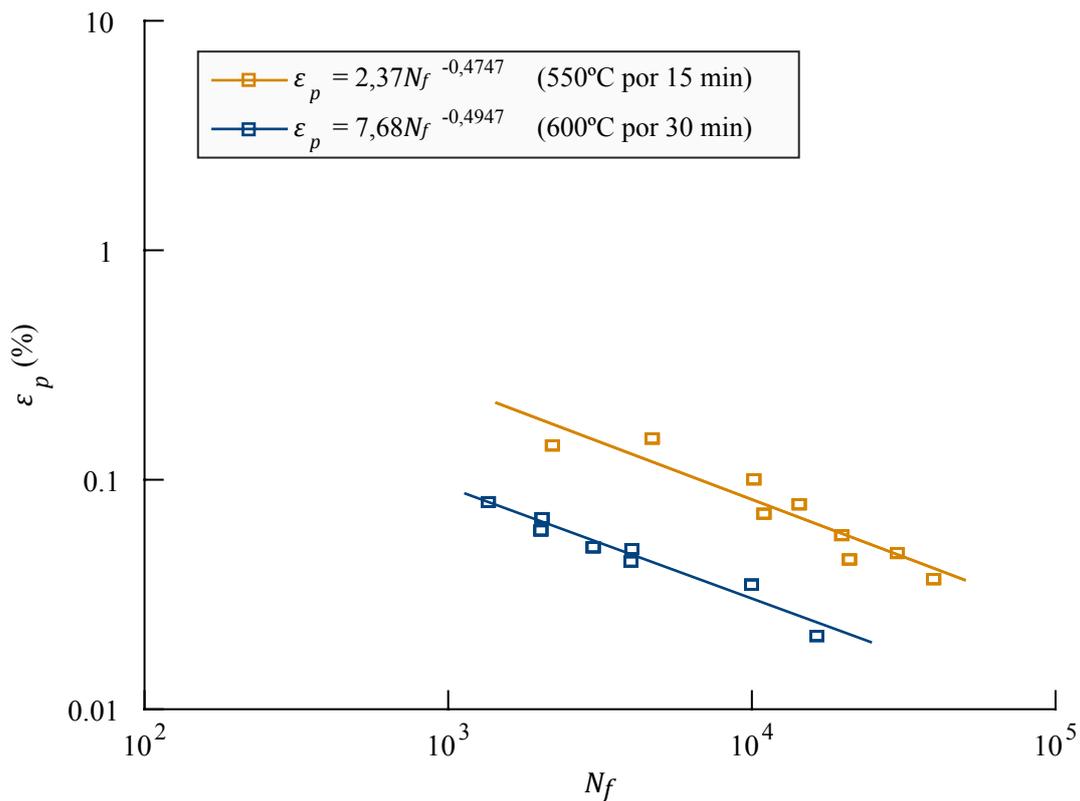


Figura 2.12: Curva  $\epsilon_p \times N_f$  de ensaios termomecânicos para diferentes tratamentos de recozimento da liga NiTiCu (Lagoudas *et al.*, 2009).

Maletta *et al.* (2014) utilizam os modelos de fadiga para levantamento de curvas de fadiga em ciclos pseudoelásticos, como a relação de Coffin-Manson que considera o regime plástico envolvido,

demonstrando que os mais variados modelos de predição à fadiga são muito úteis no âmbito de ligas com memória de forma, tanto em ciclagem termomecânica quanto em ciclagem mecânica.

Calhoun *et al.* (2015) percebem que a deformação e a tensão aplicada são ambos determinantes na vida em fadiga de ligas com memória de forma em ciclos termomecânicos. Os autores propõem uma metodologia para determinar a fadiga desses materiais baseada no modelo de Smith-Watson-Topper (SWT), com um parâmetro que inclui tanto a tensão aplicada quanto a amplitude de deformação do corpo de prova em ensaio dinâmico de fadiga (Smith *et al.*, 1970). No contexto de fadiga termomecânica em LMF, Calhoun *et al.* (2015) e Wheeler e Lagoudas (2017) usam o termo trabalho de atuação por unidade de volume ( $\varphi$ ) para designar o produto da tensão axial aplicada no corpo de prova pela média da deformação de atuação durante o ensaio ( $\sigma \overline{EMF}$ ), relacionando-o com a vida em fadiga do material,  $N_f$ , vide Eq. (2.4). Espera-se que o material rompa mais rapidamente quando é submetido a um trabalho de atuação elevado,  $\varphi$ .

$$\varphi = \sigma \overline{EMF}. \quad (2.4)$$

Neste trabalho, a fadiga funcional e estrutural de corpos de prova é avaliada somente em ciclos termomecânicos, isto é, com tensão mecânica constante e com variação de temperatura suficiente para realizar transformações de fase completas no aquecimento e resfriamento. A fadiga funcional é definida como a degradação do efeito memória de forma (EMF) com a ciclagem termomecânica. A fadiga estrutural é avaliada com modelos convencionais de predição à fadiga.

A figura (2.13) indica o percurso do ensaio termomecânico. A tensão nominal axial é constante durante todo o ensaio e o material é ciclado entre as temperaturas  $M_f^\sigma$  e  $A_f^\sigma$ , como exibido no percurso da Fig. (2.13). O sobrescrito ( $\sigma$ ) denota que há diferença na temperatura característica de transformação para uma dada tensão mecânica.

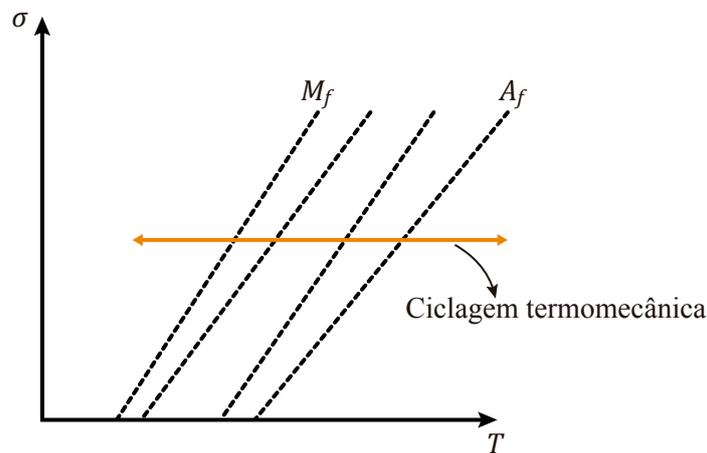


Figura 2.13. Percurso da ciclagem dos ensaios de fadiga (Esquemático). O ensaio percorre temperaturas inferiores a  $M_f$  e superiores a  $A_f$ , com tensão constante durante o decorrer do ensaio.

## 3 MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 MATERIAL INVESTIGADO

Foram realizados ensaios de fadiga termomecânica em fios atuadores de LMF *SmartFlex*<sup>®</sup> de diâmetro de 150  $\mu\text{m}$  da *Saes Getters* por meio de bancada experimental apropriada. Algumas propriedades desse material podem ser encontradas em Fumagalli *et al.* (2009) e Toia *et al.* (2006). São fios feitos em NiTi com 54% de Níquel. O fio é confeccionado com a intenção de possuir fase martensita em temperatura ambiente. Um ensaio de Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) foi realizado para caracterizar o material e obter as temperaturas características de mudança de fase, como mostra a Fig. (3.1). A curva apresenta as temperaturas características:  $M_f = 32,8^\circ\text{C}$ ;  $M_s = 40,8^\circ\text{C}$ ;  $A_s = 83,4^\circ\text{C}$ ;  $A_f = 89,1^\circ\text{C}$ .

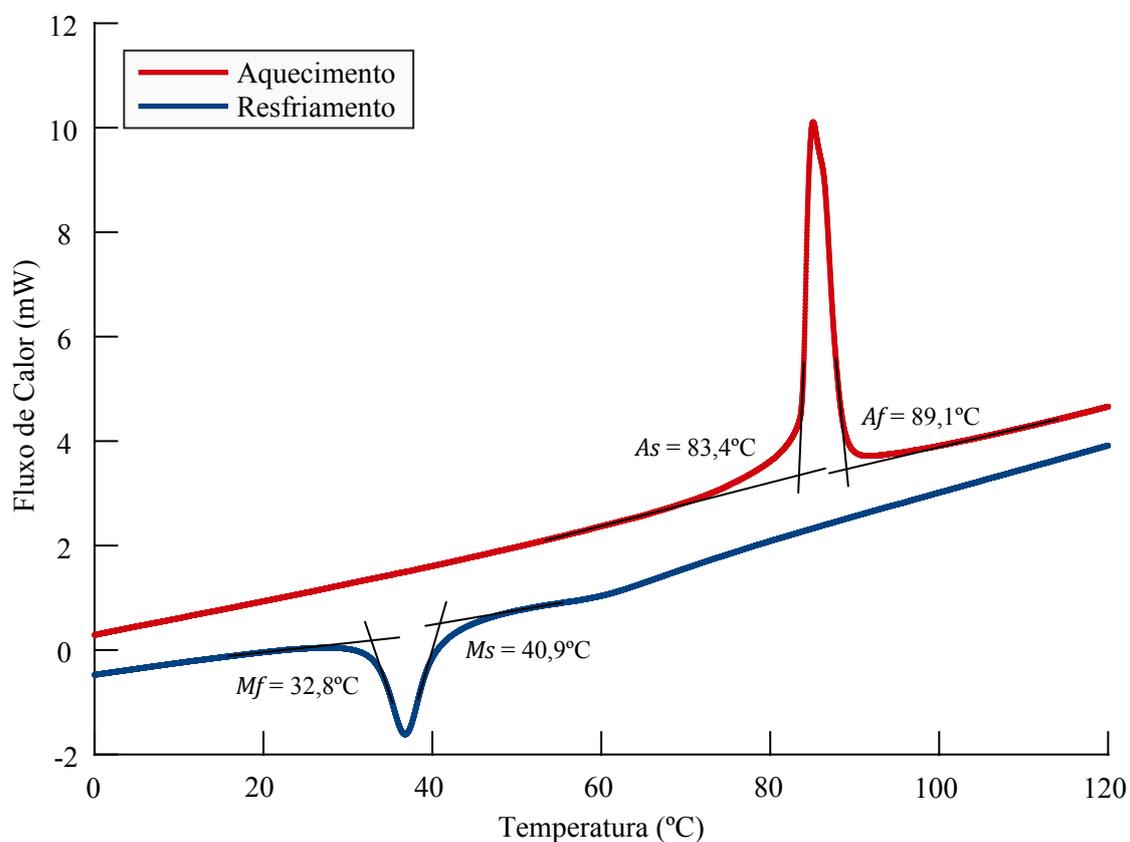


Figura 3.1. Curva de Calorimetria Diferencial de Varredura do material *SmartFlex*<sup>®</sup> como recebido (Endotérmico para cima).

A figura (3.2) apresenta a mudança na resistividade do material *SmartFlex*<sup>®</sup> quando ocorrem alterações em sua temperatura (Toia *et al.*, 2006). O percurso no aquecimento e no resfriamento são distintos. Esse conhecimento é essencial para selecionar a tensão elétrica e corrente elétrica adequada a ser aplicada no fio atuador durante o seu aquecimento no ensaio termomecânico.

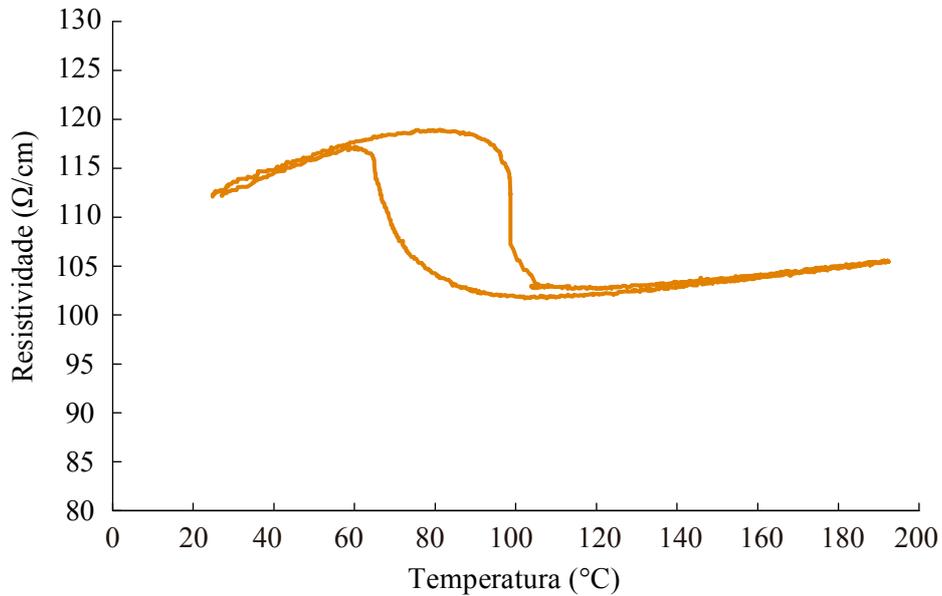


Figura 3.2. Mudança de resistividade elétrica do material *SmartFlex*<sup>®</sup> ao variar sua temperatura (Toia *et al.*, 2006).

Borlandelli *et al.* (2015) e Mammano e Dragoni (2015) realizaram ensaios de tração em fios *SmartFlex*<sup>®</sup>. A figura (3.3) apresenta o ensaio de tração dos autores para fios em estado martensítico, com temperatura ambiente de 24°C e 25°C, respectivamente. Nota-se que acima de 100 MPa, há surgimento de martensita demaçada, isto é,  $\sigma_{MM \rightarrow MD}^f < 100$  MPa. Portanto, é interessante que os ensaios de ciclagem termomecânica tenham valor de tensão superiores a essa faixa.

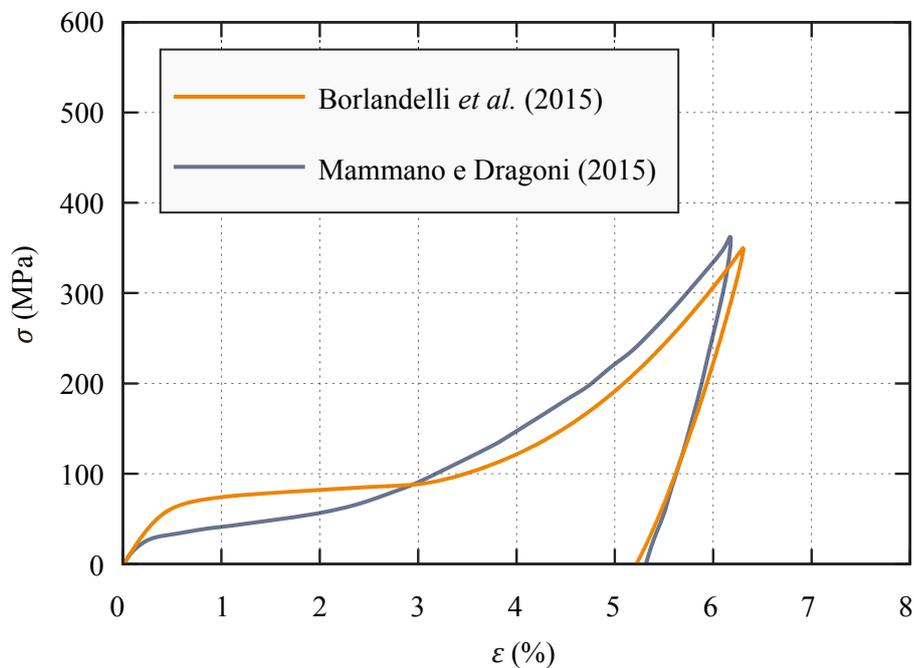


Figura 3.3. Ensaio de tração de fios *SmartFlex*<sup>®</sup> em condição  $T < M_f$  de Borlandelli *et al.* (2015) e Mammano e Dragoni (2015).

### 3.2 BANCADA DE ENSAIOS TERMOMECÂNICOS

A figura (3.4) representa o desenho esquemático da bancada, expondo seus principais componentes, que são explanados detalhadamente no decorrer desta seção.

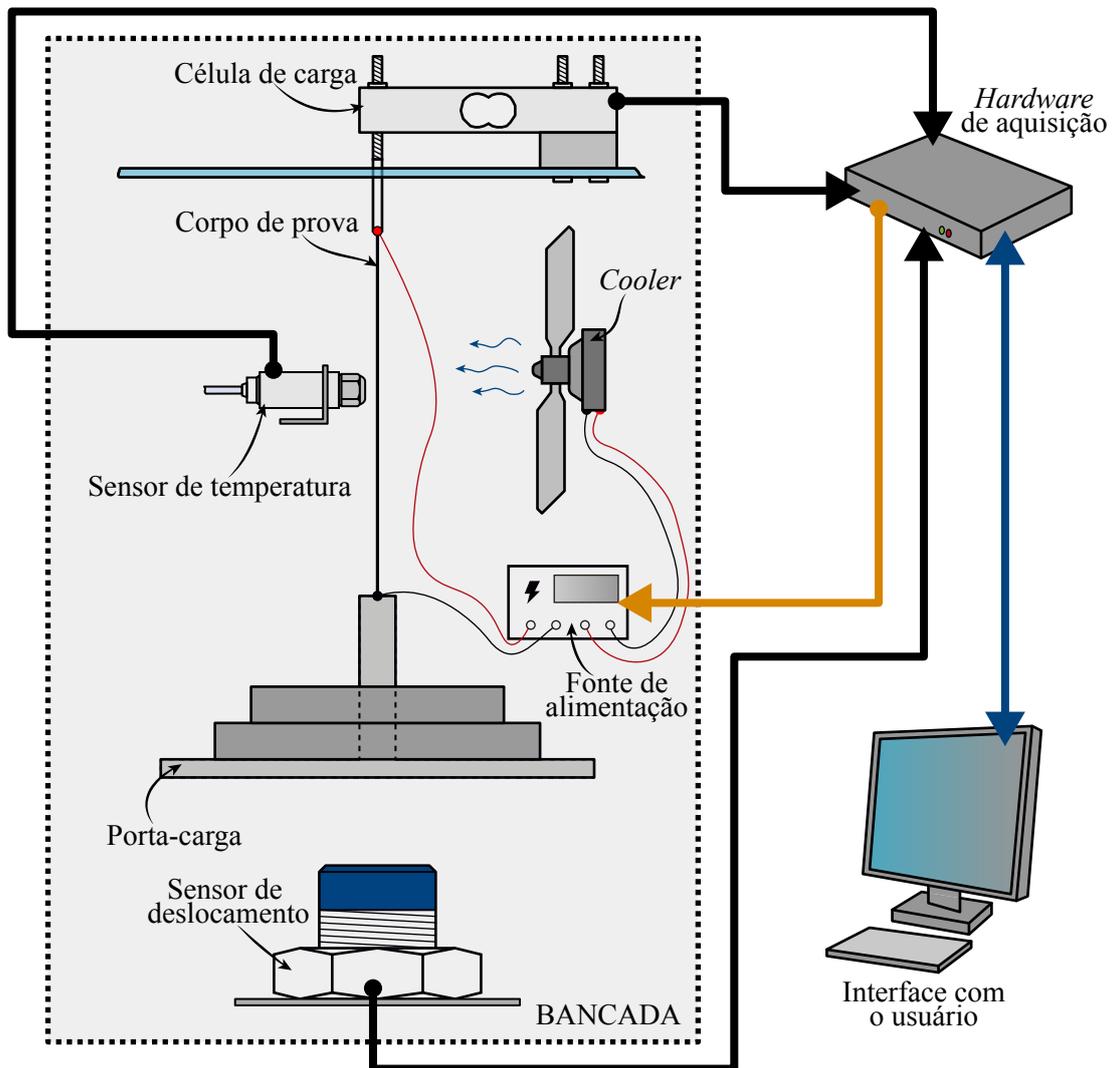


Figura 3.4. Desenho esquemático da bancada.

A bancada de ensaios de ciclagem termomecânica em fios atuadores com memória de forma possui estrutura em perfil de alumínio. Fontes de alimentação regulável em corrente contínua são utilizadas para realizar o aquecimento do fio atuador via efeito *Joule*, onde há corrente elétrica passando por todo comprimento útil do fio, e o resfriamento do fio por convecção forçada, utilizando a ventilação de um *cooler* funcional entre 8 e 14 volts.

Os sinais de todos os sensores presentes são convertidos em valores físicos através de circuitos eletrônicos e *hardware* adequado. O usuário da bancada pode acompanhar o progresso das variáveis do ensaio por meio de uma interface dedicada a ensaios de ciclagem termomecânica em fios de LMF. A figura (3.5) apresenta os elementos essenciais da bancada.

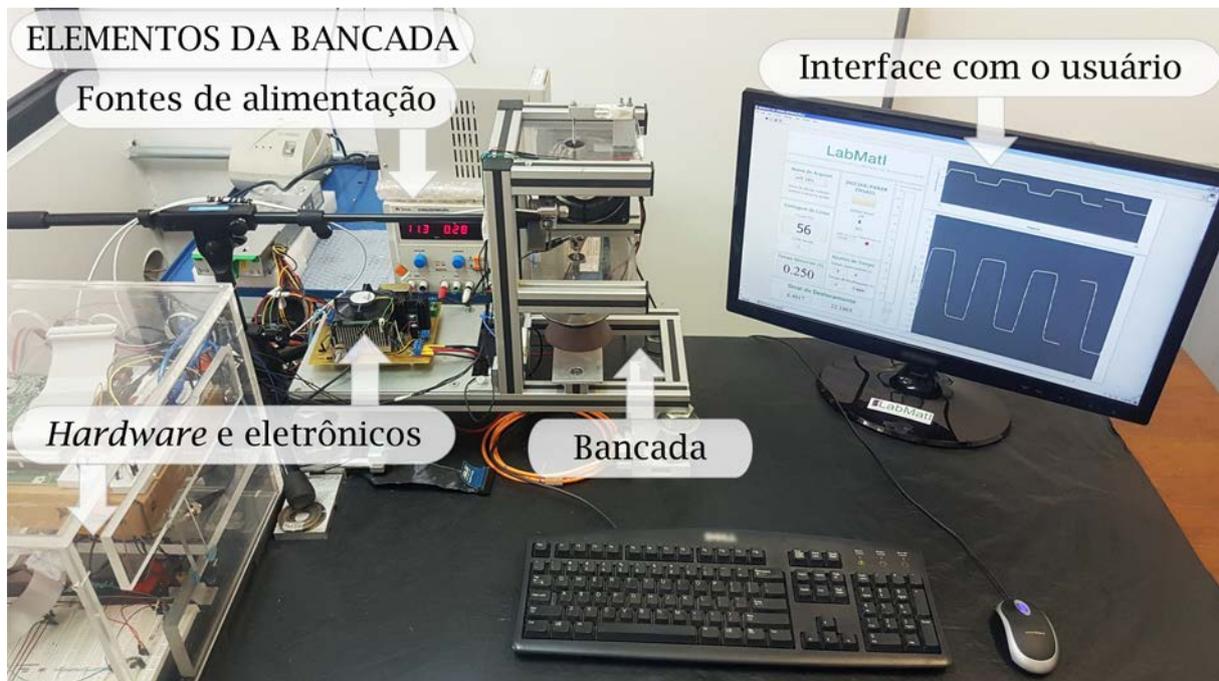


Figura 3.5. Elementos da bancada.

A bancada possui três sensores: uma célula de carga, um sensor infravermelho de temperatura e um sensor indutivo de deslocamento. Há também um termopar para medição e monitoramento da temperatura ambiente durante a realização dos ensaios. A figura (3.6) fornece uma visão aproximada dos sensores e outros componentes importantes da bancada.

A célula de carga utilizada, responsável pela medição de força aplicada no sistema, possui formato de viga, feita de alumínio, e funciona em ponte completa (constituída por quatro extensômetros). Sua capacidade máxima é de 5 kg. O sinal elétrico da célula de carga é amplificado em circuito eletrônico adequado.

Apesar da presença do sensor infravermelho de temperatura, os fios atuadores do presente trabalho possuem diâmetro quatro vezes inferior ao tamanho mínimo admissível de área para foco adequado. Utilizando lente de foco fechado, o sensor é capaz de medir com confiabilidade uma área de no mínimo 600 micrometros. Com o fio atuador investigado, a leitura de temperatura leva em conta também a área ao fundo que fica ao redor do fio, situação que facilita a perda do foco e compromete a fidelidade da medição. Portanto, a temperatura é apenas uma variável monitorada durante os ensaios.

O sensor indutivo de deslocamento produz um campo magnético ao se aproximar de faces metálicas, sendo utilizado na bancada para medir os deslocamentos do porta-carga durante os ensaios de ciclagem termomecânica sem necessidade de contato. Esse dado de deslocamento é crucial para obter a deformação do fio atuador. O sensor possui alcance máximo de 40 mm.

O ambiente da bancada é mantido em temperatura controlada, por meio de ar condicionado, buscando mantê-lo em temperatura entre 18°C e 22°C, a depender da condição estabelecida para o ensaio, monitorado por um termopar externo.

A placa de *hardware* para aquisição de dados presente na bancada possui entradas e saídas, como mostra o desenho esquemático da Fig. (3.4). Suas entradas são os sinais elétricos dos sensores de força, temperatura e deslocamento. Esses sinais são simultaneamente convertidos em variáveis físicas na interface disponível para o usuário. O *hardware* possui saídas de sinal *on/off* de aquecimento e resfriamento que funcionam de forma intermitente, isto é, o sinal de resfriamento encontra-se desligado quando o sinal de aquecimento é ligado, e vice-versa. O sinal *on/off* de aquecimento e resfriamento originário da placa de aquisição percorre um circuito eletrônico com transistores e, com auxílio de fontes de alimentação reguláveis em corrente contínua, são responsáveis por introduzir corrente elétrica no fio de LMF para aquecimento e por dar partida no *cooler* de resfriamento.

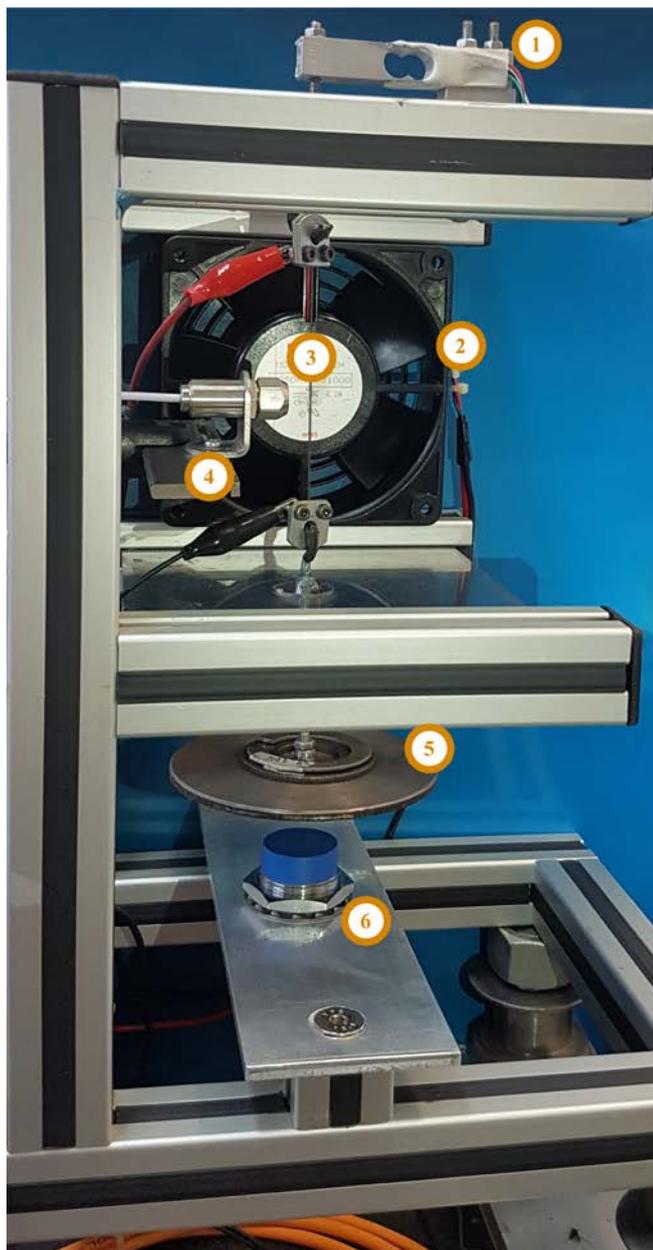


Figura 3.6. Foto aproximada da bancada de ciclagem termomecânica em fios com memória de forma.  
1: Célula de carga; 2: *Cooler* para resfriamento do fio; 3: Corpo de prova em formato de fio; 4: Sensor infravermelho de temperatura; 5: Porta-carga; 6: Sensor indutivo de deslocamento.

### 3.3 PROCEDIMENTOS DE ENSAIO

Foram realizados 24 ensaios com o material *SmartFlex*<sup>®</sup>, divididos em três séries, de acordo com as condições de aquecimento de resfriamento empregadas. Os corpos de prova possuem 90 mm de comprimento útil, quando livres de tensão. O fio testado é preso em suas extremidades e tracionado com o auxílio de massas graduadas de até 100 gramas, que devem garantir tensão mecânica suficiente para ocorrer reorientação da martensita na direção da carga aplicada (martensita demaçada). A tabela (3.1) resume as condições dessas séries de ensaios. Somente foram considerados válidos os ensaios com fratura a uma distância de 30 mm das extremidades do fio.

A figura (3.7) mostra o esquemático da evolução do ensaio. Com o passar do tempo, o fio começa a se alongar ciclo a ciclo, acumulando deformação plástica, chegando cada vez mais próximo do sensor indutivo de deslocamento.

Tabela 3.1. Condições dos 24 ensaios realizados.

Série	Quantidade de ensaios	Corrente elétrica para aquecimento (A)	Tensão elétrica no <i>Cooler</i> (V)	Temperatura Ambiente (°C)	Tempo de aquecimento/ resfriamento em segundos
A	16	0,65	11,3	18	8/8
B	4	0,45	8,6	22	15/10
C	4	0,75	11,3	18	8/8

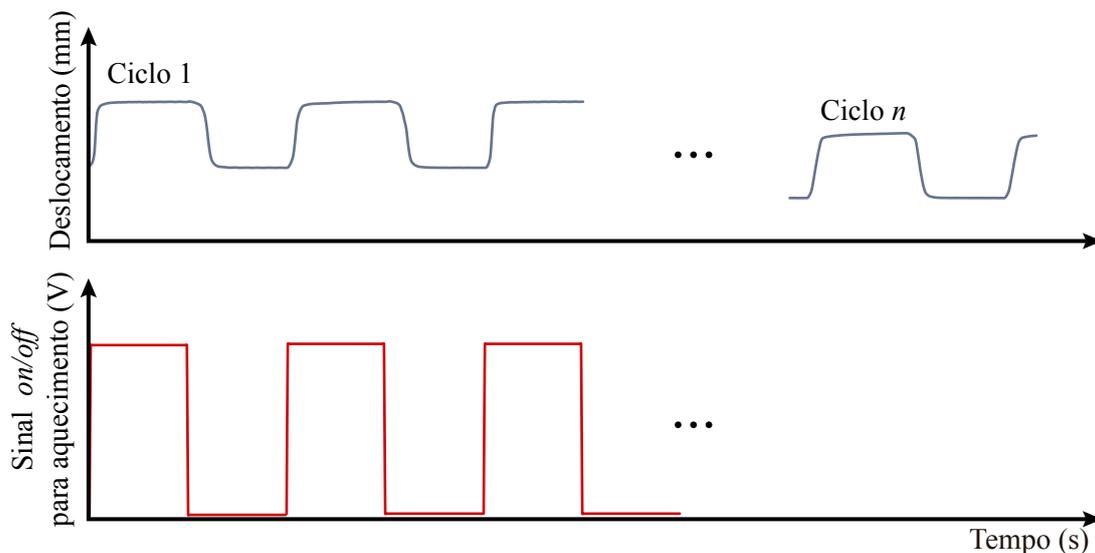


Figura 3.7. Evolução do deslocamento durante os ensaios de fadiga termomecânica. Na figura, o deslocamento é relativo à distância do porta-carga ao sensor de deslocamento.

A série A corresponde ao conjunto de 16 ensaios realizados em quatro níveis de tensão axial mecânica (125, 150, 175 e 200 MPa). Os ensaios da série realizam aquecimento com corrente elétrica de 0,65 A, flutuando em até 3% para mais ou para menos devido às alterações de resistividade elétrica durante o processo de mudança de fase do material. A tensão elétrica aplicada no *cooler* foi de 11,3 V. O sinal para aquecimento é acionado por 8 segundos, assim como sinal para resfriamento, portanto, um ciclo possui 16 segundos ao todo. A temperatura ambiente foi mantida em 18°C.

A série B corresponde ao conjunto de 4 ensaios realizados em quatro níveis de tensão axial mecânica (125, 150, 175 e 200 MPa). Os ensaios da série realizam aquecimento com corrente elétrica de 0,45 A, flutuando em até 3% para mais ou para menos. A tensão elétrica aplicada no *cooler* foi de 8,6 V. O sinal para aquecimento é acionado por 15 segundos, já o sinal para resfriamento é acionado por 10 segundos, portanto, um ciclo possui 25 segundos ao todo. Designa-se maior tempo de ciclos nesta condição para garantir transformação de fase completa do fio atuador. A temperatura ambiente foi mantida em 22°C.

A série C corresponde ao conjunto de 4 ensaios realizados em quatro níveis de tensão axial mecânica (125, 150, 175 e 200 MPa). Os ensaios da série realizam aquecimento com corrente elétrica de 0,75 A, flutuando em até 3% para mais ou para menos. A tensão elétrica aplicada no *cooler* foi de 11,3 V. O sinal para aquecimento é acionado por 8 segundos, assim como sinal para resfriamento, portanto, um ciclo possui 16 segundos ao todo. A temperatura ambiente foi mantida em 18°C.

Nas condições de aquecimento selecionadas, o sensor realizou medições de temperatura entre 100 e 140°C em aquecimento, monitorada em interface com usuário, valores superiores ao valor de  $A_f$  do material. Esses valores medidos são ainda inferiores ao valor real de temperatura nos fios testados, uma vez que o sensor capta uma área superior a área lateral dos fios, que possuem 150 micrometros de diâmetro.

### 3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE

A tensão nominal aplicada ao fio ( $\sigma$ ), considerada livre de tensões locais, é dependente da força aplicada ( $F$ ), proveniente da força peso do porta-carga, e do diâmetro do fio ( $d$ ), vide Eq. (3.1). O sinal da célula de carga presente na bancada é útil para monitorar o valor calculado de tensão e força aplicada ao fio.

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d^2}. \quad (3.1)$$

A evolução das deformações dos fios é fundamental para a análise de fadiga funcional do material. A variável  $\varepsilon_M$  define o pico de deformação do fio quando em temperatura inferior a  $M_f$ , definida na Eq. (3.2), já  $\varepsilon_A$  define o pico de deformação do fio quando em temperatura superior a  $A_f$ , definida na Eq. (3.3).  $EMF$  é a deformação de atuação do fio, que indica o efeito memória de forma assumido ciclo a ciclo, que nada mais é do que a diferença entre  $\varepsilon_M$  e  $\varepsilon_A$ , conforme Eq. (3.4). O decréscimo de  $EMF$  caracteriza a fadiga funcional do material, isto é, a degradação do efeito memória de forma.

$$\varepsilon_M = \frac{L_M - L_i}{L_i}, \quad (3.2)$$

$$\varepsilon_A = \frac{L_A - L_i}{L_i}, \quad (3.3)$$

$$EMF = \varepsilon_M - \varepsilon_A = \frac{L_M - L_A}{L_i}, \quad (3.4)$$

A variável  $L_A$  é o comprimento mínimo do corpo de prova durante o ciclo atual analisado.  $L_M$  é o comprimento máximo do corpo de prova durante o ciclo atual analisado.  $L_i$  é o comprimento inicial do fio, tomado como o comprimento  $L_A$  no primeiro ciclo ( $L_{A,inicial}$ ). Os corpos de prova possuem comprimento útil de 90 mm quando livres de tensão, antes de serem inseridos na bancada para dar início ao ensaio, em fase martensita. O valor de leitura no sensor indutivo terá como referência o alongamento inicial do fio em martensita ( $L_{M,inicial}$ ), vide Eq. (3.5).

$$L_{M,inicial} = 90[1 + \varepsilon(\sigma)]. \quad (3.5)$$

Ao receber carga axial, estabelecida em cada ensaio, o corpo de prova se alonga com um valor de  $90\varepsilon(\sigma)$ , onde  $\varepsilon(\sigma)$  corresponde à deformação resultante da tração do material. Os dados da curva  $\sigma \times \varepsilon$  em temperatura menor que  $M_f$  de Mammano e Dragoni (2015) apresentados na Fig. (3.3) foram utilizados para este fim. Após a primeira transformação de fase no corpo de prova, quando assume fase austenita, o valor de deslocamento no sensor indutivo corresponde ao referencial para deformação nula. Portanto, ao considerar o primeiro ciclo do ensaio,  $L_i$  é equivalente a  $L_A$  e  $\varepsilon_A = 0$ . A figura (3.8) ilustra as etapas iniciais do ensaio, iniciado pelo carregamento mecânico no fio, seguido de seu aquecimento e subsequente ciclagem térmica.

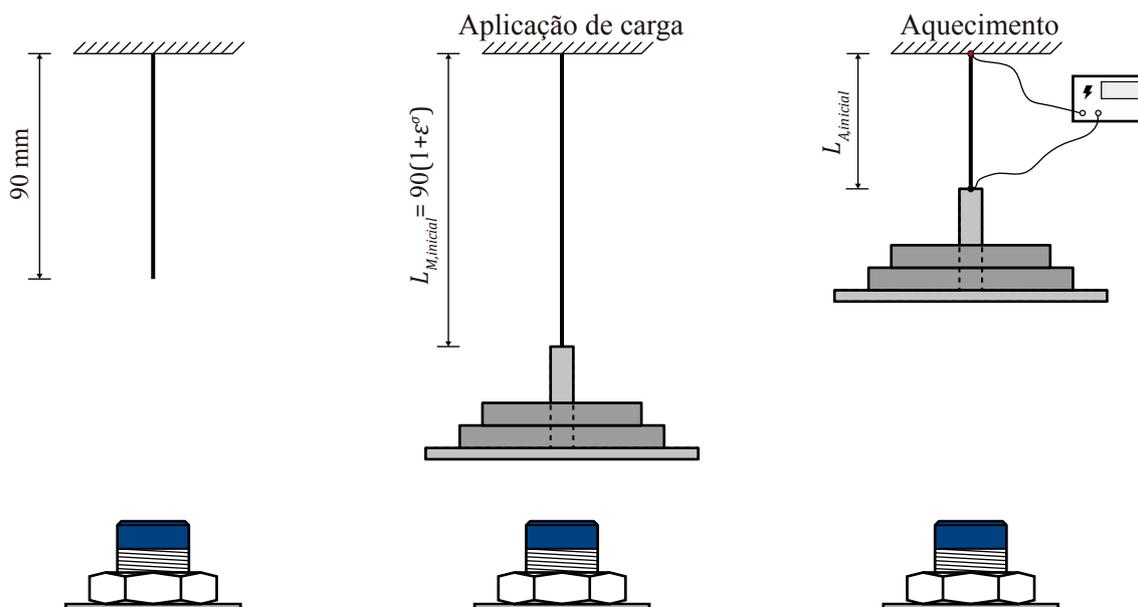


Figura 3.8. Etapas iniciais do ensaio termomecânico.

Depois de analisar a evolução das deformações do material, procura-se realizar um levantamento estatístico de vida em fadiga do material, baseado no ciclo em que se rompeu o corpo de prova de cada ensaio. A primeira curva de ajuste é a curva S-N, que relaciona a tensão nominal aplicada e o número de ciclos até a falha ( $N_f$ ). A equação (3.6) determina a relação entre essas duas variáveis, utilizando os parâmetros  $K$  e  $m$ .

A regulamentação presente na norma ASTM *Standard* E-739-10 (2015) é utilizada para ajustar os dados dos ensaios em curva S-N. A relação da Eq. (3.6) pode ser linearizada em escala logarítmica, conforme apresenta a Eq. (3.7).

$$N_f = K\sigma^{-m}, \quad (3.6)$$

$$\text{Log}(N_f) = \hat{A} + \hat{B}\text{Log}(\sigma). \quad (3.7)$$

Os parâmetros  $\hat{B}$  e  $\hat{A}$  denotam um valor estimativo, a serem obtidos pela Eq. (3.8) e pela Eq. (3.9), respectivamente. Nesse caso,  $\hat{B}$  equivale ao oposto de  $m$  e  $\hat{A}$  equivale a  $\text{Log}(K)$ . O número de amostras ( $k$ ) beneficia a confiabilidade do levantamento estatístico, e é determinante na estimativa do valor de  $\hat{B}$ .

$$\hat{B} = \frac{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^k (X_i - \bar{X})^2}, \quad (3.8)$$

$$\hat{A} = \bar{Y} - \hat{B}\bar{X}. \quad (3.9)$$

O símbolo em ênfase de barra em cima das variáveis  $X$  e  $Y$  denotam média aritmética simples. Para curvas S-N,  $X$  equivale a  $\text{Log}(\sigma)$  e  $Y$  equivale a  $\text{Log}(N_f)$ . A mesma regulamentação pode ser empregada para estimar os parâmetros de vida em fadiga relacionados com a deformação plástica do material e o trabalho de atuação por unidade de volume, como se descreve a seguir.

A análise das deformações plásticas é feita segundo a Eq. (3.10). Neste âmbito, a deformação plástica acumulada ( $\varepsilon_p$ ) é considerada como a deformação em fase Austenita ( $\varepsilon_A$ ) no último ciclo antes da falha estrutural do corpo de prova. Os parâmetros  $\alpha$  e  $\beta$  são chamados coeficiente de ductilidade à fadiga e expoente de ductilidade à fadiga, respectivamente (Dowling, 2013; Lagoudas *et al.*, 2009). Ao ajustar os dados dos ensaios, é possível encontrar o valor desses parâmetros.

$$\varepsilon_p = \alpha N_f^{-\beta}. \quad (3.10)$$

De forma semelhante, o ajuste dos dados, considerando o valor de trabalho de atuação por unidade de volume ( $\varphi = \sigma \overline{EMF}$ ), é utilizado para estimar os coeficientes  $a$  e  $b$  baseados no modelo de SWT modificado da Eq. (3.11) (Smith *et al.*, 1970; Calhoun *et al.*, 2015). O valor de  $\overline{EMF}$  é calculado pela média da deformação de atuação por todo ensaio.

$$\varphi = aN_f^{-b}. \quad (3.11)$$

Na série A de ensaios, a dispersão dos valores encontrados de  $N_f$  para uma dada tensão mecânica é calculada através da Eq. (3.12). O desvio padrão amostral ( $s$ ) é utilizado como medida de dispersão, onde  $k$  é o número de amostras e a variável analisada é a vida em fadiga,  $N_f$ .

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (N_{f_i} - \bar{N}_f)^2}{k - 1}}. \quad (3.12)$$

Os resultados dos 24 ensaios de fadiga termomecânica são confrontados com os resultados dos ensaios de fadiga termomecânica do mesmo material em tensão constante e ensaios de fadiga termomecânica em deformação total limitada a 3% e 4% de Mammano e Dragoni (2014), excluindo os ensaios que alcançaram vida infinita (limitada em 500 mil ciclos) e os ensaios com tensão nominal inferior a 125 MPa.

Para avaliar a influência da taxa de aquecimento e resfriamento na vida em fadiga do material, estima-se a taxa de atuação em cada ciclo, isto é, a velocidade com que se deforma o fio atuador, através da Eq. (3.13). A variação de deformação,  $\Delta\varepsilon$ , e a variação de tempo,  $\Delta t$ , são calculadas conforme mostra a Fig. (3.9).

$$\text{taxa de atuação} = \Delta\varepsilon/\Delta t. \quad (3.13)$$

As aquisições de  $\varepsilon$  na bancada são tomadas a cada 100 milissegundos. Para o cálculo da taxa de atuação, a variação selecionada em cada ciclo é considerada apenas na região em que há processo de transformação de fase, excluindo o patamar de deformação constante, vide Fig. (3.9). Para isso, consideram-se no cômputo da variação de deformação,  $\Delta\varepsilon$ , somente os pontos consecutivos de aquisição de dados que atendam a condição  $\varepsilon_{n-1} - \varepsilon_n$  maior que 0,05 % (valor absoluto), onde o subscrito  $n$  equivale ao  $n$ -ésimo ponto de aquisição. Quando a diferença de deformação entre dois pontos de aquisição consecutivos for inferior a 0,05 % (valor absoluto), infere-se que o material já realizou a transformação de fase completamente, porque possui variação de deformação muito pequena.

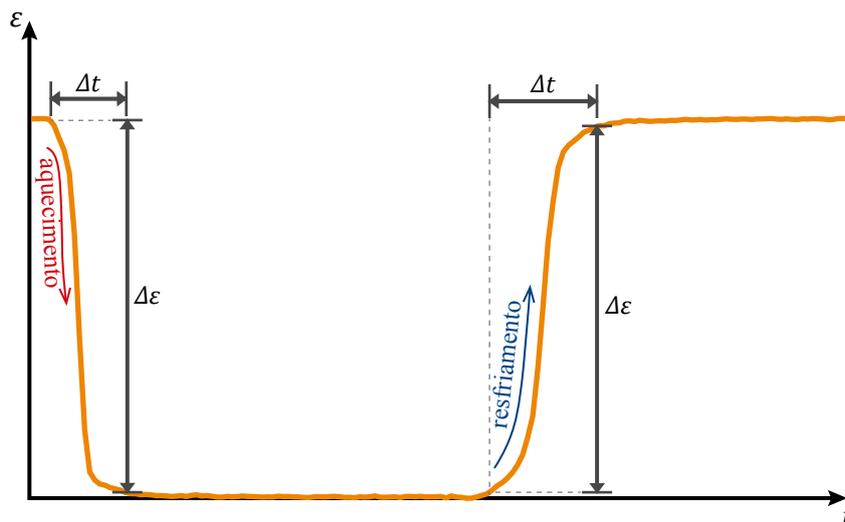


Figura 3.9. Evolução da deformação do fio atuador em um ciclo termomecânico (Esquemático).

Com a taxa de atuação do fio no aquecimento e no resfriamento tomado em cada ciclo, é possível estabelecer a relação entre a taxa de atuação média durante todo o ensaio com a vida em fadiga do fio.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 EVOLUÇÃO DAS DEFORMAÇÕES E FADIGA FUNCIONAL

A tabela 4.1 apresenta as principais variáveis investigadas nos ensaios da série A. A vida em fadiga,  $N_f$ , representa a quantidade de ciclos decorridos até a ruptura do corpo de prova. A variável  $EMF$  é a deformação recuperável, associada ao efeito memória de forma.  $\overline{EMF}$  define a média de  $EMF$  no ensaio. A tabela também apresenta a variação final de  $EMF$  no último ciclo. Por fim, apresentam-se  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  no penúltimo ciclo de cada ensaio, isto é, no último ciclo antes da falha do corpo do prova.

Tabela 4.1. Resultados dos ensaios da série A.

Identidade do ensaio	Tensão axial aplicada, $\sigma$ (MPa)	Vida, $N_f$	$\overline{EMF}$ (%)	Varição de $EMF$ (%)	$\varepsilon_A$ no último ciclo antes da falha, $\varepsilon_P$ (%)	$\varepsilon_M$ no último ciclo antes da falha (%)
A1	125	4332	5,69	0,08	2,12	7,83
A2	125	3495	5,65	0,09	1,47	7,16
A3	125	3597	5,73	-0,03	2,04	7,74
A4	125	5210	5,79	-0,04	1,48	7,21
A5	150	3552	5,84	-0,07	2,36	8,17
A6	150	3926	5,85	-0,04	1,96	7,82
A7	150	3061	5,85	-0,02	2,58	8,47
A8	150	3189	5,96	0,00	2,82	8,73
A9	175	2652	5,92	-0,11	3,18	9,09
A10	175	2712	5,93	-0,14	3,55	9,42
A11	175	2533	5,93	-0,11	3,33	9,23
A12	175	2793	5,93	-0,15	3,33	9,2
A13	200	2405	5,88	-0,18	3,28	9,09
A14	200	2335	5,9	-0,22	4,36	10,13
A15	200	2462	5,97	-0,36	4,44	10,25
A16	200	2383	5,94	-0,24	4,39	10,24

A série A consiste de 16 ensaios de ciclagem termomecânica com tensões mecânicas de 125, 150, 175 e 200 MPa. As figuras (4.1) a (4.4) apresentam a evolução de  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_M$  e  $EMF$  para esses quatro níveis de tensão, respectivamente. Nessa série, há quatro ensaios para cada nível de tensão.

Série A: 125 MPa

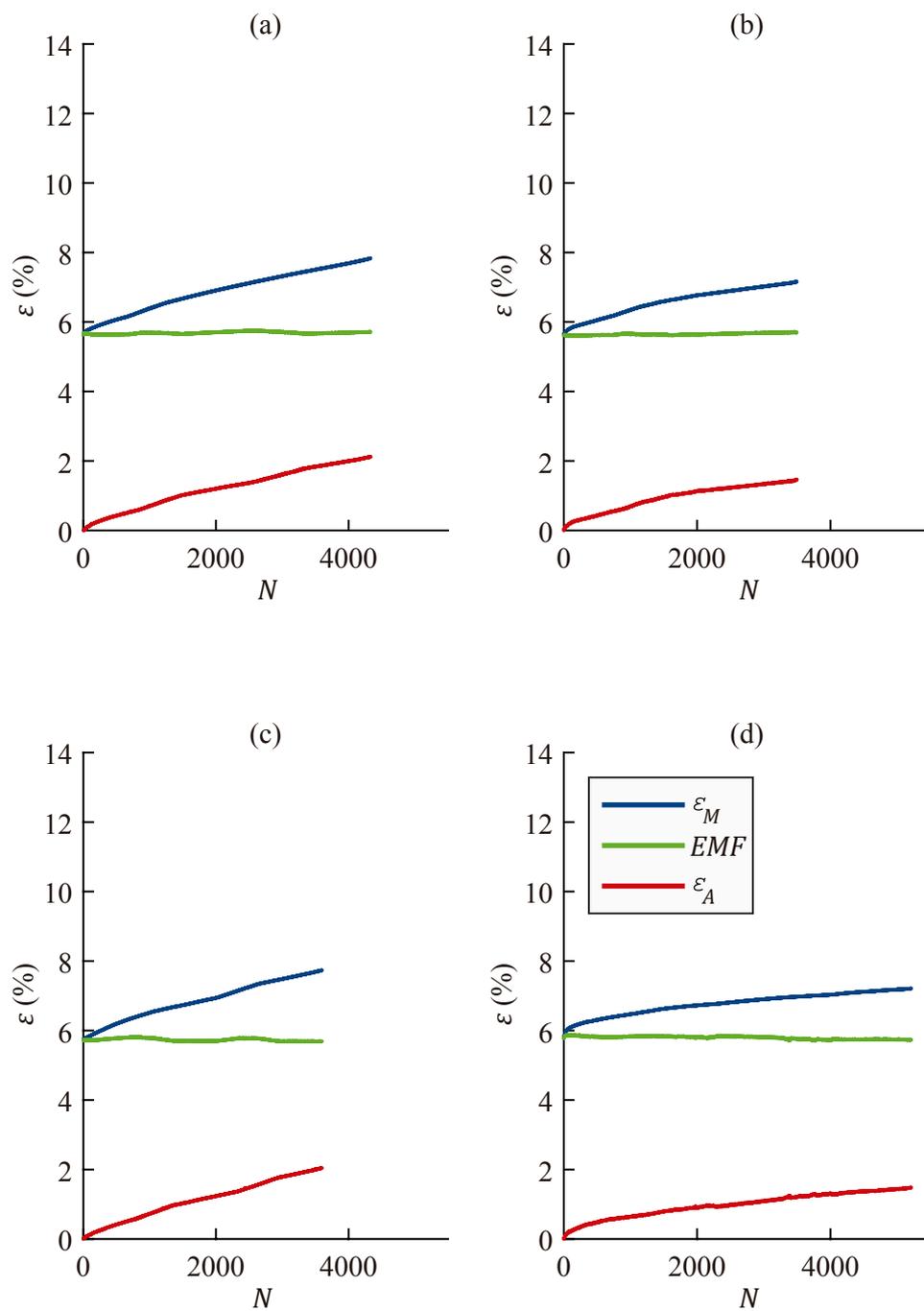


Figura 4.1. Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 125 MPa. (a) ensaio A1; (b) ensaio A2; (c) ensaio A3; (d) ensaio A4.

Série A: 150 MPa

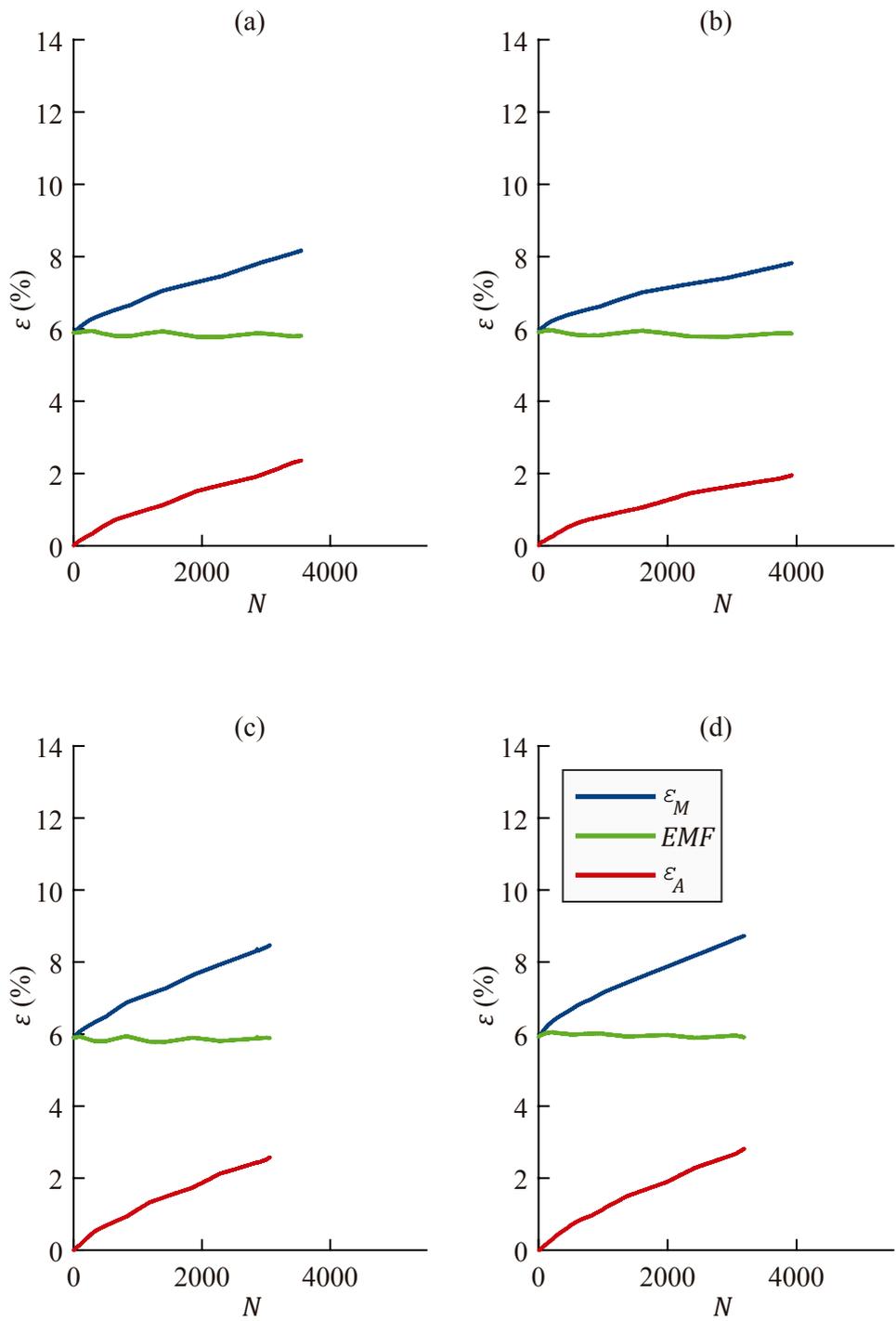


Figura 4.2. Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 150 MPa. (a) ensaio A5; (b) ensaio A6; (c) ensaio A7; (d) ensaio A8.

Série A: 175 MPa

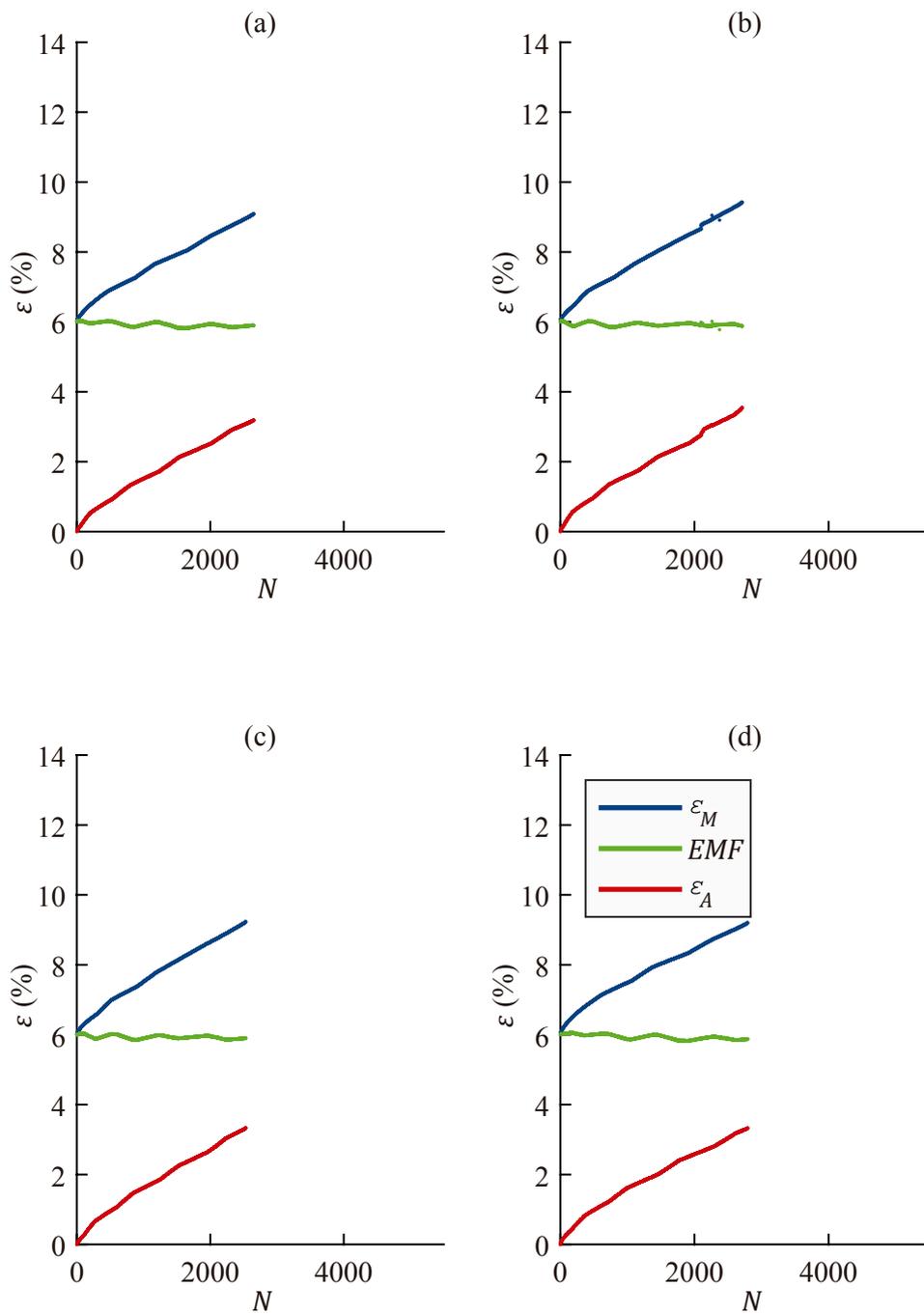


Figura 4.3. Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 175 MPa. (a) ensaio A9; (b) ensaio A10; (c) ensaio A11; (d) ensaio A12.

Série A: 200 MPa

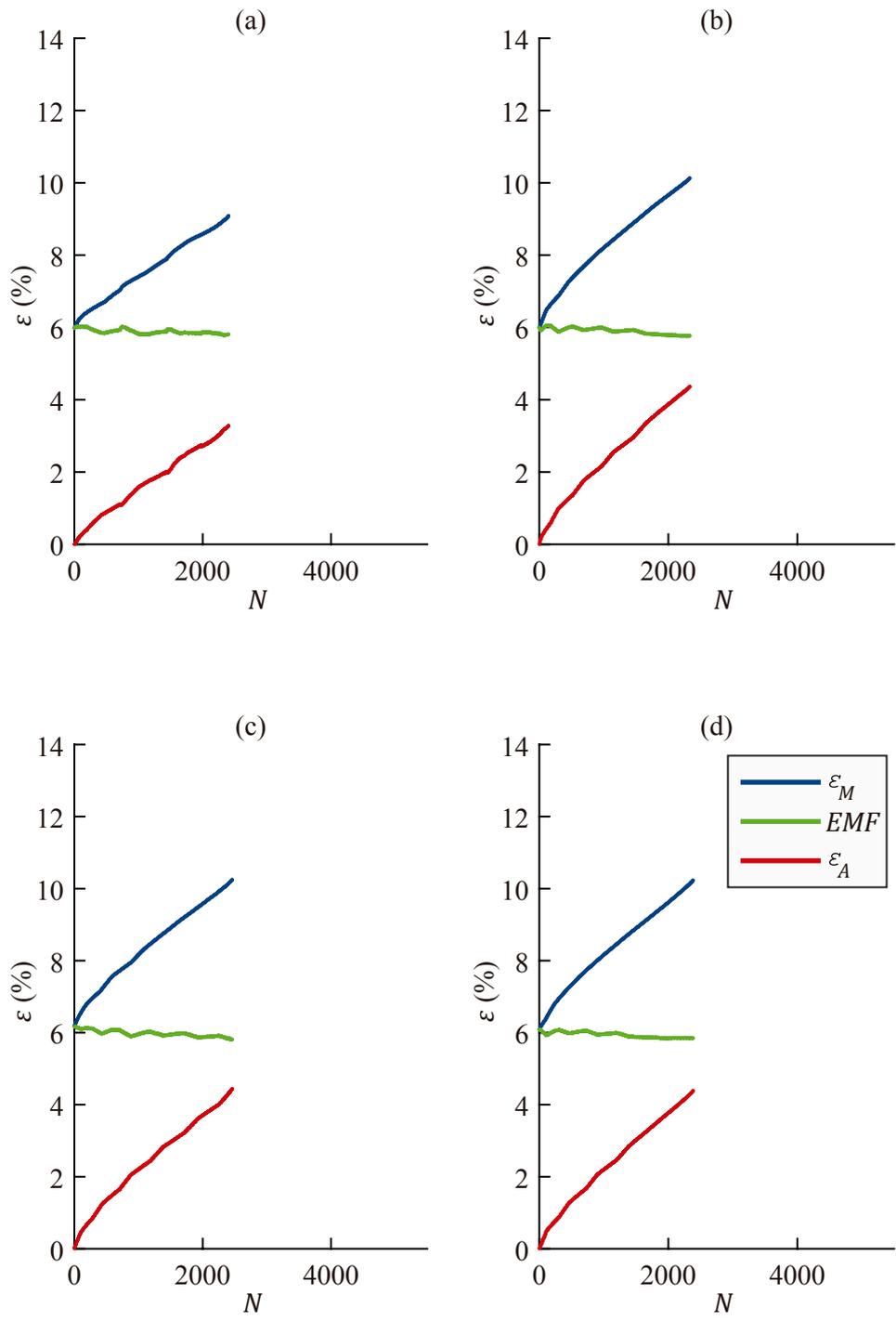


Figura 4.4. Evolução das deformações, Série A, tensão nominal de 200 MPa. (a) ensaio A13; (b) ensaio A14; (c) ensaio A15; (d) ensaio A16.

Os ensaios com tensão de 125 MPa, vide Fig. (4.1), apresentaram resultados bastante divergentes, com evoluções distintas de  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_M$  e  $EMF$ , além de resultados de vida em fadiga,  $N_f$ , com intervalos de diferença de até 1715 ciclos, como nota-se ao comparar os ensaios A2 e A4 (125 MPa), com  $N_f = 3495$  e  $N_f = 5210$ , respectivamente. Uma dispersão de resultados também é notada nos ensaios com tensão aplicada de 150 MPa, visualizados na Fig. (4.2). Por outro lado, percebe-se que os quatro ensaios com 175 MPa produziram resultados mais semelhantes, vide Fig. (4.3), com a evolução de  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_M$  e  $EMF$  muito próximas em todos os ensaios. O mesmo ocorre com os ensaios com 200 MPa, Fig. (4.4), onde essa condição de tensão mecânica gerou os valores de  $\varepsilon_A$  mais elevados nos ensaios da série A. A medida quantitativa de dispersão dos valores de  $N_f$  serão discutidas futuramente na seção que aborda a fadiga estrutural do material investigado.

A figura (4.5) apresenta uma comparação na inclinação das curvas  $\varepsilon \times N$  para os ensaios A4 e A14. O ensaio A4, com tensão aplicada de 125 MPa, foi o ensaio que obteve maior vida em fadiga, durando 5210 ciclos até seu rompimento e também acarretando em menor deformação plástica adquirida por toda a ciclagem. Por outro lado, o ensaio A14, com tensão de 200 MPa, rompeu com 2335 ciclos, a menor vida em fadiga da série, e acumulou a maior deformação plástica.

O cálculo de  $\Delta\varepsilon/\Delta N$  é dado pela diferença das deformações no primeiro e último ciclo antes da falha, portanto, representa a variação média de deformação por ciclo termomecânico (em %/ciclo). É notório que o aumento na tensão mecânica intensifica a evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  e o acúmulo de deformação plástica, vide Fig. (4.5).

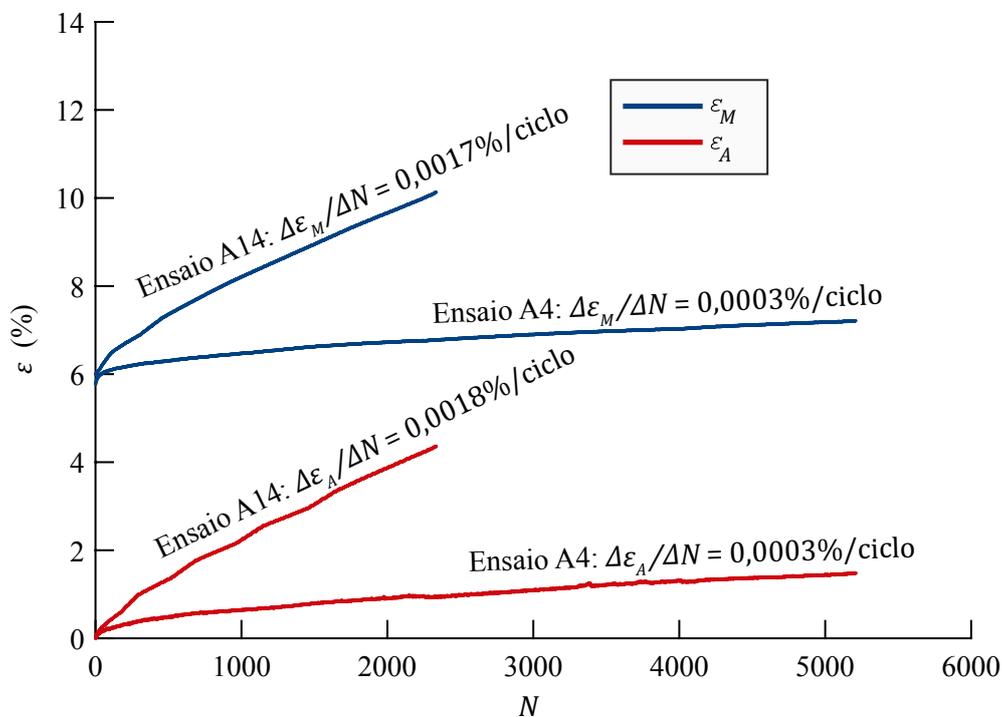


Figura 4.5. Evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  em ensaios da série A. Tensão de 200 MPa (A14) e 125 MPa (A4).

A série B de ensaios possui condições de aquecimento e resfriamento mais lentos do que as séries A e C, com aplicação de corrente elétrica de 4,5 A no aquecimento do fio e de tensão elétrica de 8,6 V no *cooler*. A figura (4.6) apresenta a evolução de  $\varepsilon_A$ ,  $\varepsilon_M$  e  $EMF$  para quatro ensaios da série B. As tensões nominais dos ensaios são: 125 MPa, 150 MPa, 175 MPa e 200 MPa.

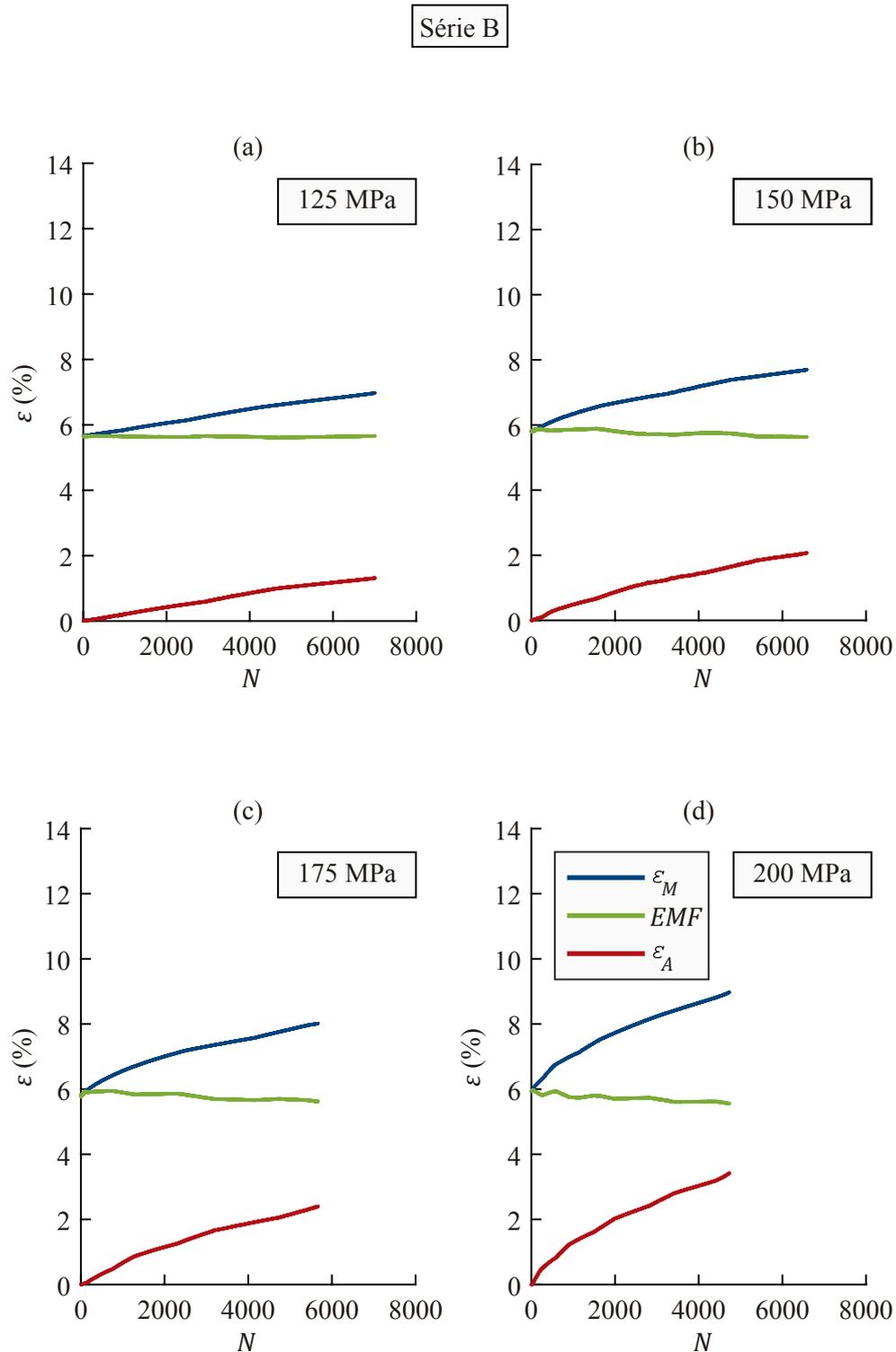


Figura 4.6. Evolução das deformações, Série B. (a) ensaio B1; (b) ensaio B2; (c) ensaio B3; (d) ensaio B4.

A série C é composta por uma quantidade de quatro ensaios, sob carregamentos mecânicos de 125, 150, 175 e 200 MPa cada, semelhante ao que é verificado nos resultados da série B, porém com condições de aquecimento e resfriamento mais rápidos (aquecimento com 7,5 A e resfriamento com 11,3 V no *cooler*). A figura (4.7) apresenta os resultados da série.

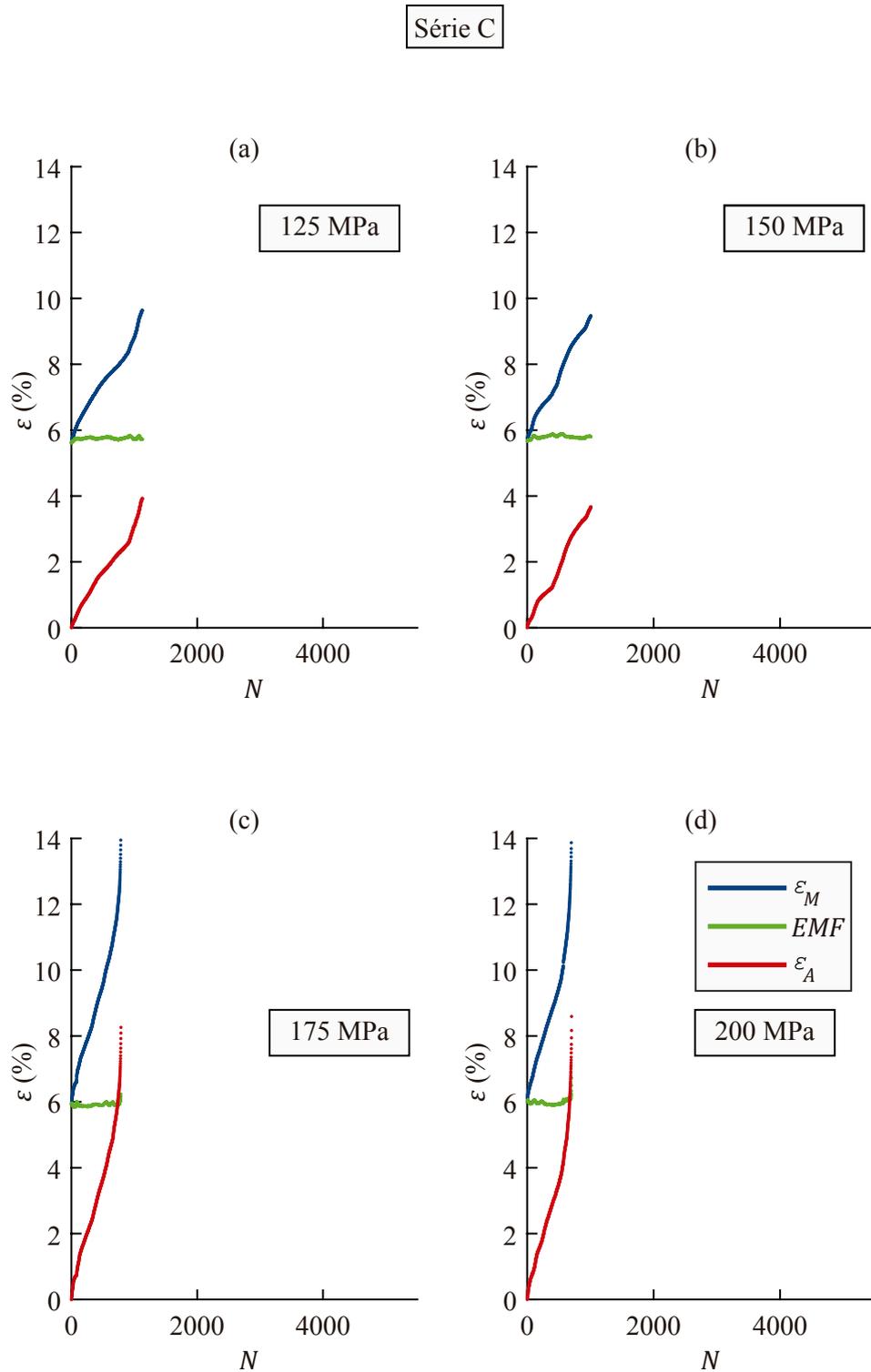


Figura 4.7. Evolução das deformações, Série C. (a) ensaio C1; (b) ensaio C2; (c) ensaio C3; (d) ensaio C4.

A figura (4.8) apresenta a comparação entre os ensaios B1 e B4, com 125 e 200 MPa, respectivamente. Analogamente, a comparação entre os ensaios C1 e C4 é apresentada na Fig. (4.9).

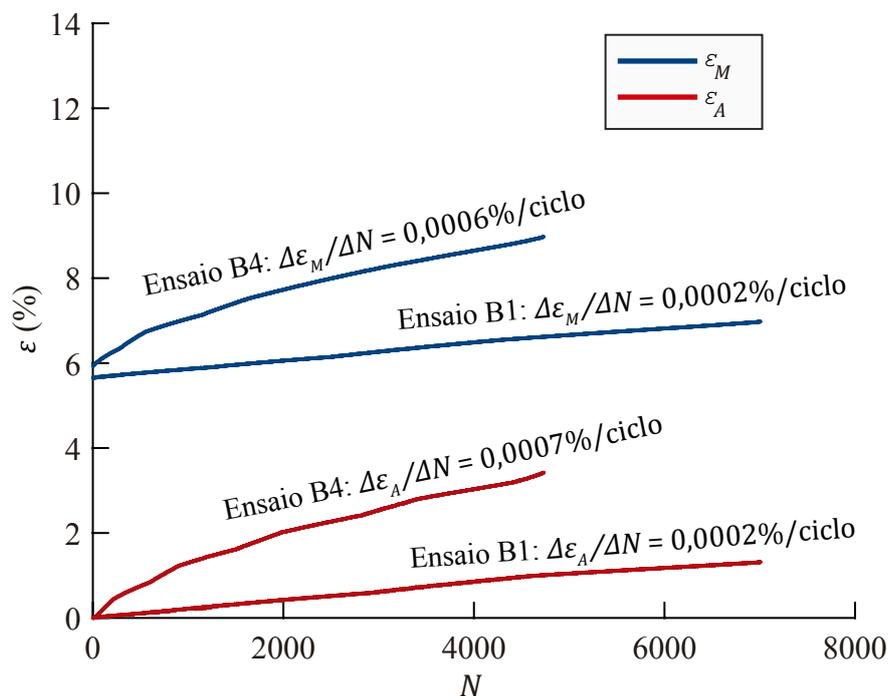


Figura 4.8. Evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  em ensaios da série B. Tensão de 200 MPa (B4) e 125 MPa (B1).

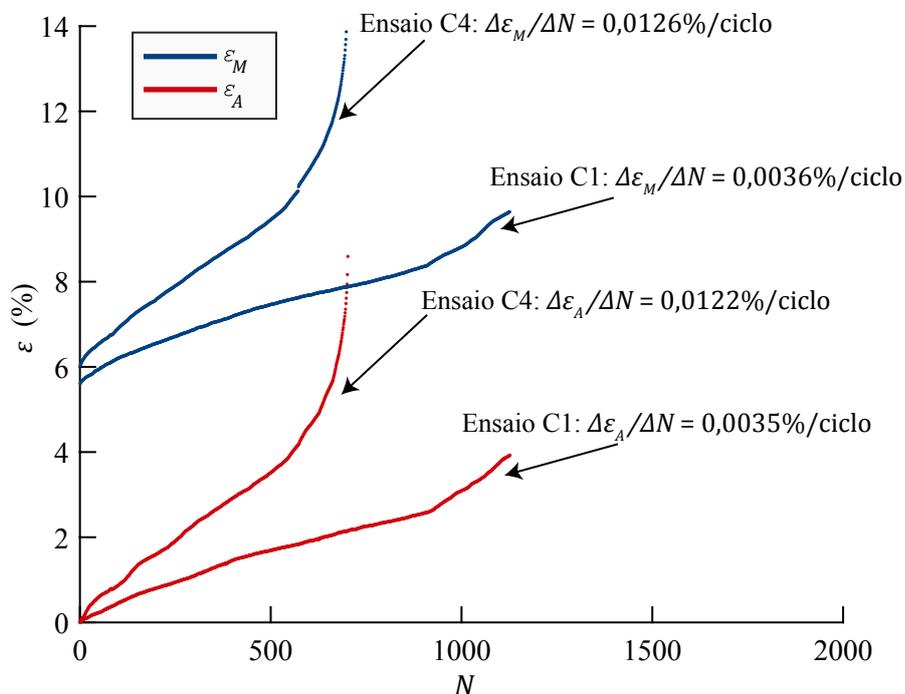


Figura 4.9. Evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  em ensaios da série C. Tensão de 200 MPa (C4) e 125 MPa (C1).

A tabela (4.2) apresenta os resultados quantificados detalhadamente dos ensaios B1, B2, B3 e B4 da série B e dos ensaios C1, C2, C3 e C4 da série C.

Tabela 4.2. Resultados dos ensaios das séries B e C.

Identidade do ensaio	Tensão axial aplicada, $\sigma$ (MPa)	Vida, $N_f$	$\overline{EMF}$ (%)	Varição de $EMF$ (%)	$\varepsilon_A$ no último ciclo antes da falha, $\varepsilon_P$ (%)	$\varepsilon_M$ no último ciclo antes da falha (%)
B1	125	7008	5,64	0,07	1,32	6,98
B2	150	6583	5,75	-0,19	2,07	7,7
B3	175	5670	5,78	-0,19	2,4	8,02
B4	200	4733	5,72	-0,37	3,42	8,98
C1	125	1128	5,75	0,11	3,93	9,64
C2	150	1009	5,8	0,12	3,67	9,47
C3	175	789	5,91	0,32	8,26	14,33
C4	200	703	5,98	0,70	8,59	14,89

Assim como observado na série A de ensaios, as deformações evoluem com valor de  $\Delta\varepsilon/\Delta N$  maior em ensaios que possuem maior tensão mecânica. Portanto, ao verificar todos os 24 ensaios realizados, percebe-se que a tensão mecânica axial influencia a quantidade de deslocamento que o atuador é capaz de realizar durante a ciclagem.

Com condições de resfriamento mais lento, a série B de ensaios apresenta maior vida em fadiga quando comparada às demais séries. O ensaio B1 foi o ensaio que apresentou maior vida em fadiga dentre todos os ensaios, com  $N_f = 7008$  ciclos. A evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  acontece de forma menos acentuada que as demais séries, isto é, com valores mais baixos de  $\Delta\varepsilon/\Delta N$ , vide Fig. (4.6) e Fig. (4.8).

A série C apresenta vida em fadiga bastante reduzida, entre 703 e 1128 ciclos até a falha. Os ensaios apresentam evolução das deformações  $\varepsilon_A$  e  $\varepsilon_M$  superiores a 0,01% ao ciclo e valores superiores a 8% de acúmulo de deformação plástica nos ensaios C3 e C4, com 175 e 200 MPa, respectivamente, vide Fig. (4.7) e Fig. (4.9).

Os 24 ensaios de ciclagem termomecânica apresentaram variação de  $EMF$  inferior a 1%. Por esse motivo, conclui-se que o material analisado sofre pouca perda funcional de memória de forma, visto que a curva  $EMF \times N$  mantém-se aproximadamente constante. Os ensaios A15, B4 e C4, todos eles com tensão nominal de 200 MPa, apresentaram maior variação de  $EMF$ : decréscimo de 0,36%, decréscimo 0,37% e acréscimo de 0,70%, respectivamente. Dado que nenhum ensaio resultou em variação maior que 1%, pode-se dizer que as condições dos ensaios não influenciaram significativamente a funcionalidade do atuador.

Essa estabilidade de *EMF* também foi observada por Mammano e Dragoni (2014) em boa parte de seus ensaios com o mesmo material, apesar de ter observado maior degradação de *EMF* em alguns ensaios, principalmente em deformação limitada, que tendem a possuir vida em fadiga estrutural maior. Nesse âmbito, Saikrishna *et al.* (2013) e Lagoudas *et al.* (2009) percebem alta degradação de *EMF* em seus ensaios com materiais distintos, evidenciando que além da composição do material, aspectos como os processos de conformação mecânica do atuador, tratamentos térmicos e processos de *training* prévios influenciam os resultados de fadiga.

Apesar da variação inferior a 1%, percebe-se maior variação de *EMF* ao aumentar a tensão mecânica aplicada ao fio. A figura (4.10) relaciona a variação de *EMF* ao fim dos ensaios com a tensão aplicada, para cada uma das condições de aquecimento e resfriamento (séries A, B e C). A tendência da série C, diferente das demais, foi de aumento de *EMF* com a ciclagem.

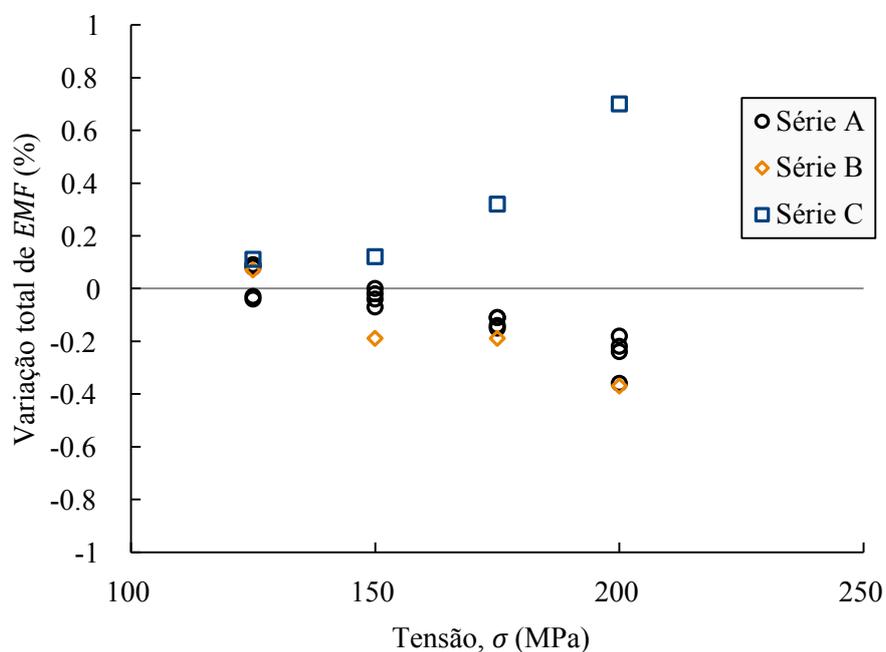


Figura 4.10. Variação de *EMF* nos ensaios.

Em resumo, constata-se que o material investigado sofre degradação do efeito memória de forma inferior a 1%, como visto na Fig. (4.10), e tende a possuir maior evolução das deformações  $\epsilon_A$  e  $\epsilon_M$  quando submetido a tensões axiais elevadas.

## 4.2 FADIGA ESTRUTURAL

Os ensaios da série A, que correspondem a 16 ensaios em quatro diferentes níveis de tensão, são expressos em uma curva S-N com quantidade de pontos que garantem maior confiabilidade, como apresenta a Fig. (4.11).

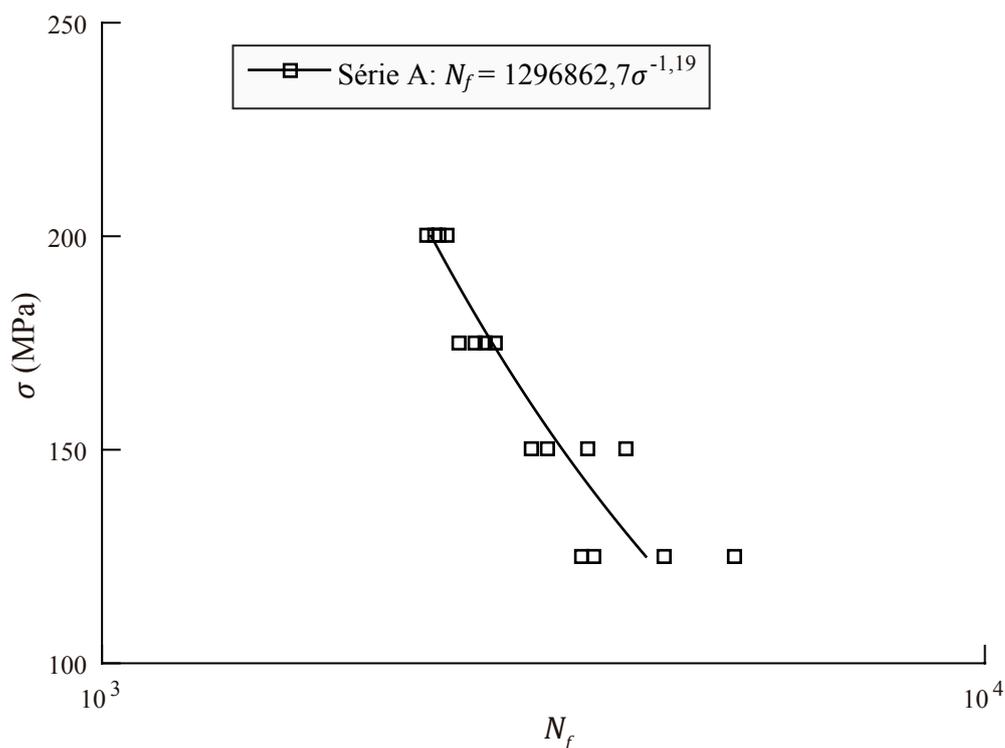


Figura 4.11. Curva S-N da série A.

Percebe-se que a tensão aplicada influencia a vida em fadiga do material, tendo em vista a disposição dos pontos da curva S-N apresentada na Fig. (4.11). Também se verifica uma dispersão mais agrupada dos pontos em tensões superiores, por outro lado, os resultados de vida em fadiga das tensões mais inferiores são mais divergentes e intervalados. A tabela (4.3) apresenta a dispersão dos valores de  $N_f$  para cada nível de tensão, onde nota-se maior desvio padrão amostral em ensaios com menor tensão mecânica aplicada.

Tabela 4.3. Medida de dispersão dos valores de vida em fadiga dos ensaios da série A.

Tensão axial aplicada, $\sigma$ (MPa)	Quantidade de ensaios	$N_f$ médio	Desvio padrão amostral, s
125	4	4159	794,0
150	4	3432	389,5
175	4	2673	109,5
200	4	2396	52,7

De forma semelhante, as curvas S-N mostradas na Fig. (4.12) exibem a relação entre a tensão mecânica aplicada ao fio e o ciclo em que ocorre seu rompimento das séries A, B e C com suas respectivas equações de ajuste.

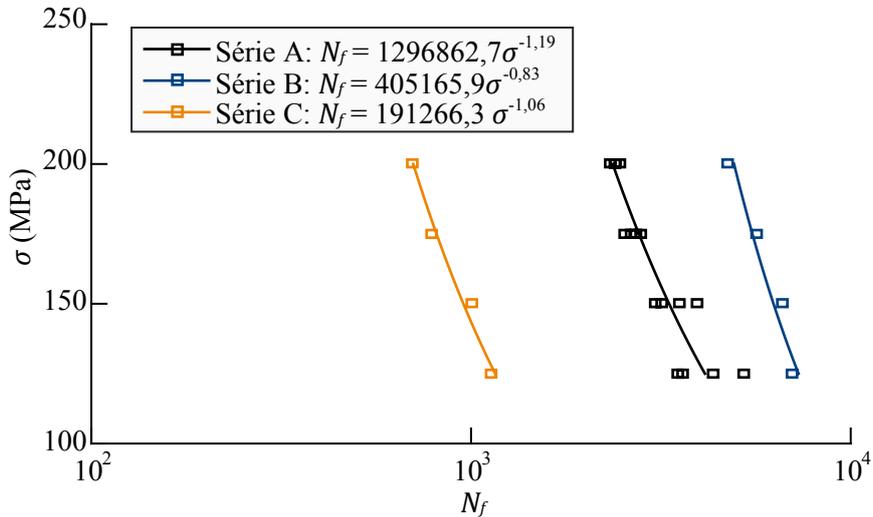


Figura 4.12. Curvas S-N dos ensaios de fadiga termomecânica.

A vida em fadiga do material *SmartFlex*<sup>®</sup> diminui ao elevar a tensão mecânica do ensaio. O fato corrobora com os resultados de Mammano e Dragoni (2011; 2014) com o mesmo material. Essa afirmação já é consenso na literatura de fadiga termomecânica em ligas NiTi (Mahtabi *et al.*, 2015). Entretanto, as condições de aquecimento e resfriamento deslocam as curvas horizontalmente.

A figura (4.13) apresenta a curva de acúmulo de deformação plástica nos 24 ensaios realizados. Na mesma área de plotagem, a curva é confrontada com os resultados dos ensaios de fadiga do mesmo material em tensão constante e ensaios de fadiga em deformação total limitada a 3% e 4% de Mammano e Dragoni (2014), com um total de 28 ensaios, excluindo os ensaios que alcançaram vida infinita (limitada em 500 mil ciclos) e os ensaios com tensão nominal inferior a 125 MPa.

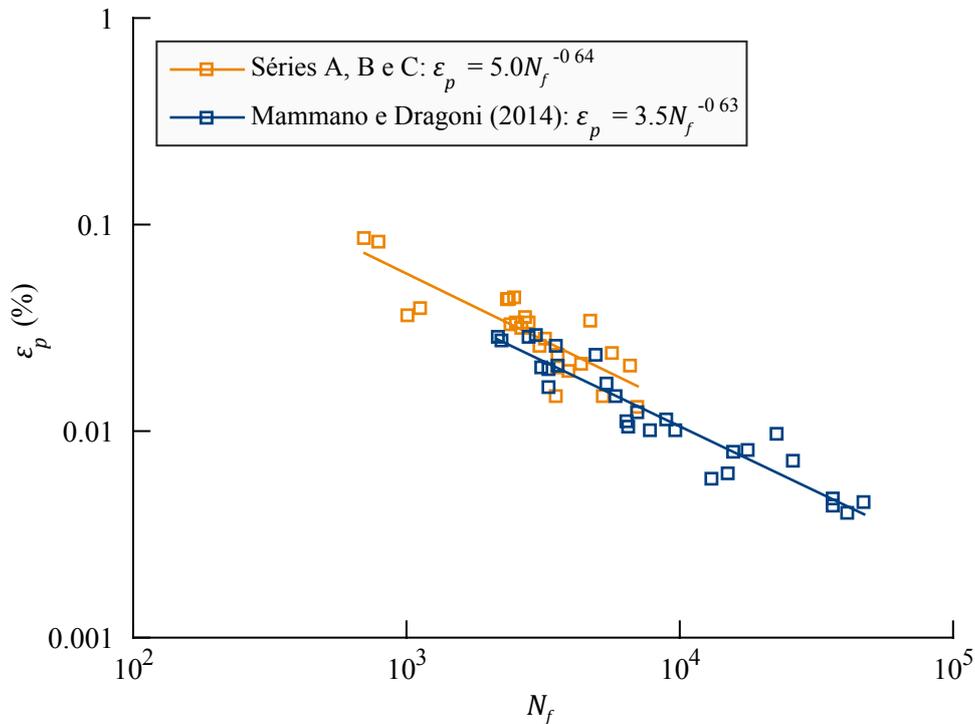


Figura 4.13. Relação entre a deformação plástica e a quantidade de ciclos até a falha do material.

As deformações plásticas acumuladas nos ensaios das séries A, B e C se ajustam com a função  $\varepsilon_p = 5,0 N_f^{-0,64}$ , com valor do expoente próximo ao valor encontrado na função que ajusta os dados de Mammano e Dragoni (2014),  $\varepsilon_p = 3,5 N_f^{-0,63}$ . O expoente da função,  $\beta$ , geralmente é relacionado com o material utilizado e usualmente se encontra próximo a 0,5 para materiais metálicos (Schijve, 2009). As condições estabelecidas de aquecimento e resfriamento dos fios atuadores podem explicar o valor encontrado do coeficiente que multiplica a função,  $\alpha = 5,0$ .

O levantamento da curva da Fig. (4.14) busca reunir os ensaios de fadiga do fio *SmartFlex*<sup>®</sup> de 150 micrometros de diâmetro das séries A, B e C, além dos ensaios de Mammano e Dragoni (2014) com fios de mesmo material e diâmetro, ajustados em uma nuvem de 52 pontos. O parâmetro baseado no modelo modificado de SWT (Calhoun *et al.*, 2015), denominado trabalho de atuação por unidade de volume (em MJ/m<sup>3</sup>), é relacionado com a vida em fadiga do material. Foi encontrada a curva de ajuste de  $\varphi = 49,5 N_f^{-0,22}$ .

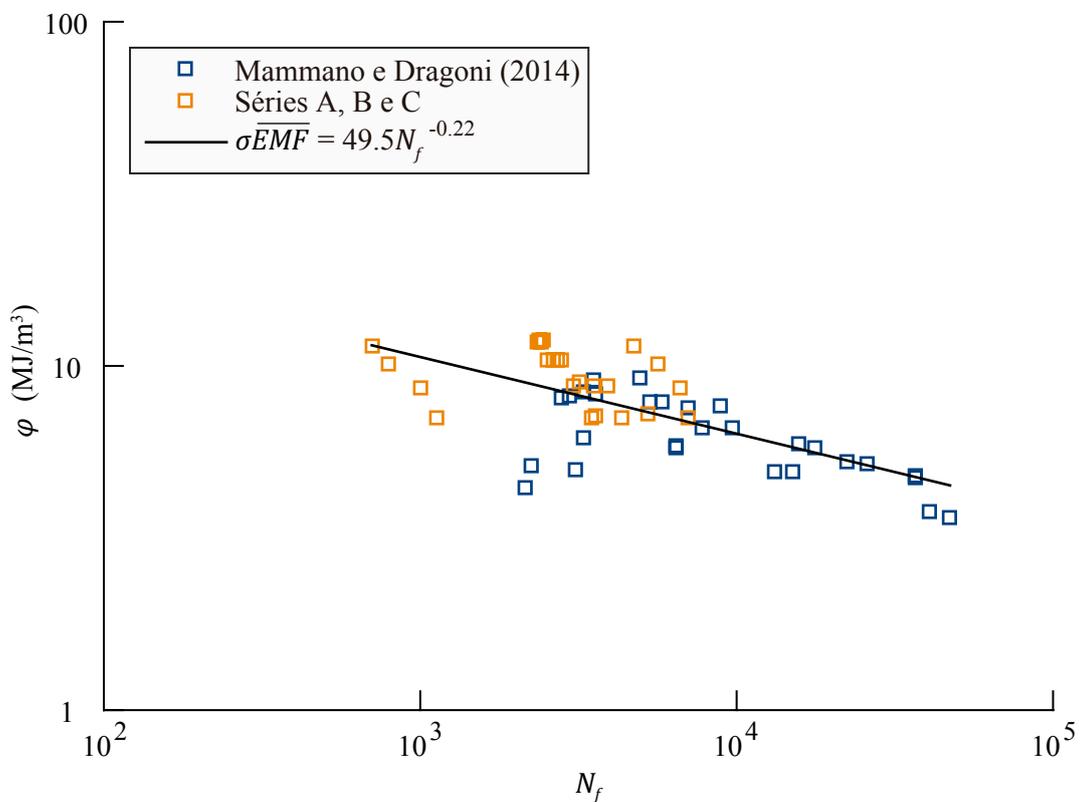


Figura 4.14. Relação entre o parâmetro  $\sigma \overline{EMF}$  e a quantidade de ciclos até a falha do material.

É possível reunir os resultados de Mammano e Dragoni (2014) e das séries A, B e C, que investigam o mesmo material, em uma curva de ajuste só,  $\sigma \overline{EMF} = 49,5 N_f^{-0,22}$ . A curva encontrada certifica que não só a tensão mecânica tem influência na vida em fadiga do atuador de LMF, mas também a deformação recuperável (*EMF*) executada durante a ciclagem termomecânica. Como esperado, um maior trabalho de atuação do fio de LMF resulta em menor vida em fadiga (Calhoun *et al.*, 2015).

### 4.3 INFLUÊNCIA DA TAXA DE AQUECIMENTO E RESFRIAMENTO

A taxa de aquecimento e resfriamento, que pode também ser entendida como a velocidade em que se ocorrem as transformações de fase no fio atuador, é analisada nesta seção do trabalho. É importante lembrar que a bancada realiza apenas o monitoramento de temperatura no fio investigado neste trabalho. Portanto, avalia-se a corrente elétrica aplicada ao fio para aquecimento e a velocidade com que o fio se deforma ao longo da direção axial.

O efeito da corrente elétrica aplicada para aquecimento do fio via efeito *Joule* é relacionado com a quantidade de ciclos até a falha dos corpos de prova, vide Fig. (4.15).

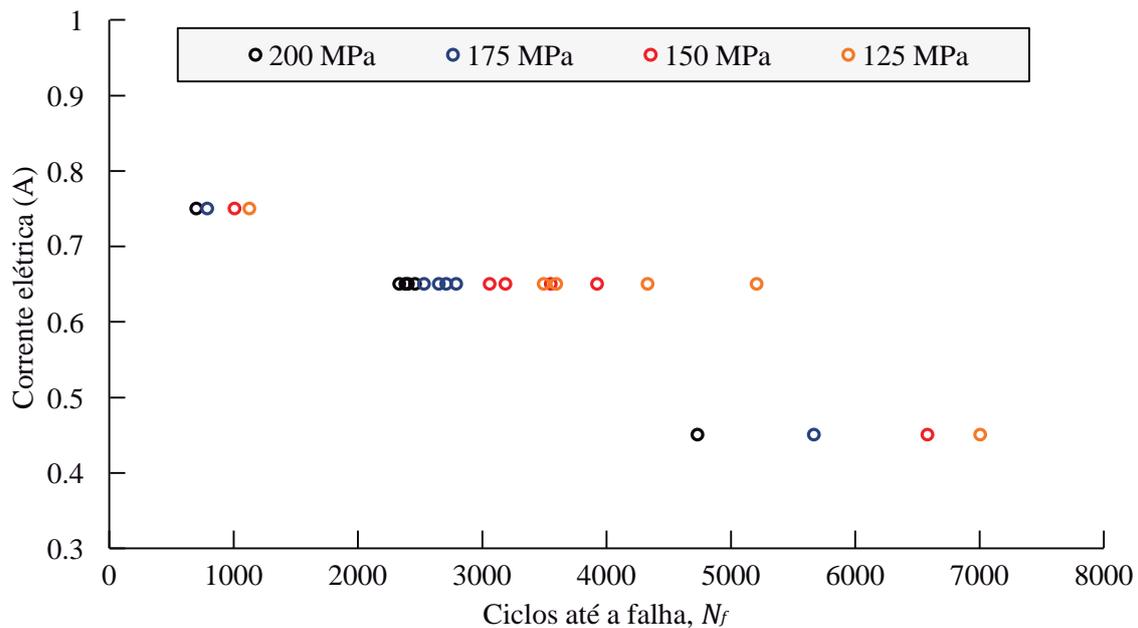


Figura 4.15. Relação entre a corrente aplicada e a quantidade de ciclos até a falha do material.

A corrente elétrica aplicada ao fio tem influência nítida na vida em fadiga estrutural do material testado. O gráfico ilustrado na Fig. (4.15) demonstra que o aquecimento intenso, em corrente elétrica elevada, reduz a vida útil e acentua a evolução de deformação plástica do fio atuador. A série C de ensaios, que foi designada com aquecimento em 0,75 A de corrente elétrica, resultou em menor vida em fadiga. Por outro lado, a série B de ensaios apresentou melhor vida útil, uma vez que se designou 0,45 A de corrente elétrica para aquecimento do fio. Com condições intermediárias entre as duas outras séries (0,65 A), a série A também obteve resultados intermediários de vida em fadiga, quando comparada às demais séries.

A figura (4.16) mostra o primeiro minuto dos ensaios realizados (tensão de 200 MPa), com a intenção de expor como se sucede a evolução das deformações em ensaios termomecânicos de fadiga em LMF. O primeiro aquecimento dos ciclos é amplificado para melhor visualização.

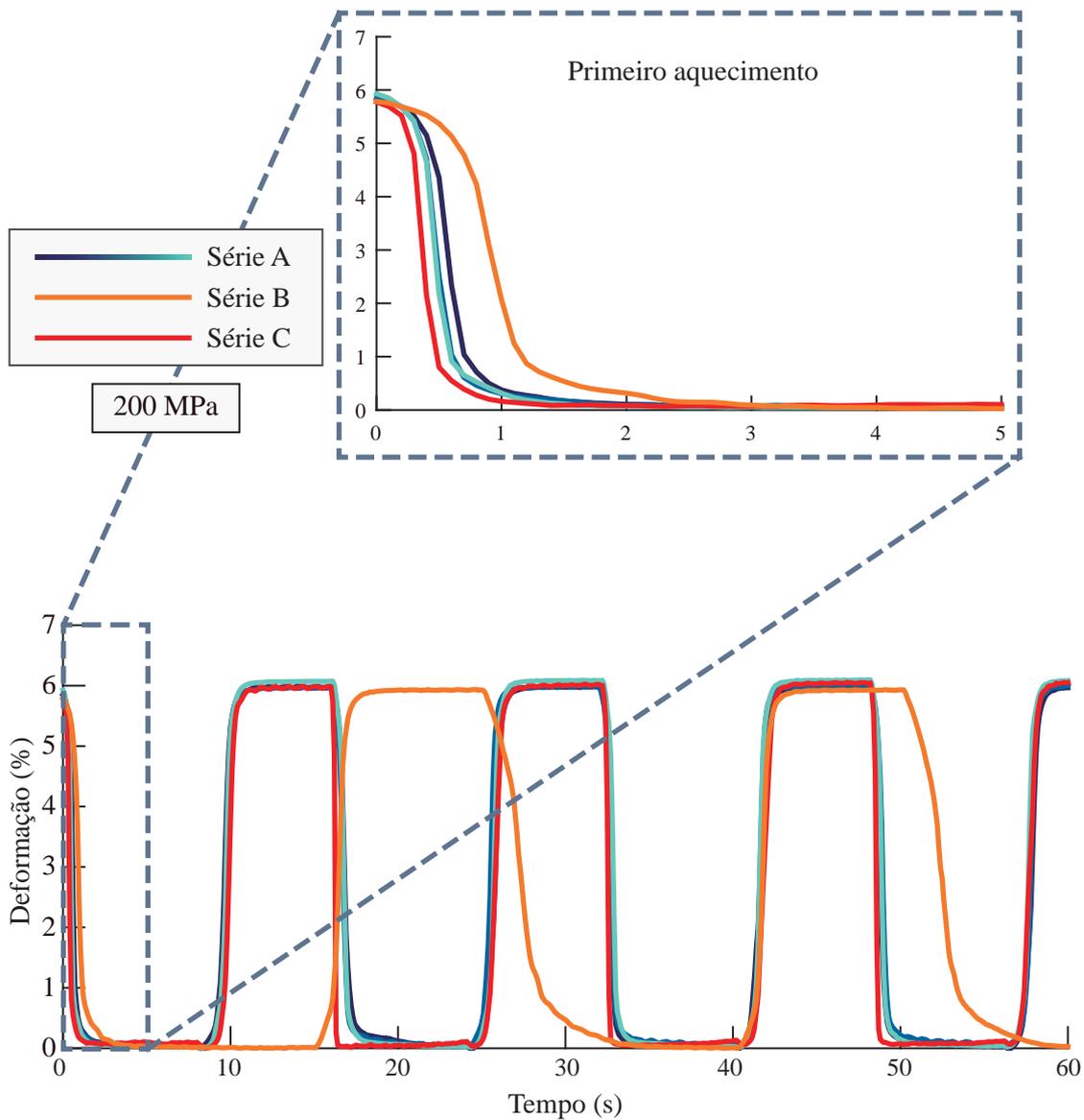


Figura 4.16. Ciclos iniciais dos ensaios termomecânicos com 200 MPa.

É notório que os ensaios realizam transformação martensítica completa na ciclagem, uma vez que se verifica um patamar de deformação constante mínimo (quando o material se encontra em fase austenita) e um patamar de deformação constante máximo (material em fase martensita), vide Fig. (4.16). Ao visualizar a ampliação no primeiro aquecimento dos ensaios, nota-se que a variação de deformação é mais abrupta quando a corrente elétrica aplicada é superior. Em uma visualização mais macroscópica dos primeiros ciclos dos ensaios apresentados, as condições de aquecimento e resfriamento não parecem interferir no valor da deformação recuperável (*EMF*) nos ciclos iniciais.

As taxas de atuação média no aquecimento e no resfriamento são correlacionadas com a vida em fadiga dos corpos de prova para cada uma das tensões mecânicas determinadas. A figura (4.17) apresenta essa relação nos ensaios com tensão de 125 MPa e 150 MPa. De forma semelhante, os ensaios com 175 MPa e 200 MPa são apresentados na Fig. (4.18).

Para levantamento dos gráficos de taxa de atuação média, apresentados na Fig. (4.17) e na Fig. (4.18), calcula-se a taxa de atuação no aquecimento e resfriamento em cada ciclo do ensaio avaliado através da Eq. (3.13) e, por fim, tira-se a média.

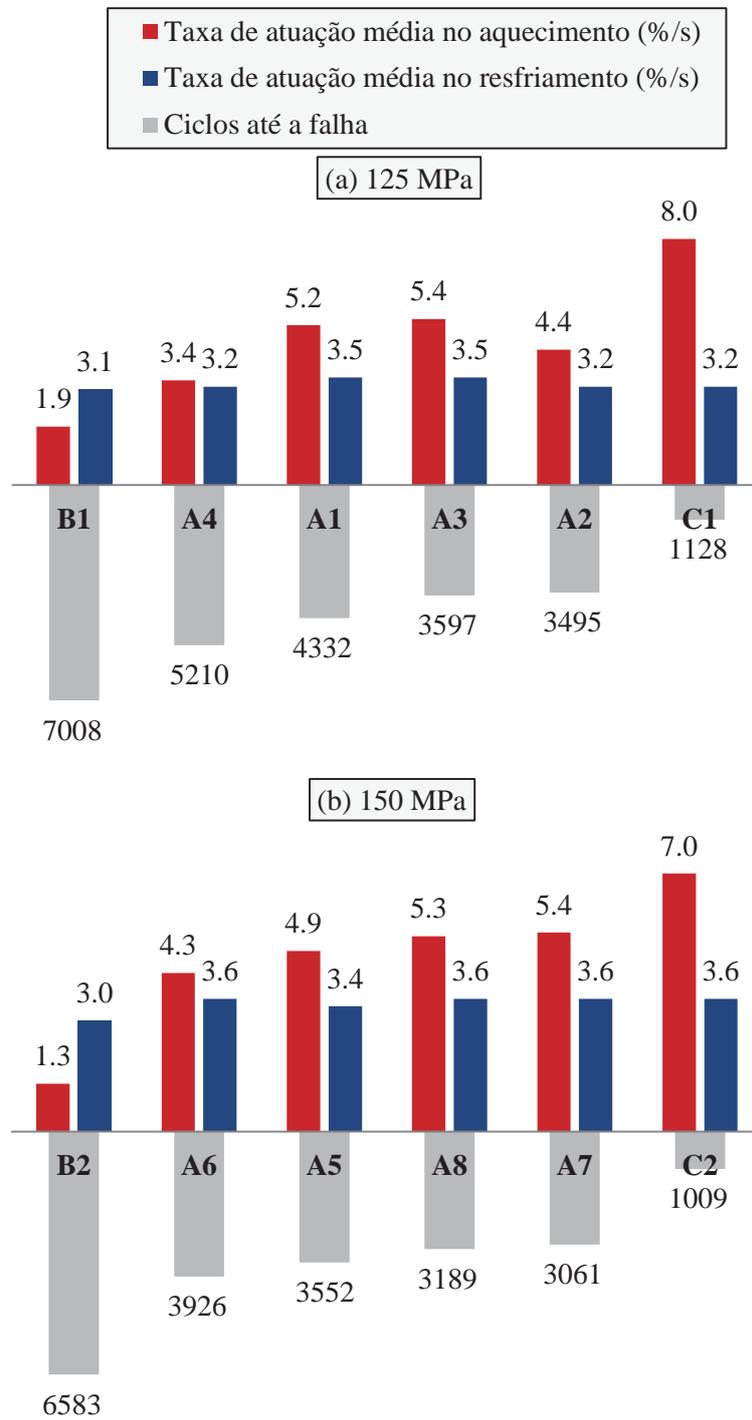


Figura 4.17. Relação entre a taxa de atuação média e a vida em fadiga. (a) ensaios com tensão de 125 MPa, (b) ensaios com tensão de 150 MPa.

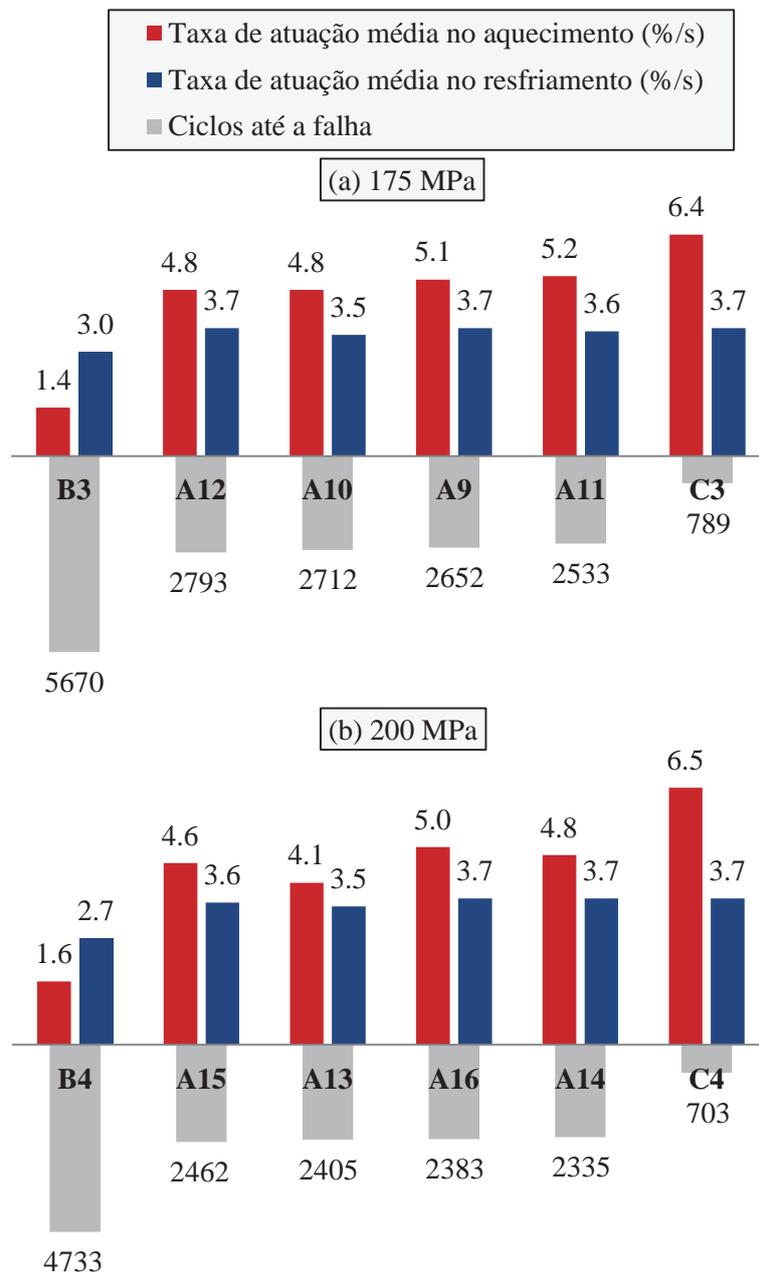


Fig. 4.18. Relação entre a taxa de atuação média e a vida em fadiga. (a) ensaios com tensão de 175 MPa, (b) ensaios com tensão de 200 MPa.

Verifica-se que a taxa de atuação dos fios testados (em %/s) influencia na vida em fadiga do material, visto que para uma dada tensão mecânica, a contagem de ciclos até a falha é menor quando a taxa de atuação é alta, como demonstra a Fig. (4.17) e a Fig. (4.18). Os ensaios da série C, por exemplo, possuem vida em fadiga entre 703 a 1128 ciclos e foram realizados com taxa de atuação no aquecimento entre 6,4 %/s e 8 %/s, caracterizando a série de ensaios com menor vida em fadiga e taxas de atuação mais elevadas.

Casati *et al.* (2011) constatam que o aquecimento com impulso de corrente em forma de rampa resulta em menor acúmulo de deformação plástica e maior vida em fadiga ao ser comparado com

impulso em forma de degrau. O impulso em forma de rampa, por outro lado, acarretou em maior degradação do efeito memória de forma. De forma semelhante, Mammano e Dragoni (2015) perceberam que a corrente elétrica aplicada em forma de onda senoidal resulta em vida em fadiga superior, quando comparado com a corrente aplicada em forma de degrau. Ao ser comparado com outras formas de impulsos com mesmo pico máximo, o impulso em degrau resulta em aquecimento mais acelerado e, por consequência, também acelera a transformação de fase na ciclagem.

Lagoudas *et al.* (2009) e Mammano e Dragoni (2015) estabelecem que ensaios de fadiga termomecânica de fios atuadores possuem maior vida em fadiga estrutural quando não trespasam a transformação martensítica inversa e direta completamente.

Tais conhecimentos podem explicar a vida em fadiga reduzida nos ensaios das séries A, B e C do presente trabalho, ao serem comparados com os ensaios de Mammano e Dragoni (2014) com o mesmo material. Os ensaios de Mammano e Dragoni (2014) foram aquecidos por meio de uma onda senoidal de corrente elétrica, oscilando entre corrente nula e um pico máximo de corrente, além de permitirem o aquecimento em menos de 4 segundos, tempo que pode não assegurar transformação martensítica completa do material. Os fios atuadores das séries A, B e C do presente trabalho foram aquecidos em impulsos de corrente em forma de degrau e percorrendo transformações de fase completa.

Ao avaliar todas as condições de aquecimento e resfriamento do fio atuador, entende-se que as condições de atuação mais lentas, caracterizadas nos ensaios da série B, parecem ser mais interessantes em projetos de atuador de LMF, porque conferem maior vida em fadiga, menor acúmulo de deformação plástica e tempo de atuação razoável. Ciclagens por transformação martensítica incompleta, permitindo que o fio aqueça e esfrie por menos tempo, também podem melhorar o desempenho do atuador, como sugerem Lagoudas *et al.* (2009) e Mammano e Dragoni (2015).

## 5 CONCLUSÕES

Fios *SmartFlex*<sup>®</sup> com 150  $\mu\text{m}$  de diâmetro de liga NiTi com memória de forma foram submetidos a ciclos termomecânicos, com tensão constante e com variação de temperatura que garanta completa transformação de fase do material. Os 24 ensaios de ciclagem termomecânica em condições diferentes permitiram estabelecer algumas conclusões, principalmente relativas à influência de variáveis como a tensão mecânica aplicada e a taxa de aquecimento e resfriamento, que pode também ser entendida como a velocidade em que se ocorrem as transformações de fase no fio atuador.

O material *SmartFlex*<sup>®</sup>, indicado para uso como fio atuador, variou sua deformação recuperável na ciclagem (*EMF*) em no máximo 0,7 %. Infere-se que o material sofre pouca fadiga funcional, uma vez que o efeito memória de forma não é comprometido com a degradação da deformação recuperável nessa intensidade.

A fadiga estrutural dos fios atuadores também foi avaliada. Uma curva S-N com 16 pontos em quatro níveis de tensão (125 MPa, 150 MPa, 175 MPa e 200 MPa) foi apresentada para o material investigado. Da curva S-N, conclui-se que a vida em fadiga do material tende a diminuir com o aumento de tensão. Os resultados de vida em fadiga,  $N_f$ , foram mais dispersos em quando a tensão mecânica diminui. Percebe-se que em condições diversas de aquecimento e de resfriamento do fio, desloca-se horizontalmente a curva S-N.

Curvas  $\varepsilon_p \times N_f$  demonstram que o aumento na tensão mecânica tende a ocasionar acúmulo mais acelerado de deformações plásticas. O expoente de ductilidade encontrado,  $\beta = 0,64$ , corrobora com os ensaios de Mammano e Dragoni (2014) com o mesmo material.

Os ensaios do trabalho são associados com os ensaios de Mammano e Dragoni (2014) que apuram o mesmo material, em uma nuvem de pontos que relaciona o trabalho de atuação por unidade de volume, produto da tensão aplicada pela deformação recuperável média, com a vida em fadiga. Como esperado, o material tende a falhar mais rapidamente quando submetido o trabalho de atuação aumenta.

Por fim, avaliou-se a influência da taxa de atuação do fio na vida em fadiga do material. Os ensaios que foram aquecidos com corrente elétrica superior (via efeito *Joule*) falharam com menos ciclos. Ao analisar a taxa de atuação média no aquecimento e no resfriamento dos fios ensaiados, conclui-se que a diminuição da taxa de atuação do fio resulta em aumento na vida útil do fio atuador.

De forma geral, conclui-se que a tensão mecânica aplicada ao fio e a taxa de aquecimento e resfriamento influenciam na vida em fadiga de fios atuadores com memória de forma.

Trabalhos futuros podem explorar o sensor infravermelho de temperatura presente na bancada experimental utilizada no trabalho, com intuito de levantar os laços de histerese ( $\varepsilon \times T$ ) em fios de

maior diâmetro, avaliando as alterações provenientes da ciclagem termomecânica. Uma maior quantidade de ensaios também pode ser realizada para garantir maior confiabilidade e replicação. A partir da literatura e das conclusões do trabalho, é possível estabelecer ensaios termomecânicos com condições que levem o fio atuador a adquirir melhor vida útil: aquecendo-o e resfriando-o mais lentamente, evitando transformações de fase completas e diminuindo o trabalho de atuação do fio.

# REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agboola, B.O.; Hartl, D.J.; Lagoudas, D.C. (2012). A study of actuation fatigue of shape memory alloy. Artigo de conferência. *Proceedings of the ASME 2012 Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*. 8 p.
- Araújo, C.J.; Morin, M.; Guénin, G. (1997). Fatigue behavior of Ti-Ni-Cu thin wires SME. *Journal de Physique IV*. Vol. 4, p. C5-501-C5-506.
- ASTM Standard E739-10 (2015). Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life (S-N) and Strain-Life (epsilon-N) Fatigue Data.
- Bathias, C.; Pineau, A. (Editores). (2010). *Fatigue of Materials and Structures: Fundamentals*. Hoboken: John Wiley & Sons. 521 p.
- Benafan, O.; Noebe, R.D.; Padula II, S.A.; Brown, D.W.; Vogel, S.; Vaidyanathan, R. (2014). Thermomechanical cycling of a NiTi shape memory alloy-macroscopic response and microstructural evolution. *International Journal of Plasticity*. Vol. 56, p. 99-118.
- Bertacchini, O.W.; Lagoudas, D.C.; Patoor, E. (2009). Thermomechanical transformation fatigue of TiNiCu SMA actuators under a corrosive environment – Part I: Experimental results. *International Journal of Fatigue*. Vol. 31, p. 1571-1578.
- Bo, Z.; Lagoudas, D.C.; (1999). Thermomechanical modeling of polycrystalline SMAs under cyclic loading, Part III: evolution of plastic strains and two-way shape memory effect. *International Journal of Engineering Science*. Vol. 37, p. 1175-1203.
- Borlandelli, E.; Scarselli, D.; Nespoli, A.; Rigamonti, D.; Bettini, P.; Morandini, M.; Villa, E.; Sala, G.; Quadrio, M. (2015). Design and experimental characterization of NiTi-based, high-frequency, centripetal peristaltic actuator. *Smart Materials and Structures*. Vol. 24, 10 p.
- Calhoun, C.; Wheeler, R.; Baxevanis, T.; Lagoudas, D.C. (2015). Actuation fatigue life prediction of shape memory alloys under the constant-stress loading condition. *Scripta Materialia*. Vol. 95, p. 58-61.
- Casati, R.; Passaretti, F.; Tuissi, A. 2011. Effect of electrical heating conditions on functional fatigue of thin NiTi wire for shape memory actuators. *Procedia Engineering*. Vol. 10, p. 3423-3428.
- Coffin, L.F. (1954). A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. Vol. 76, p. 931-950.
- Contardo, L.; Guénin, G. (1990). The two way memory effect in a Cu-Zn-Al alloy: the behaviour during the training process. *Materials Science Forum*. Vol. 56-58, p. 529-534.

Delaey, L.; Krishnan, V.R.; Tas, H.; Warlimont, H. (1974). Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1: Structural and microstructural changes associated with the transformations. *Journal of Materials Science*. Vol. 9, p. 1521-1535.

Dowling, N.E. (2013). Mechanical Behavior of Materials: Engineering Methods for Deformation, Fracture, and Fatigue. 4. ed. *Upper Saddle River*: Pearson, 936 p.

Duering, T.; Pelton, A.; Stockel, D. (1999). An overview of nitinol medical applications. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 273-275, p. 149-160.

Eggeler, G.; Hornbogen, E.; Yawny, A.; Heckmann, A.; Wagner, M. (2004). Structural and functional fatigue of NiTi shape memory alloys. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 378, p. 24-33.

Fumagalli, L.; Butera, F.; Coda, A. (2009). Smartflex® NiTi wires for shape memory actuators. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 18, p. 691-695.

Hebda, D.; White, S.R. (1995). Effect of training conditions and extended thermal cycling on nitinol two-way shape memory behavior. *Smart Materials and Structures*. Vol. 4, p. 298-304.

Hornbogen, E. (2002). Some effects of martensitic transformation of fatigue resistance. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. Vol. 25, p. 785-790.

Hornbogen, E. (2004). Review: Thermo-mechanical fatigue of shape memory alloys. *Journal of Materials Science*. Vol. 39, p. 385-399.

Huber, J.E.; Fleck, N.A.; Ashby, M.F. (1997). The selection of mechanical actuators based on performance indices. *Proceedings of the Royal Society of London A*. Vol. 453, p. 2185-2205.

Humbeeck, J.V. (1991). Cycling effects, fatigue and degradation of shape memory alloys. *Journal de Physique IV*. Vol. 1, p. C4-189-C4-197.

Humbeeck, J.V. (2001). Shape memory alloys: a material and a technology. *Advanced Engineering Materials*. Vol. 3, p. 837-850.

Jones, N.G.; Dye, D. (2011). Martensite evolution in a NiTi shape memory alloy when thermal cycling under an applied load. *Intermetallics*. Vol. 19, p. 1348-1358.

Krishnan, V.R.; Delaey, L.; Tas, H.; Warlimont, H. (1974). Thermoplasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 2: The macroscopic mechanical behaviour. *Journal of Materials Science*. Vol. 9, p. 1536-1544.

Lagoudas, D.C. (Editor). (2008). Shape memory alloys: modeling and engineering applications. *1st ed. New York*: Springer, 435 p.

Lagoudas, D.C.; Miller, D.A.; Rong, L.; Kumar, P.K. (2009). Thermomechanical fatigue of shape memory alloys. *Smart Materials and Structures*. Vol. 18, 12 p.

Lexcellent, C. (2013). Shape-memory Alloys Handbook. *Hoboken*: John Wiley & Sons, 379 p.

- Li, Y.F.; Mi, X.J.; Tan, J. Gao, B.D. (2009). Thermo-mechanical cyclic transformation behavior of Ti–Ni shape memory alloy wire. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 509, p. 8-13.
- Mahtabi, M.J.; Shamsaei, N.; Mitchell, M.R. (2015). Fatigue of Nitinol: The state-of-the-art and ongoing challenges. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. Vol. 50, p. 228-254.
- Maletta, C.; Sgambitterra, E.; Furgiuele, F.; Casati, R.; Tuissi, A. (2014). Fatigue of pseudoelastic NiTi within the stress-induced transformation regime: a modified Coffin-Manson approach. *Smart Materials and Structures*. Vol. 21. 7 p.
- Mammano, G.S.; Dragoni, E. (2011). Functional fatigue of shape memory wires under constant-stress and constant-strain loading conditions. *Procedia Engineering*. Vol. 10, p. 3692-3707.
- Mammano, G.S.; Dragoni, E. (2014). Functional fatigue of Ni-Ti shape memory wires under various loading conditions. *International Journal of Fatigue*. Vol. 69, p. 71-83.
- Mammano, G.S.; Dragoni, E. (2015). Effect of stress, heating rate, and degree of transformation on the functional fatigue of Ni-Ti Shape Memory Wires. *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 24, p. 2709-2719.
- Manson, S.S. (1953). Behavior of materials under conditions of thermal stress. Artigo de conferência. *Heat Transfer Symposium, University of Michigan Engineering Research Institute*.
- McCormick, P.G.; Liu, Y. (1994). Thermodynamic analysis of the martensitic transformation in NiTi-II. Effect of transformation cycling. *Acta Metallurgica et Materialia*. Vol. 42, p. 2407-2413.
- Miller, D.A.; Lagoudas, D.C. (2000). Thermomechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA actuators: influence of plastic strains. *Smart Materials and Structures*. Vol. 9, p. 640-652.
- Miyazaki, S., Otsuka, K., Suzuki, Y. (1981). Transformation pseudoelasticity and deformation behavior in a Ti–50.6 at% alloy, *Scripta Metallurgica*. Vol. 15, p. 287–292.
- Miyazaki, S.; Igo, Y.; Otsuka, K. (1986). Effect of thermal cycling on the transformation temperatures of NiTi alloys. *Acta Metallurgica*. Vol. 34, p. 2045-2051.
- Morgan, N.B.; Friend, C.M. (2001). A review of shape memory stability in NiTi alloys. *Journal de Physique IV*. Vol. 11, p. 325-332.
- Pelton, A.R.; Huang, G.H.; Moine, P.; Sinclair, R. (2012). Effects of thermal cycling on microstructure and properties in Nitinol. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 532, p. 130-138.
- Perkins, J.; Muesing, W.E. (1983). Martensitic transformation cycling effects in Cu-Zn-Al shape memory alloys. *Metallurgical Transactions A*. Vol. 14A, p. 33-36.
- Ramaiah, K.V.; Saikrishna, C.N.; Ranganath, V.R.; Buravalla, V.; Bhaumil, S.K. (2011). Fracture of thermally activated NiTi shape memory alloy wires. *Materials Science and Engineering A*. Vol. 528, p. 5502-5510.

- Rao, A.; Srinivasa, A.R.; Reddy, J.N. (2015). Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators. *New York: Springer*, 130 p.
- Saikrishna, C.N.; Ramaiah, K.V.; Bhagyaraj, J.; Gouthama; Bhaumik, S.K. (2013). Influence of stored elastic strain energy on fatigue behaviour of NiTi shape memory alloy thermal actuator wire. *Materials Science & Engineering A*. Vol. 587, p. 65-71.
- Schijve, J. (2009). Fatigue of Structures and Materials. *Amsterdam: Springer*, 623 p.
- Sehitoglu, H. (1992). Thermo-mechanical fatigue life prediction methods. *Advances in Fatigue Lifetime Predictive Techniques*. Vol. 1, p. 47-76.
- Silva, T.C.; Barcelos, A.P.; Silva, E.P. (2017). Influence of thermal cycling on the phase transformation temperatures and latent heat of a NiTi shape memory alloy. Artigo de conferência. *SMST-2017: International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*. 2 p.
- Smith, K.N.; Watson, P.; Topper, T.H. (1970). A stress-strain parameter for the fatigue of metals. *Journal of Materials*, Vol. 5, N° 4, p. 767-778.
- Song, G.; Ma, N.; Li, H.N. (2006). Applications of shape memory alloys in civil structures. *Engineering Structures*. Vol. 28, p. 1266-1274.
- Stephens, R.I.; Fatemi, A.; Stephens, R.R.; Fuchs, H.O. (2001). Metal fatigue in Engineering. 2. ed. *New York: John Wiley & Sons*, 472 p.
- Tamura, H.; Mitose, K.; Suzuki, Y. (1995). Fatigue properties of Ni-Ti shape memory alloy springs. *Journal de Physique IV*. Vol. 5, p. C8-617 – C8-622.
- Thompson, S. (2000). An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry. *International Endodontic Journal*. Vol. 33, p. 297-310.
- Toia, L.L.; Coda, A.; Vergani, G. Fumagalli, L.; Butera, F. (2006). Functional characterization of SMA wires in actuation conditions. Artigo de conferência. *SMST-2006: Proceedings of the International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*. p. 499-506.
- Wheeler, R.W.; Lagoudas, D.C. (2017). Recent developments on SMA actuators: predicting the actuation fatigue life for variable loading schemes. Artigo de conferência. *SPIE 10172, A Tribute Conference Honoring Daniel Inman*. 11 p.
- Wöhler, A. (1860). Versuche über die Festigkeit der Eisenbahnwagenachsen. *Zeitschrift für Bauwesen*. Vol. 10.
- Yamauchi, K.; Ohtaka, I.; Tsuchiya, K.; Miyazaki, S. (2011). Shape memory and superelastic alloys: Technologies and applications. *Padstow: Woodhead Publishing*, 208 p.
- Zhang, X.; Wang, S.; Yan, X.; Yue, D.; Sun, R.; Zhou, X. (2016). Probabilistic analysis for the functional and structural fatigue of NiTi wires. *Materials and Design*. Vol. 102, p. 213-224.