

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DINÂMICO DE
FIOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi EM REGIME SUPERELÁSTICO

Henrique Martinni Ramos de Oliveira

Campina Grande/PB

Agosto de 2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DINÂMICO DE
FIOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi EM REGIME SUPERELÁSTICO

Henrique Martinni Ramos de Oliveira

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
como requisito parcial à obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

Orientador: Prof. Dr. Carlos José de Araújo
Agência Financiadora: (CAPES, CNPq)

Campina Grande
Agosto de 2014

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

O48e Oliveira, Henrique Martini Ramos de.
Estudo experimental do comportamento térmico e dinâmico de fios de liga com memória de forma NiTi em regime superelástico / Henrique Martini Ramos de Oliveira. - Campina Grande, 2014.
113 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2014.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos José de Araújo".
Referências.

1. Ligas com Memória de Forma. 2. Superelasticidade. 3.
Comportamento Dinâmico. 4. Frequência. I. Araújo, Carlos José de. II.
Título.

CDU 621(043)

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DINÂMICO DE
FIOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NiTi EM REGIME SUPERELÁSTICO

Henrique Martinni Ramos de Oliveira

Dissertação aprovada em 01 de Agosto de 2014, pela banca examinadora
constituída dos seguintes membros:



Dr. Carlos José de Araújo

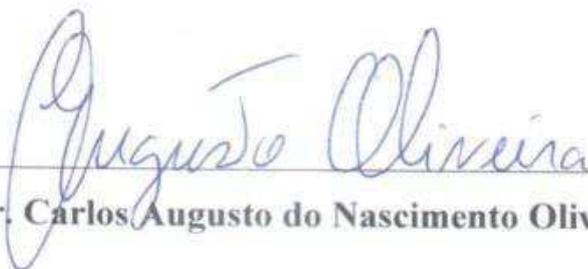
Orientador

UAEM/UFCG



Dr. Antonio Almeida Silva

Examinador Interno - UAEM/UFCG



Dr. Carlos Augusto do Nascimento Oliveira

Examinador Externo - UAEM/UFPE

Dedico este trabalho aos meus pais e à Estephanie.

AGRADECIMENTOS

Deixo registrado meu agradecimento a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desse trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus pelas bênçãos e oportunidades;

Aos meus pais, Fátima Ramos de Oliveira e José Nilton de Oliveira (in memoriam), pelo apoio e ensinamento dado durante toda minha vida;

À minha irmã Silvia pelo apoio durante essa jornada;

À Estephanie Nobre, por todo apoio técnico trocado no aperfeiçoamento da profissão que compartilhamos, mas principalmente pelo amor e companheirismo.

Ao Professor Carlos José de Araújo pela excelente orientação, não apenas nos trabalhos acadêmicos mas também na vida profissional; e pela disponibilidade, mesmo quando o tempo estava apertado.

Ao Professor João Baptista pela orientação e apoio dados durante essa jornada.

À Angelo Emiliavaca pelo apoio e auxílio dado durante a realização dos experimentos.

Aos colegas de mestrado, que ao final desta etapa posso chamar de amigos, por toda contribuição direta ou indireta.

Aos órgãos CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

‘O começo de todas as ciências é o espanto de as coisas serem o que são. _

(Aristóteles)

ESTUDO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO TÉRMICO E DINÂMICO DE FIOS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA NITI EM REGIME SUPERELÁSTICO

As Ligas com Memória de Forma (LMF) devem seu comportamento único a uma transformação de fase reversível entre duas estruturas cristalinas: martensita (baixa temperatura e menor rigidez) e austenita (alta temperatura e maior rigidez). Essa transformação pode ocorrer em consequência de dois estímulos diferentes: uma mudança de temperatura ou aplicação de tensão mecânica, ambos acima de valores críticos característicos desses materiais. Do segundo caso resulta o fenômeno da superelasticidade, que é a capacidade de recuperar totalmente a deformação após o carregamento e descarregamento mecânico na fase de mais alta temperatura (austenita). No decorrer dessa deformação ocorre a transformação de fase induzida por tensão da austenita para a martensita. Esta transformação é exotérmica e tende a se estabilizar após certo número de ciclos de deformação. Estudos sobre as propriedades dinâmicas das LMF mostram que o comportamento superelástico é dependente da taxa de deformação, ou em outras palavras, da frequência de excitação. Este comportamento resulta da combinação complexa entre tensão mecânica, temperatura e taxa de dissipação do calor latente gerado no material. Observou-se também que altas frequências diminuem a capacidade de dissipação de calor latente, resultando no aumento de temperatura do material e valores de tensão de transformação de fase maiores. Considerações como estas são importantes para a modelagem do comportamento dinâmico do material, aplicável, por exemplo, em sistemas de absorção de vibração de construções civis. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é estudar experimentalmente a influência da frequência sobre o comportamento dinâmico superelástico de fios de LMF Ni-Ti pré-estabilizados, assim como os efeitos da geração de calor sobre as propriedades mecânicas avaliadas. Os testes realizados corresponderam a ensaios dinâmicos de tração uniaxial em fios superelásticos de LMF Ni-Ti com variação de frequência e simultâneo acompanhamento de temperatura do material, usando uma máquina de ensaios da marca MTS modelo MTS 793 series.

Palavras-chave: Ligas com memória de forma, Superelasticidade, Comportamento dinâmico, Frequência.

EXPERIMENTAL STUDY OF THERMAL AND DYNAMIC BEHAVIOR OF A NITI SHAPE MEMORY ALLOY WIRE UNDER SUPERELASTIC REGIME

Shape Memory Alloys (SMA) owe their behavior unique to a reversible phase transformation between two crystalline structures: martensite (low temperature and stiffness) and austenite (high temperature and stiffness). This phase change can occur as a result of two distinct stimuli: a change in temperature or an applied mechanical stress, both over certain critical values, characteristic of these materials. From the latter it results the phenomenon of the superelasticity, which is the ability to totally recover a deformation after simply ceasing the load. During this deformation occurs a stress-induced martensitic transformation from austenite to martensite, being it an exothermal process and that tends to stabilize after a certain number of cycles. Investigation concerning dynamic properties of SMA demonstrate that its superelastic behavior depends on the strain rate, or in other words, on the excitation frequency. This behavior results from the complex combination of mechanical stress, temperature and rate of latent heat dissipation generated in the material. It was also observed that high frequencies diminish the capacity of dissipation of latent heat, resulting in an increase in the material temperature and, therefore, in higher values of phase transformation stresses. This kind of consideration is fundamental in dynamic behavior modeling, applicable for instance, in vibration absorption systems in civil building. In this context, the objective of this work is experimentally study the influence of the frequency on superelastic behavior of pre-stabilized Ni-Ti SMA superelastic wires, as well as the effects of heat generation on the evaluated mechanical properties. Dynamical tests were performed in a uniaxial tensile mode in Ni-Ti SMA superelastic wires varying the frequency and simultaneously monitoring sample's temperature, using a test machine from MTS, model MTS 793 series.

Keywords: Shape Memory Alloys, Superelasticity, Dynamic Behavior, Frequency

Sumário

1. Introdução.....	18
2. Objetivos.....	21
2.1. Objetivo Geral.....	21
2.2. Objetivos Específicos.....	21
3. Revisão da Literatura.....	22
3.1. Ligas com Memória de Forma (LMF).....	22
3.2. Comportamento Termomecânico das LMF.....	28
3.2.1. Efeitos de Memória de Forma.....	28
3.2.2. Superelasticidade.....	31
3.3. LMF de NiTi.....	36
3.3.1. Aspectos Gerais.....	36
3.3.2. Aplicações Estáticas.....	38
3.3.3. Aplicações Dinâmicas.....	43
3.4. Comportamento Dinâmico.....	46
3.4.1. Aspectos Experimentais.....	46
3.5. Comportamento Térmico de LMF de NiTi sob Carregamento Dinâmico.....	51
3.5.1. Aspectos Experimentais.....	51
3.6. Modelos constitutivos para o comportamento termomecânico das LMF.....	57
4. Materiais e Métodos.....	63
4.1. Fios Superelásticos de LMF NiTi.....	63
4.2 Caracterização Termomecânica Preliminar.....	64
4.2.1 Análise Térmica via DSC.....	64
4.2.2. Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente.....	66
4.2.3. Comportamento Superelástico em Função da Temperatura.....	67
4.3. Estabilização Cíclica em Regime Superelástico.....	68
4.4. Definição de Parâmetros para Análise da Resposta Dinâmica do Material.....	69
5. Resultados e Discussões.....	70
5.1. Análise Térmica via DSC.....	70
5.2. Caracterização Superelástica a Temperatura Ambiente.....	72
5.3. Comportamento Superelástico a Diferentes Temperaturas.....	73
5.4. Estabilização Cíclica do Regime Superelástico.....	76
5.5. Comportamento Térmico.....	77

5.6. Comportamento Dinâmico-Mecânico	83
5.7. Propriedades Mecânicas em Função do Número de Ciclos.	89
5.8. Propriedades Mecânicas em Função da Frequência de Ensaio.....	96
5.9 Propriedades Mecânicas em Função da Temperatura	102
6. Conclusões.....	105
7. Sugestão para Trabalhos Futuros	107
8. Referências.....	108

Lista de Figuras

Figura 1: Diagrama comparativo da tensão de atuação em função da deformação para diferentes materiais ativos.	23
Figura 2: Diagrama comparativo da densidade específica de energia de atuação em função da frequência de atuação para diferentes materiais ativos.....	24
Figura 3: Representação em perspectiva das estruturas cristalinas de uma LMF NiTi. (a) Fase Austenítica. (b) Fase Martensítica.....	25
Figura 4: Representação da transformação martensítica induzida por temperatura em LMF.	26
Figura 5: Esquema da transformação de fase induzida por temperatura em LMF na ausência de carregamento mecânico.....	27
Figura 6: Diagrama esquemático da transformação de fase induzida por tensão em LMF... ..	28
Figura 7: Representação do EMFS em uma barra de LMF submetida a deformação por flexão.	29
Figura 8: Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura descrevendo o EMFS de uma LMF.....	30
Figura 9: Ilustração de um dos processos de treinamento termomecânico para uma LMF passar a apresentar EMFD.	31
Figura 10: Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica.	32
Figura 11: Determinação da energia dissipada em uma curva tensão-deformação.	33
Figura 12: Curvas tensão-deformação para diferentes temperaturas.....	34
Figura 13: Representação do comportamento das tensões críticas de início de transformação de fase em função da temperatura.	35
Figura 14: Dispositivos e potenciais aplicações de LMF em veículos automotivos.....	40
Figura 15: Exemplo de mão robótica acionada por fios de LMF. (a) Protótipo. (b) Esquema de funcionamento.	41
Figura 16: Comportamento mecânico do aço inox, NiTi superelástico, Osso e Tendão.	42
Figura 17: Aplicação de arcos ortodônticos de LMF NiTi para tratamento dentário.....	42
Figura 18: Dispositivos e potenciais aplicações de LMF de NiTi na área biomédica.	43
Figura 19: Dispositivo conhecido como Chevron, utilizado para atenuação de ruído.	44
Figura 20: Esquema do viaduto reforçado por LMF utilizado nas análises computacionais.	45
Figura 21: Vista geral dos cabos de aço de uma ponte estaiada. (A) Cabos. (B) Dispositivo de LMF de NiTi. (C) Instrumentação eletrônica utilizada.	46
Figura 22: Resposta superelástica de um fio de NiTi submetido a diferentes taxas de carregamento.....	47

Figura 23: Resposta dinâmica superelásticas de fios de NiTi a diferentes frequências de ensaio.	48
Figura 24: Montagem experimental e esquema do pendulo torsional utilizado nos experimentos com fios de LMF.	48
Figura 25: Caracterização do efeito dinâmico superelástico torsional em um fio de NiTi a diferentes frequências de ensaio.	49
Figura 26: Dispositivo com fios de LMF NiTi utilizado para amortecer os níveis de oscilação sofridos por cabos de aço de pontes estaiadas.....	50
Figura 27: Resposta mecânica de um fio de NiTi submetido a carregamentos dinâmicos a várias temperaturas.	50
Figura 28: Resultados experimentais do comportamento oscilatório dos cabos de aço sem a utilização (gráfico azul) e com a utilização do sistema de amortecimento de SMA (gráfico branco).....	51
Figura 29: Temperatura da LMF em função do tempo para diferentes condições ambientais.	53
Figura 30: Imagem termográfica obtida durante o ensaio cíclico de um corpo de prova superelástico de NiTi.	54
Figura 31: Resposta térmica em função do tempo de fios de NiTi submetidos a diferentes taxas de deformação.	55
Figura 32: Resposta térmica em função do tempo de fios de NiTi submetidos a diferentes taxas de deformação.	56
Figura 33: (a) Diagrama tensão-temperatura. (b) Diagrama tensão-deformação.	59
Figura 34: Esquema representado o balanço de energia térmica para um corpo de prova cilíndrico.	61
Figura 35: Fotografia do corpo de prova de fios de LMF NiTi utilizado durante os testes.....	64
Figura 36: Gráfico do fluxo de calor em função da temperatura obtido através de um ensaio DSC.....	65
Figura 37: Equipamento DSC modelo Q20 da TA Instruments.	66
Figura 38: Gráfico obtido de um ensaio de tração para ligas NiTi superelásticas seguindo a norma ASTM F2516-07e2.....	67
Figura 39: Máquina de ensaios universal marca Instron modelo 5582. Detalhe mostrando corpo de prova montado dentro da câmara térmica.	68
Figura 40: Máquina de ensaios dinâmicos da marca MTS modelo MTS 793 series.....	69
Figura 41: Montagem experimental. (a) Visão geral. (b) Fio NiTi nas garras da máquina MTS. (c) Micro termopar acoplado ao fio NiTi.....	70
Figura 42: Análise térmica DSC do fio NiTi.	71
Figura 43: Curva Tensão-Deformação para o teste quase estático seguindo a norma ASTM F2516-07e2.	72
Figura 44: Curvas tensão-deformação do fio de LMF NiTi a várias temperaturas.	74

Figura 45: Curvas tensão-deformação dos fios superelásticos de NiTi para diferentes temperaturas.....	75
Figura 46: Curvas de tensão crítica de transformação em função da temperatura de ensaio para o fio de LMF NiTi.....	76
Figura 47: Evolução da curva tensão-deformação do fio de NiTi submetido a vários ciclos de deformação.....	77
Figura 48: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 0,1Hz e 1 Hz.....	78
Figura 49: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 1 Hz e 10 Hz.....	79
Figura 50: Temperatura do fio NiTi para uma frequência de ensaio de 0,1Hz.....	80
Figura 51: Variação da temperatura durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz.....	81
Figura 52: Temperatura média do fio NiTi em função da frequência de ensaio.....	82
Figura 53: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica para uma frequência de 1 Hz.....	83
Figura 54: Resposta superelástica do fio de NiTi testado à temperatura ambiente sob carregamento cíclico entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz.....	84
Figura 55: Resposta superelástica do fio de NiTi testado à temperatura ambiente sob carregamento cíclico entre as frequências de 1 Hz e 10 Hz.....	85
Figura 56: Curva tensão-deformação do fio NiTi a 0,1 Hz.....	86
Figura 57: Curva tensão-deformação do fio NiTi a 1Hz.....	87
Figura 58: Curva tensão-deformação a 7Hz.....	88
Figura 59: Tensão crítica de transformação MS em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 0,9 Hz.....	89
Figura 60: Tensão crítica de transformação MS em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 7 Hz.....	90
Figura 61: Tensão crítica de transformação AF em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 0,9 Hz.....	91
Figura 62: Tensão crítica de transformação AF em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 7 Hz.....	92
Figura 63: Tensão máxima em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 1 Hz.....	93
Figura 64: Tensão máxima em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 10 Hz.....	94
Figura 65: Energia dissipada pelo fio de LMF NiTi em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 1 Hz.....	95
Figura 66: Energia dissipada pelo fio de LMF NiTi em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 10 Hz.....	96

Figura 67: Tensão crítica de início de transformação martensítica M_s em função da frequência de ensaio.....	97
Figura 68: Tensão crítica final de transformação martensítica A_f em função da frequência de ensaio.	98
Figura 69: Tensão máxima atingida no fio de LMF NiTi em função da frequência de ensaio.	99
Figura 70: Energia dissipada no fio de LMF NiTi em função da frequência de ensaio.....	100
Figura 71: Fator de amortecimento viscoso equivalente em função da frequência de ensaio	101
Figura 72: Tensão Máxima e temperatura em função do número de ciclos	102
Figura 73: Tensão Máxima em função da temperatura para as frequências entre 2Hz e 7Hz	103

Lista de Tabelas

Tabela 1: Valores típicos de algumas propriedades termomecânicas de LMF NiTi. .37	
Tabela 2: Características apresentadas por um atuador utilizando motor DC e um fio de NiTi.39	
Tabela 3: Propriedades mecânicas do fio NiTi utilizado no trabalho. 64	
Tabela 4: Temperaturas críticas de transformação de fase da liga utilizada.....71	
Tabela 5: Coeficiente de aumento das tensões críticas de transformação 104	

Lista de Símbolos e Abreviações

SMA - Shape Memory Alloys

LMF - Liga com Memória de Forma

EMF - Efeito Memória de Forma

SE - Superelasticidade

VGC - Variable Geometry Chevron

M_s - Temperatura de início de transformação martensítica

M_f - Temperatura de final da transformação martensítica

A_s - Temperatura de início da transformação austenítica

A_f - Temperatura de final da transformação austenítica

M_p - Temperatura do pico durante resfriamento

A_p - Temperatura do pico durante aquecimento

E_D - Energia dissipada

T_m - Temperatura média do ciclo

σ_{Ms} - Tensão de início da transformação martensítica

σ_{Mf} - Tensão final da transformação martensítica

σ_{As} - Tensão de início da transformação austenítica

σ_{Af} - Tensão final da transformação austenítica

$\sigma_{m\acute{a}x}$ - Tensão máxima do ciclo superelástico

EMFS - Efeito Memória de Forma Simples

EMFD - Efeito Memória de Forma Duplo

DSC - Calorimetria Diferencia de Varredura

DTA - Análise Térmica Diferencial

TMA - Análise Termomecânica

DMA - Análise Dinâmico-Mecânica

η - Amortecimento Viscoso Equivalente

E_D - Energia dissipada pelo ciclo superelástico

E_{SO} - Energia absorvida por um elemento elástico equivalente

C^M - Coeficiente de aumento das tensões críticas de transformação martensítica

C^A - Coeficiente de aumento das tensões críticas de transformação austenítica

f - Fração Martensítica

T - Temperatura

ϵ_{el} - Deformação Elástica

ϵ_{tr} - Deformação da Transformação de Fase

ϵ_r - Deformação Máxima Residual

ϵ_a - Deformação da Fase Austenítica

σ - Tensão Aplicada no Material

σ_a - Tensão Aplicada na Fase Austenítica

E_a - Módulo de Elasticidade da Fase Austenítica

A→M - Transformação Direta

M→A - Transformação Reversa

σ_{Ms} - Tensão de Início de Transformação Martensítica

σ_{Mf} - Tensão Final de Transformação Martensítica

σ_{As} - Tensão de Início de Transformação Austenítica

σ_f - Tensão Final de Transformação Austenítica

ΔX_M - Variação da Fração Martensítica durante a Transformação de Fase Direta.

ΔX_M - Variação da Fração Martensítica durante a Transformação de Fase Reversa.

q - Fluxo de Calor

k - Condutividade Térmica

Q_{gen} - Calor gerado

E - Energia Interna

ρ - Densidade

c_p - Calor Específico

Bi - Número de Biot

L_c - Comprimento Característico

\bar{h} - Coeficiente Médio de Convecção

V - Volume do Corpo

A - Área Superficial

Q_L - Calor Latente de Transformação

1. Introdução

O desenvolvimento tecnológico vivenciado nas últimas décadas fez surgir materiais ativos que apresentam características funcionais em suas aplicações de engenharia. Diferentemente dos materiais clássicos, esses têm a capacidade de responder ativamente a estímulos externos. Tal característica tem promovido essa nova classe de materiais em relação aos materiais passivos clássicos.

Esses materiais têm encontrado aplicação crescente na concepção de projetos de engenharia moderna e avançada. São designados como materiais ativos aqueles que podem reagir a um estímulo físico de característica mecânica, térmica, elétrica ou eletromagnética. De forma exagerada, esses materiais têm sido denominados também de materiais inteligentes.

No contexto destes materiais avançados, as Ligas com Memória de Forma (LMF) são metais que apresentam duas fases cristalográficas principais, a Martensita, que é caracterizada por apresentar uma menor rigidez e temperatura de transformação de fase mais baixa, e a Austenita, caracterizada principalmente pelo seu comportamento superelástico, maior rigidez e temperaturas de transformação de fase mais altas. É devido a transformação cristalográfica reversível entre essas duas fases que as LMF apresentam os fenômenos de Efeito Memória de Forma (EMF) e Superelasticidade (SE). O primeiro trata-se de um fenômeno em que o material tem a capacidade de recuperar grandes níveis de deformação quando submetido a um aquecimento depois de deformado plasticamente. O segundo é um fenômeno isotérmico em que o material é capaz de recuperar grandes deformações (cerca de 8 %) quando submetidos a carregamento e descarregamento mecânico.

Esses dois comportamentos são resultantes de uma transformação de fase reversível no estado sólido do tipo martensítica termoelástica (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Essa transformação de fase é adifusional e pode ser ativada através de um campo de temperatura, tensão mecânica ou campo magnético. É na fase Martensítica que esses materiais são capazes de armazenar grandes níveis de deformação pseudoplástica que pode ser totalmente recuperada após um aquecimento. Estes materiais metálicos especiais são internacionalmente conhecidos por *Shape Memory Alloys (SMA)*, e são considerados materiais inteligentes com um vasto potencial de aplicações (STEFFEN JUNIOR & RADE, 2004).

Graças a essas características exclusivas, as LMF vem sendo largamente utilizada em dispositivos da área biomédica, como stents (RUNCIMAN ET AL., 2011), agulhas inteligentes, fios ortodônticos, próteses (JANI ET AL., 2014), dispositivo para correção oftálmica. (KHMELEVSKAYA ET AL., 2008), dentre outros. Na indústria aeroespacial, as LMF estão presentes em compósitos ativos (YANG ET AL. 2006), enquanto na indústria automotiva são utilizadas em acionamento de dispositivos para o conforto do condutor assim como dispositivos de segurança veicular (GHEORGHITA et al., 2014).

Devido ao fenômeno de Efeito Memória de Forma (EMF) essas ligas são bastante utilizadas como sensores ou atuadores. Nessa área, as LMF apresentam um maior nível de resposta mecânica a estímulos não mecânicos quando comparadas com outros materiais ativos. A capacidade de recuperar grandes deformações também faz com que esses materiais sejam capazes de gerar esforços mecânicos, sendo bastante úteis em aplicações onde necessita-se promover um deslocamento, como no caso do acionamento inserido no dispositivo de um protótipo de trava para tampa de tanque de combustível automotivo (FIGUEIREDO, 2013) assim como em aplicações em que é necessário o aparecimento de torque, como no caso do SMARt Lockwire (Ramos de Oliveira et. al. , 2012) que é capaz de aplicar um esforço torsional em parafusos, que além de impedir o afrouxamento do mesmo auxilia na manutenção do torque previamente aplicado.

As LMF vêm sendo bastante utilizadas também como elementos atuantes em *'morphing structures'*, como os *chevrons* de geometria variável, do inglês *Variable Geometry Chevron (VGC)* de turbinas de aviões (BENAFAN ET AL., 2013), que são estruturas utilizadas para redução do ruído gerado pelas aeronaves (JANI ET AL., 2014).

No regime superelástico as LMF são amplamente utilizadas em diversos elementos mecânicos como parafuso superelástico (TRAVASSOS, 2010), arruela Belleville (PEREIRA et al., 2011), cabos de aço (TORRA ET AL., 2013; REEDLUNN & SHAW, 2008) além de dispositivos médicos e odontológicos como mini-molas, stents e arcos. A liberação da carga durante o descarregamento do material ocorre seguindo um caminho de deformação diferente do carregamento resultando em um fenômeno conhecido como histerese mecânica. Associado ao fenômeno da histerese,

a dissipação de energia nesses materiais é muitas vezes maior quando comparada a metais clássicos como aço, alumínio, e outros (DAYANANDA, 2008).

Além das aplicações em regime estático, a superelasticidade é bastante útil para atuar em regime dinâmico graças à sua capacidade de dissipação de energia mecânica em cada laço histerético de tensão-deformação. Nesse contexto, inúmeros dispositivos utilizando LMF superelásticas como absorvedores de vibração e impacto vêm sendo desenvolvidos, tanto em macro quanto em micro escala. Recentemente, (DIENG ET AL. 2013) e (TORRA ET AL., 2013) apresentaram resultados referentes a absorção de vibrações na aplicação de dispositivos atenuadores, fabricados em LMF de NiTi superelásticas, acoplados a cabos de aço utilizados em pontes estaiadas. Amarante & Cismasiu (2011) apresentaram resultados também referentes a absorção de vibrações em elementos de LMF superelásticos aplicados em elementos de engastes em viadutos. Li & Qian (2010) usaram fios superelásticos de LMF como reforços em barras de concreto para estudar o comportamento de absorção de vibrações sísmicas. Em micro escala, Pan & Cho (2007) investigaram o potencial do uso de micro fios superelásticos como amortecedores em sistemas eletromecânicos microscópicos, do inglês *Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*.

Devido à grande utilização do efeito superelástico em absorvedores dinâmicos, diversos estudos vêm sendo realizados com o objetivo de investigar a influência da taxa de deformação na resposta termomecânica superelástica do material (Y. J. HE & SUN, 2010; ZHANG ET AL., 2010; Y. J. HE & SUN, 2011). Nesse contexto, o efeito térmico também vem sendo bastante estudado devido a sua grande influência na resposta mecânica do material, que se reflete na quantidade de energia mecânica dissipada em cada ciclo de histerese. Esses estudos vêm sendo realizados também com o objetivo de propor modelos físico-matemáticos que contemplem o acoplamento termomecânico e que representem com maior fidelidade a resposta dinâmica superelástica das LMF (MORIN ET AL., 2011).

Nesse contexto, o presente trabalho pretende contribuir no aspecto experimental para o avanço do conhecimento relativo ao comportamento dinâmico superelástico de LMF de Níquel-Titânio (NiTi), fornecendo uma base de dados experimentais para o melhor entendimento do comportamento termomecânico desses materiais e para utilização em modelos físico-matemáticos desenvolvidos para simular a resposta superelástica do material. Com esse intuito, neste trabalho foram utilizados

fios superelásticos de NiTi de 1,8 mm de diâmetro submetidos a um carregamento trativo uniaxial dinâmico à temperatura ambiente. Para aplicação do carregamento em diferentes frequências, utilizou-se uma máquina de ensaios dinâmicos da marca MTS, modelo 793 Series. Durante os ensaios dinâmicos, foi realizada a aquisição de temperatura dos fios LMF utilizando microtermopares do tipo K ($\varnothing = 80 \text{ }\mu\text{m}$) para registrar a evolução da resposta térmica do material em virtude do carregamento mecânico.

A partir desses ensaios, foram obtidas curvas de tensão x deformação, assim como temperatura x tempo, a partir das quais foram extraídos os seguintes parâmetros: a tensão crítica de início de transformação Martensítica (σ_{M_s}), a tensão crítica final de transformação Austenítica (σ_{A_f}), a tensão máxima do ciclo ($\sigma_{\text{máx}}$), a energia dissipada pelo ciclo histerético ($W_{\text{histerético}}$) e a temperatura média do ciclo ($T_{\text{méd}}$). Esses resultados são de fundamental importância para a compreensão do comportamento termomecânico desses materiais e servem como base para desenvolver o modelamento físico-matemático deste comportamento.

2. Objetivos

2.1. Objetivo Geral

Estudar o comportamento térmico e dinâmico associado aos ciclos superelásticos tensão - deformação de fios Ligas com Memória de Forma de NiTi submetidos a carregamento mecânico em diferentes frequências.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a influência da ciclagem dinâmica na resposta superelástica do fio de NiTi.
- Analisar a influência da frequência de ensaio na resposta superelástica do fio de NiTi.
- Determinar a frequência crítica de auto aquecimento do fio NiTi.

- Analisar o efeito térmico e dinâmico sobre as propriedades do fio de LMF.
- Originar um banco de dados experimental de ensaios superelásticos cíclicos em diferentes frequências de carregamento para posteriores estudos teóricos de modelagem e simulação.

3. Revisão da Literatura

3.1. Ligas com Memória de Forma (LMF)

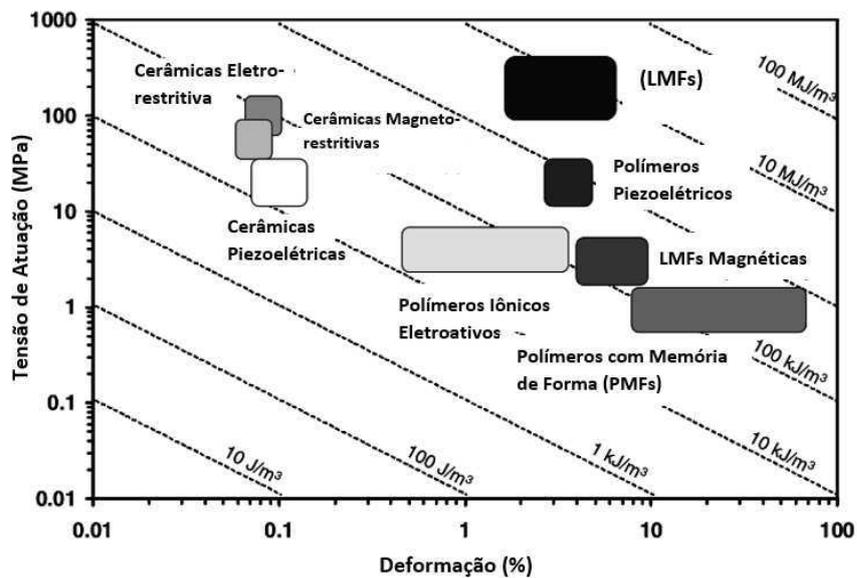
Durante séculos os metais vêm desenvolvendo um importante papel como materiais estruturais. Técnicas de fundição, forjamento e adição de outros metais para a formação de ligas metálicas vêm sendo desenvolvidas desde a idade dos metais com o desenvolvimento do bronze e ligas de FeC. Com o desenvolvimento tecnológico das últimas décadas e o avanço do conhecimento dos processos metalúrgicos, novas ligas metálicas puderam ser desenvolvidas para aplicações específicas, em que suas propriedades como resistência mecânica, dureza, tenacidade, rigidez, e outras, pudessem ser projetadas diretamente para determinada aplicação. Nesse contexto, a busca por materiais que apresentassem, além de suas propriedades estruturais, capacidades funcionais como sensores e atuadores ativos fez surgir uma nova classe de materiais conhecidos como materiais multifuncionais (LAGOUDAS, 2008).

São conhecidos por materiais ativos, aqueles que têm a capacidade de responder mecanicamente a um estímulo não mecânico, podendo assim serem utilizados como sensores ou atuadores. No primeiro caso, um sinal mecânico é transformado em um sinal não mecânico (i.e. uma deformação no material pode gerar uma variação de tensão elétrica ou temperatura). No segundo caso, um sinal não mecânico é convertido em uma resposta mecânica (i.e. uma variação no campo térmico, magnético, ou outro, gera uma variação na forma do material).

Nesse contexto de materiais ativos, as LMF são representantes dos materiais metálicos, apresentando a capacidade de responder mecanicamente a estímulos não mecânicos. Essas ligas fazem parte de uma classe de materiais que tem a capacidade de recuperar-se de deformações aparentemente plásticas, apenas quando submetidas a um aumento de temperatura. Essa recuperação pode acontecer mesmo

sob carregamento mecânico, o que resulta em altos níveis de tensão mecânica gerados durante a atuação, acompanhadas ou não de deslocamento (trabalho mecânico). Este fenômeno termomecânico é conhecido como Efeito Memória de Forma (EMF). A Figura 1 apresenta um diagrama comparando os níveis de tensão de atuação (MPa) em função da deformação para diferentes materiais ativos.

Figura 1: Diagrama comparativo da tensão de atuação em função da deformação para diferentes materiais ativos.

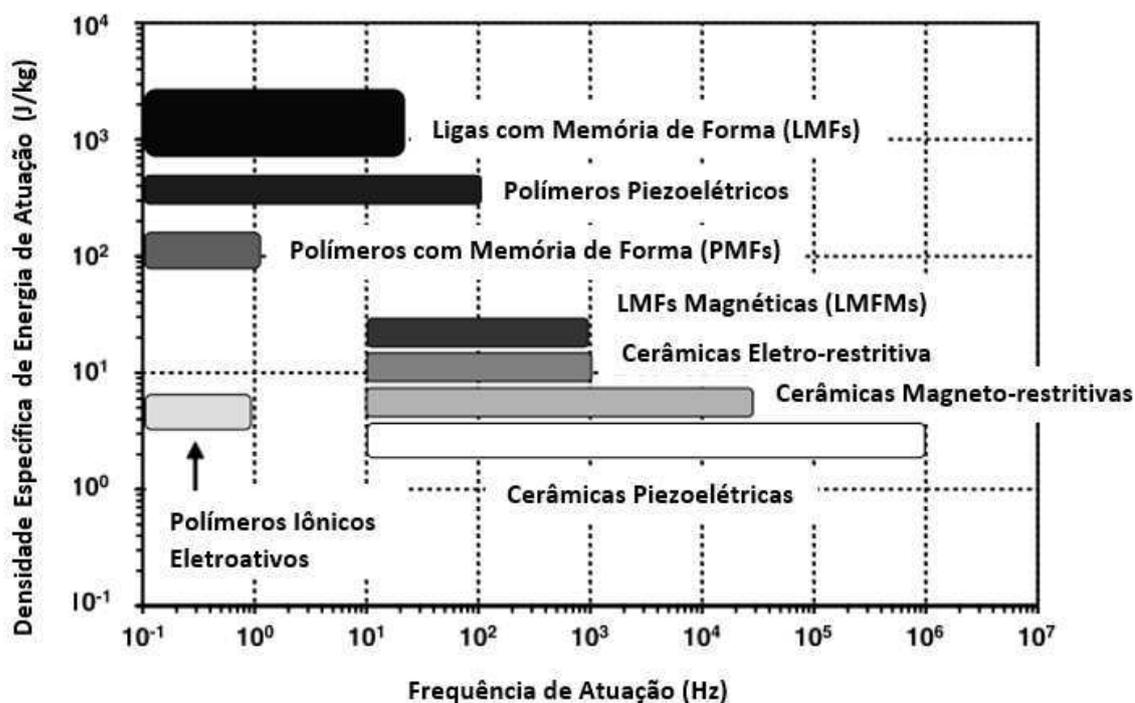


Fonte: Lagoudas, 2008.

Além dos níveis de tensão gerados durante a atuação, as LMF têm a capacidade de absorver e dissipar energia mecânica ao serem submetidas a ciclos de deformação reversíveis de até 18% (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Esse fenômeno é conhecido por Superelasticidade (SE). Devido ao elevado nível de energia mecânica dissipada durante esse comportamento, esses materiais vêm sendo cada vez mais considerados para aplicações em sistemas de absorvedores dinâmicos.

O diagrama apresentado na Figura 2 permite fazer um comparativo entre os níveis de densidade de energia específica de atuação em função da frequência de atuação para diferentes tipos de materiais ativos. É possível observar que as LMF apresentam níveis bastante elevados em comparação com os outros materiais conhecidos, destacando a possibilidade de utilização destas ligas.

Figura 2: Diagrama comparativo da densidade específica de energia de atuação em função da frequência de atuação para diferentes materiais ativos.



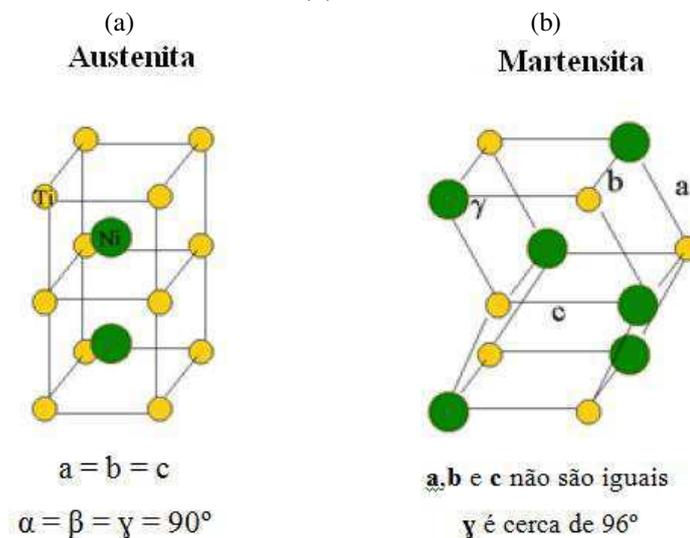
Fonte: Lagoudas 2008.

Existe uma grande variedade de materiais que apresentam o efeito memória de forma, porém são as ligas metálicas que apresentam esse fenômeno de forma mais pronunciada, gerando quantidades mais significativas tanto no que diz respeito a recuperação de deformação, quanto nos níveis de força gerados. Essas características fazem com que esses materiais sejam mais utilizados em nível tecnológico e comercial. Dentre estas LMF destacam-se as ligas de Ni-Ti, bem como algumas ligas de base cobre dos sistemas Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

Embora estes fenômenos de memória de forma fossem já conhecidos nos anos 30, descobertos pelo químico sueco Arne Ölander em 1932, foi apenas nos anos 60 que se passou a explorar esses materiais com mais intensidade, com a descoberta da LMF de NiTi. Desde então surgiu no mercado uma grande variedade de produtos e o estudo do efeito de memória de forma foi intensificado, levando a um aumento das pesquisas destinadas exclusivamente para a compreensão e o desenvolvimento desses materiais.

Os fenômenos da Superelasticidade (SE) e o Efeito Memória de Forma (EMF) estão diretamente relacionados a uma transformação de fase adifusional no estado sólido. Nessa transformação os átomos se movem em curtas distâncias mudando a estrutura do reticulado cristalino. Essa transformação de fase é conhecida como Martensítica. A transformação martensítica ocorre quando o material muda a partir da fase austenítica (alta temperatura), de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (Figura 3a), para a fase martensítica (baixa temperatura), com uma estrutura cristalina de menor simetria, como a ortorrômbica ou monoclínica (Figura 3b). Esta transformação é chamada de transformação direta (Austenita-Martensita).

Figura 3: Representação em perspectiva das estruturas cristalinas de uma LMF NiTi. (a) Fase Austenítica. (b) Fase Martensítica.

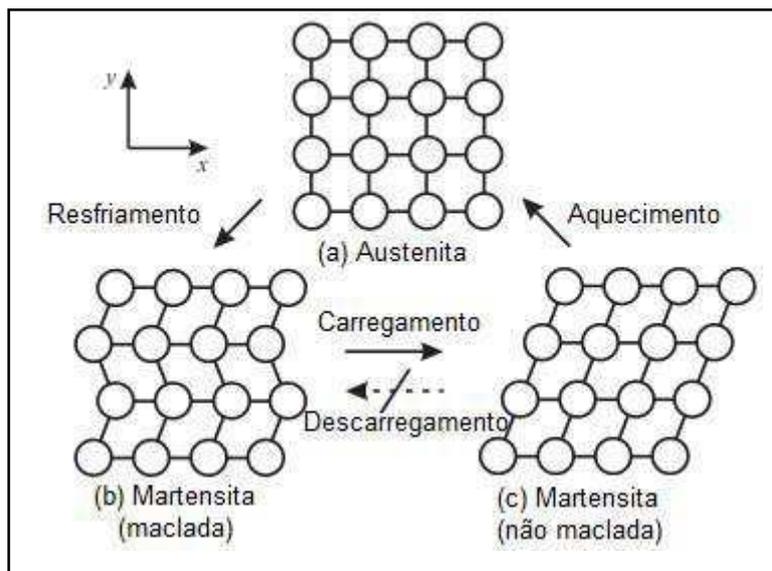


Fonte: DE ARAÚJO (2010) - conteúdo do curso T.A.M.F (PPGEM-UFCG).

Após a transformação de fase, cada cristal de martensita formado pode apresentar diferentes direções de orientação conhecidas como variantes. Essas variantes podem se apresentar de duas formas: a martensita maclada, de auto acomodação, que é formada logo após o resfriamento do material na ausência de carregamento e a martensita não maclada, que ocorre quando o material, quando em seu estado maclado, sofre um carregamento mecânico. Com o aumento da temperatura (acima de uma temperatura crítica) a fase martensítica apresenta-se instável, e então ocorre a transformação reversa (Martensita - Austenita). Este fenômeno é responsável pelo efeito memória de forma.

No esquema da Figura 4 é possível visualizar o comportamento do reticulado cristalino quando este é submetido a diferentes estímulos externos de resfriamento e aquecimento. Neste caso, percebe-se que a mudança de fase ocorre quando a temperatura é alterada. Tem-se então uma transformação de fase termoelástica, induzida por temperatura.

Figura 4: Representação da transformação martensítica induzida por temperatura em LMF.



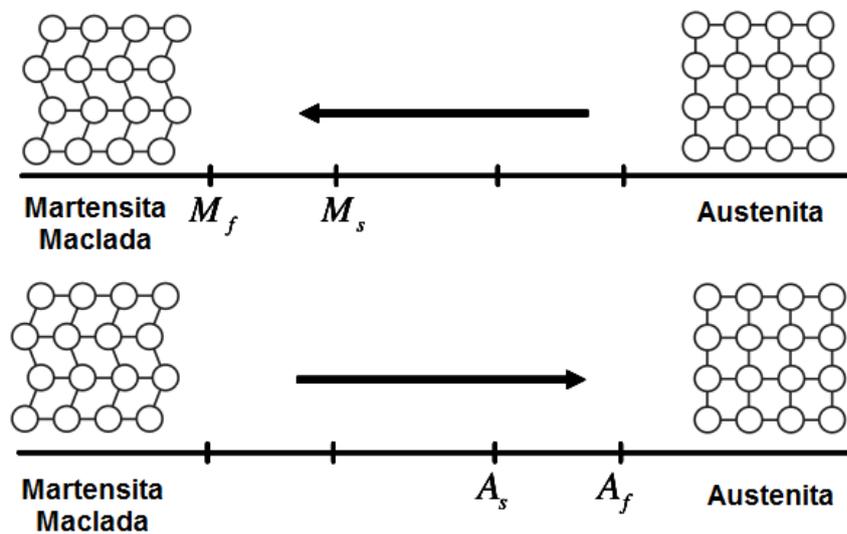
Fonte: Cismasiu, 2010.

As temperaturas responsáveis pela mudança de fase são conhecidas como temperaturas críticas de transformação. Durante a transformação de fase direta induzida por temperatura, o material inicialmente na fase Austenítica (na ausência de carregamento), inicia sua transformação para a fase martensita na *temperatura de início de transformação martensítica* (M_s) e completa sua transformação quando atinge a *temperatura final de transformação martensítica* (M_f), apresentando estrutura totalmente martensítica maclada de auto acomodação. Da mesma forma, na transformação de fase reversa, o material inicialmente na fase Martensítica inicia sua transformação durante o aquecimento na *temperatura de início de transformação austenítica* (A_s) e completa sua transformação quando atinge a *temperatura final de transformação austenítica* (A_f). O esquema apresentado na Figura 5 ilustra o comportamento da mudança de fase induzida por temperatura.

As temperaturas críticas de transformação podem ser detectadas a partir de variações de algumas propriedades físicas como resistividade elétrica e calor

específico. Comumente são usadas técnicas de análise térmica, como calorimetria diferencial de varredura (DSC), análise térmica diferencial (DTA) e análise termomecânica e dinâmico-mecânica (TMA e DMA). As técnicas de análise térmica DSC e DTA detectam tanto a transformação martensítica direta, durante o resfriamento, que é exotérmica (acompanhada por liberação de calor), quanto à transformação reversa, durante o aquecimento, que é endotérmica (acompanhada por absorção de calor) (RAMOS, 2012).

Figura 5: Esquema da transformação de fase induzida por temperatura em LMF na ausência de carregamento mecânico.

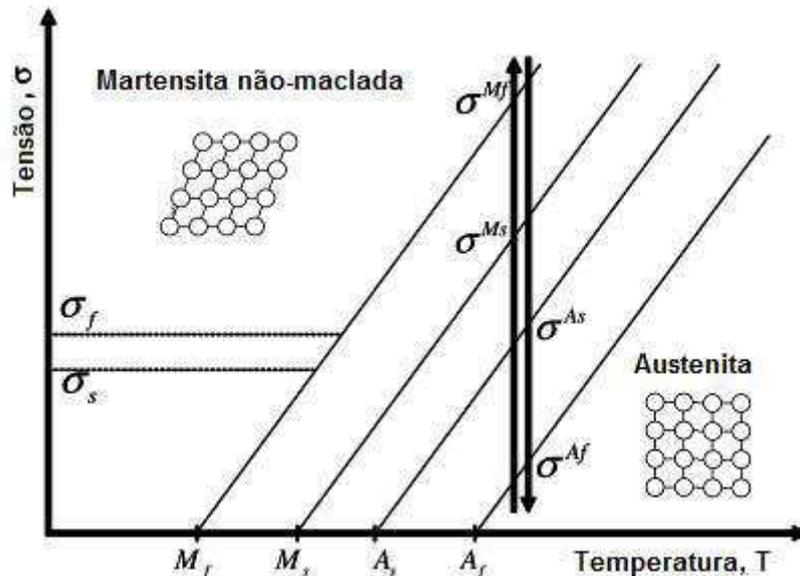


Fonte:(Lagoudas, 2008).

A transformação de fase da austenita em martensita também ocorre de maneira induzida por tensão mecânica. Quando o material inicialmente na fase austenítica (acima da temperatura final de transformação austenítica, A_f) é submetido a um carregamento mecânico, pode ser iniciada sua transformação de fase quando se atinge a *tensão crítica de início de transformação martensítica* (σ_{M_i}) finalizando sua transformação quando a *tensão crítica final de transformação martensítica* (σ_{M_f}) é atingida. Da mesma forma, durante o descarregamento, o material inicia sua transformação de fase reversa quando se atinge a *tensão crítica de início de transformação austenítica* (σ_{A_i}), completando a transformação quando se chega a *tensão crítica final de transformação austenítica* (σ_{A_f}). Esse comportamento é

conhecido como efeito pseudoelástico ou superelasticidade. O esquema apresentado na Figura 6 ilustra esse comportamento.

Figura 6: Diagrama esquemático da transformação de fase induzida por tensão em LMF.



Fonte:(Lagoudas, 2008).

Nesse contexto, percebe-se que para o efeito memória de forma as temperaturas críticas de transformação são propriedades de fundamental importância, assim como as tensões críticas de transformação para a superelasticidade.

Conhecendo as temperaturas e as tensões críticas de transformação, caracteriza-se a dependência da temperatura na transformação de fase, seja ela induzida por tensão ou por temperatura. Desta forma, é possível afirmar que essa transformação de fase termoelástica em LMF apresenta um acoplamento entre o comportamento térmico e mecânico.

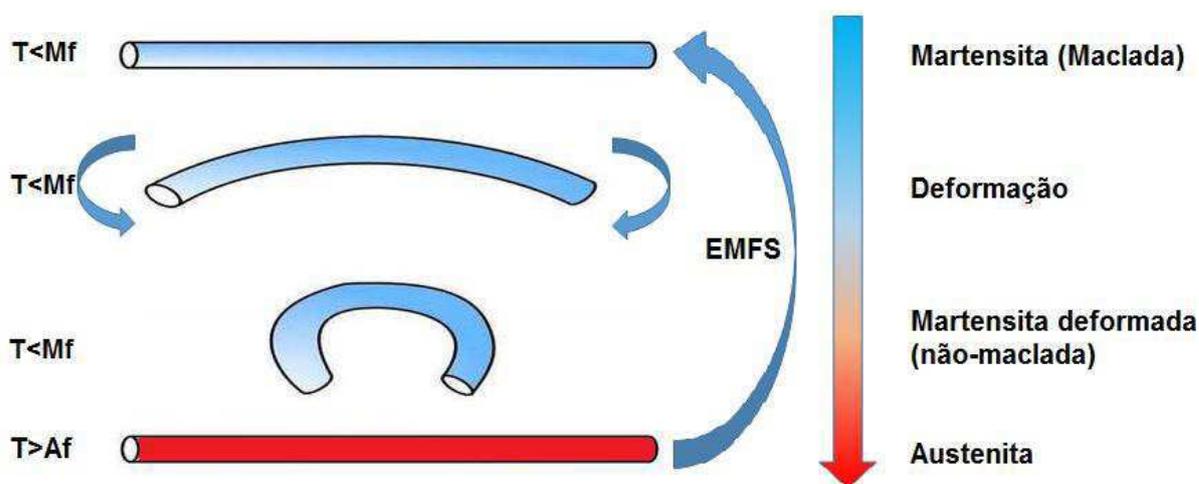
3.2. Comportamento Termomecânico das LMF

3.2.1. Efeitos de Memória de Forma

O efeito memória de forma (EMF), já mencionado anteriormente, se refere a capacidade que o material apresenta de retomar sua forma ou dimensão previamente definida, quando sujeitos a um ciclo termomecânico apropriado de deformação seguido de aquecimento. Geralmente, estes materiais podem ser facilmente

deformados pseudo plasticamente (da ordem de até 6%) a uma temperatura relativamente baixa (abaixo de sua temperatura crítica, M_f) e ao serem expostos a uma temperatura mais elevada (acima de sua temperatura crítica, A_f) retomam sua forma inicial. Este fenômeno também é conhecido como Efeito Memória de Forma Simples (EMFS), ou de único sentido, do inglês *One Way Shape Memory Effect (OWSME)*. A Figura 7 apresenta uma ilustração mostrando a resposta macroscópica do EMFS em uma barra submetida a um esforço de flexão.

Figura 7: Representação do EMFS em uma barra de LMF submetida a deformação por flexão.

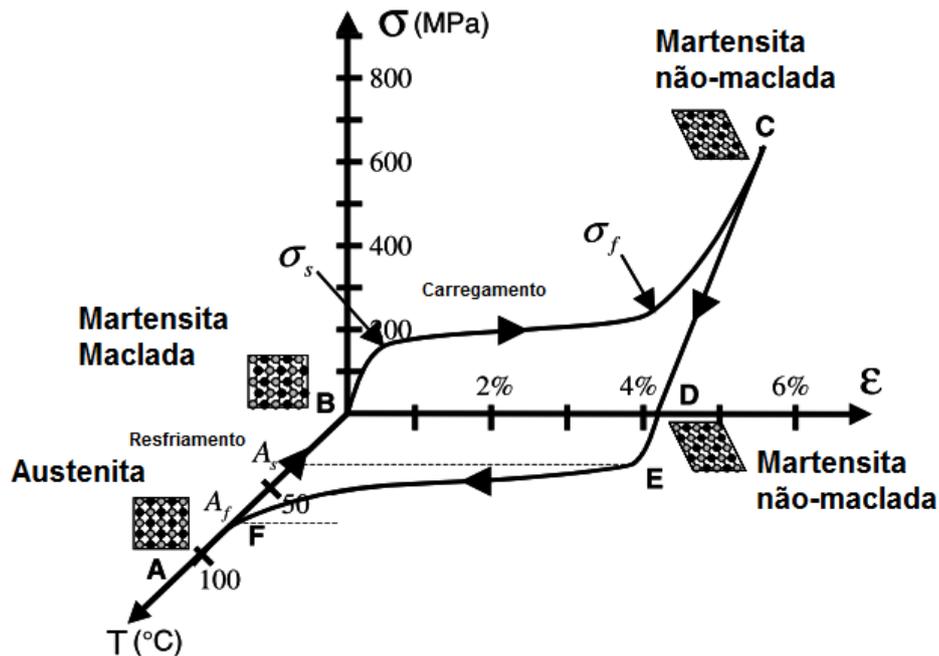


Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Figura 8, analisando o EMFS sob a perspectiva da tensão, deformação e temperatura, o fenômeno pode ser descrito da seguinte forma: a partir do resfriamento do ponto A para o ponto B, o material que antes apresentava uma estrutura austenítica passa a apresentar uma estrutura martensítica maclada de auto acomodação (não orientada). Ao submeter o material a um carregamento, a estrutura martensítica maclada presente no ponto B inicia seu processo de orientação a uma tensão crítica inicial (σ_B), dando lugar a uma estrutura martensítica não-maclada (ou orientada), que finaliza seu processo de orientação a uma tensão crítica final (σ_C). A estrutura martensítica orientada permanece mesmo após o descarregamento do ponto C ao ponto D, dando origem a uma deformação residual. Ao submeter o material a um aquecimento na ausência de carregamento mecânico, a transformação de fase reversa tem início quando a temperatura atinge A_s e finaliza na temperatura A_f , na qual a estrutura passa a ser completamente austenítica e a deformação residual é

completamente recuperada, fazendo com que o material retorne a sua forma inicial. Um subsequente resfriamento, resultará novamente na formação de uma estrutura martensítica maclada dando início a um novo ciclo do EMF.

Figura 8: Diagrama Tensão-Deformação-Temperatura descrevendo o EMFS de uma LMF.

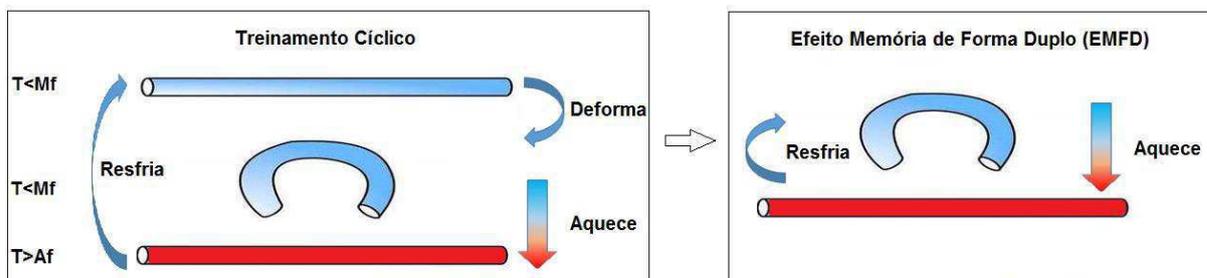


Fonte: (Lagoudas, 2008).

Na presença da fase martensítica, ao realizar um treinamento termomecânico cíclico no material, pode-se fazer evoluir do fenômeno do efeito memória de forma simples para um Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD), do inglês *Two-Way Shape Memory Effect (TWSME)*. Este fenômeno consiste em proporcionar ao material uma capacidade de mudar sua forma tanto durante o aquecimento quanto durante o resfriamento, sem que haja mais necessidade de aplicação da deformação. Este efeito é produto da introdução de defeitos irreversíveis na matriz austenítica do material, principalmente discordâncias associadas a deformação plástica devido a ciclagem termomecânica (WANG ET AL., 2003). Portanto, para fazer aparecer o EMFD, se faz necessário `treinar` o material para que o mesmo possa `lembrar` a forma que possui antes da deformação. O método de treinamento consiste basicamente em submeter o material a ciclos de deformação e variação de temperatura através de suas

temperaturas críticas de transformação. A Figura 9 ilustra o processo de treinamento e o aparecimento do EMFD em uma barra de LMF submetida a deformação por flexão.

Figura 9: Ilustração de um dos processos de treinamento termomecânico para uma LMF passar a apresentar EMFD.



Fonte: Autoria Própria.

Após o treinamento realizado a LMF é capaz de mudar de forma apenas quando submetida a variações de temperatura na região de sua transformação de fase, o que a torna mais versátil quando utilizada como atuadores inteligentes. Nessa área, Wang et al. (2002) apresentaram resultados experimentais referentes a um estudo sobre a resposta mecânica do EMFD em molas de LMF de TiNiCu.

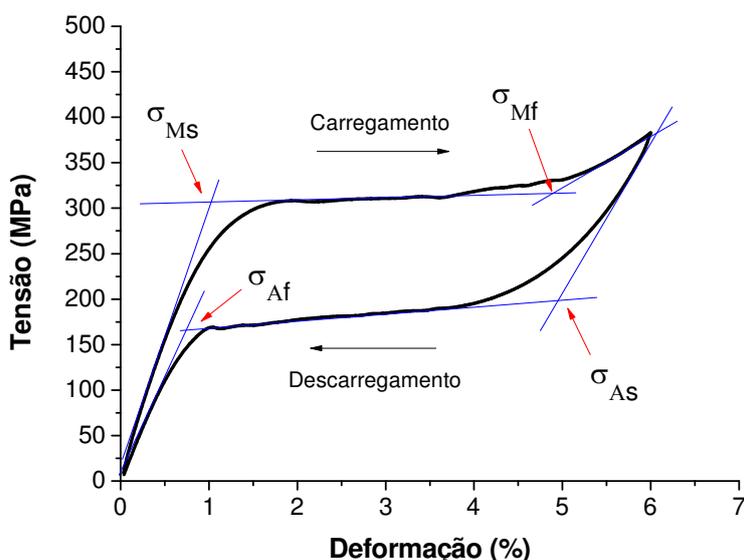
3.2.2. Superelasticidade

A superelasticidade é a capacidade que uma LMF apresenta de recuperar grandes níveis de deformação apenas com a retirada do carregamento aplicado. Também conhecido como efeito pseudoelástico, esse fenômeno é diretamente associado a transformação martensítica induzida por tensão e ocorre exclusivamente quando a LMF se encontra acima de sua temperatura crítica final de transformação austenítica (A_f).

Acima dessa temperatura, quando uma LMF é submetida a um carregamento mecânico a fase austenítica inicia sua deformação elástica até atingir um nível de tensão mecânica crítico, conhecido como *tensão crítica de início de transformação martensítica* ($\sigma_{0.2}$). É nesse nível de tensão que tem o início do patamar superelástico. Após atingir esse patamar a transformação martensítica se completará ao alcançar a *tensão crítica final de transformação martensítica* ($\sigma_{0.8}$). Nesse ponto, toda a microestrutura presente na LMF é formada por martensita não maclada. Ao iniciar o descarregamento, a LMF inicia a transformação reversa ao atingir a *tensão crítica de*

início de transformação austenítica (σ_{As}) finalizando o processo ao atingir sua *tensão crítica final de transformação austenítica* (σ_{Af}). O gráfico tensão-deformação apresentado pela Figura 10 mostra uma curva experimental obtida através de um ensaio de tração em que se podem observar as tensões críticas responsáveis pelo início e fim das transformações martensítica e austenítica.

Figura 10: Comportamento tensão-deformação de uma LMF superelástica.



Fonte: Autoria Própria.

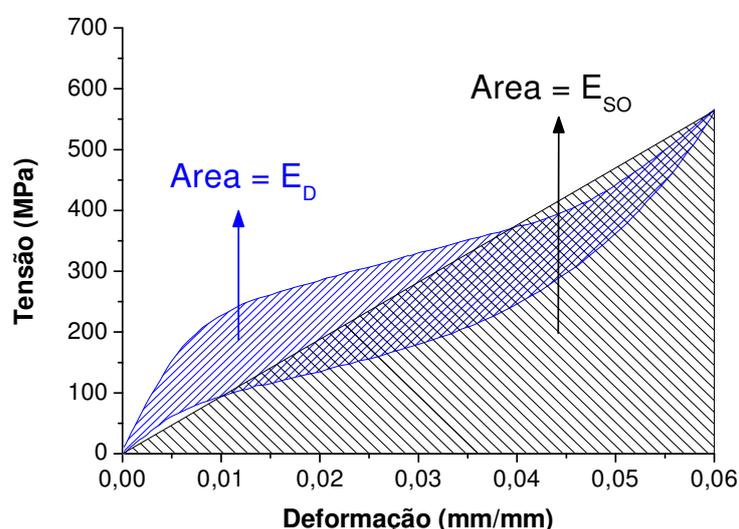
Verifica-se na Figura 10 que durante o descarregamento a tensão de início de reversão da transformação direta é menor do que a tensão necessária para gerar a deformação. Esse comportamento dá origem a uma histerese de tensão mecânica. Graficamente essa histerese é representada pelo caminho diferente realizado durante o relaxamento da carga aplicada. Fisicamente, essa histerese de tensão representa a diferença da energia recebida pelo material para sofrer a deformação, pela energia devolvida ao sistema. Isso implica dizer que o material tem a capacidade de dissipar uma parcela da energia utilizada para realizar o ciclo superelástico. Desta forma, quanto maior a histerese de tensão apresentada, maior será a energia dissipada em cada ciclo realizado. É devido a essa característica apresentada pelas LMF que o fenômeno da superelasticidade vem sendo amplamente empregado em dispositivos utilizados como absorvedores dinâmicos.

Matematicamente, a energia dissipada em cada ciclo superelástico é definida como sendo a área descrita pelo laço da histerese tensão - deformação. Essa energia (E_d) pode ser determinada calculando-se a integral de área da curva tensão-deformação reversível, conforme indicado na Equação 1.

$$E_d = \oint \sigma \epsilon \quad (1)$$

Na Figura 11 é possível visualizar graficamente a energia dissipada pelo laço superelástico descrita pela área hachurada em azul.

Figura 11: Determinação da energia dissipada em uma curva tensão-deformação.



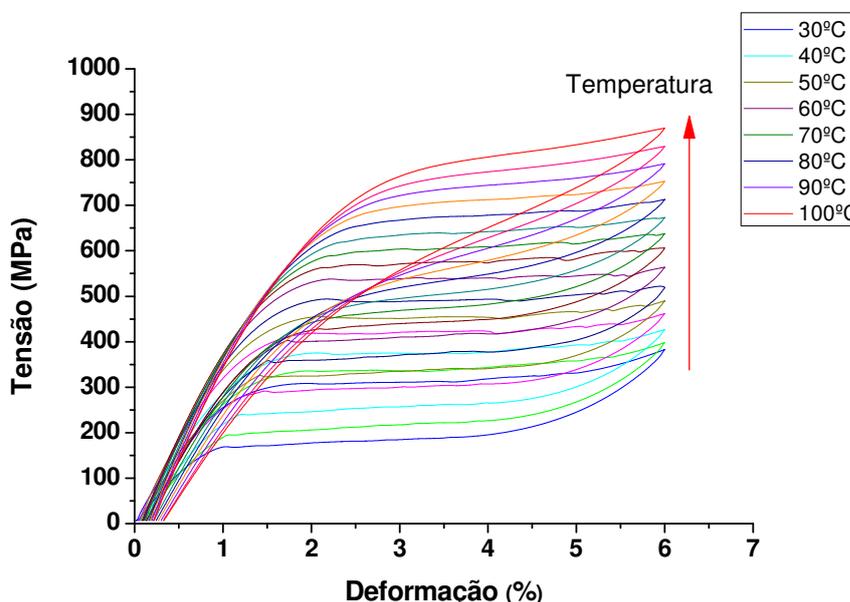
Fonte: (Ramos de Oliveira, 2012)

Para aplicações em que essas LMF são utilizadas como absorvedores dinâmicos, a determinação do fator de amortecimento viscoso equivalente é conveniente. Esta propriedade é de fundamental importância durante o projeto desses dispositivos, pois representa a quantidade de amortecimento imposta ao sistema. Esse fator de amortecimento viscoso equivalente (η) é uma relação entre a energia dissipada (E_d) no ciclo superelástico pela energia absorvida (E_{so}) por um elemento elástico equivalente (área hachurada em preto na Figura 11) (SPEICHER ET AL. 2009). A relação matemática que descreve esse comportamento corresponde a Equação 2.

$$\sigma = \frac{\sigma_0}{\sigma_0 \sigma_0 \sigma_0} \quad (2)$$

O fenômeno superelástico ocorre nas LMF a temperaturas acima de sua temperatura crítica A_f e o mesmo apresenta também uma dependência bastante pronunciada da temperatura. Esse comportamento implica em um aumento das tensões críticas de transformação diretamente proporcional ao aumento da temperatura. Em outras palavras, quanto maior a temperatura aplicada ao material, maior será a energia necessária para induzir a transformação de fase por tensão, com isso, maiores níveis de tensões críticas de transformação serão alcançadas. Esta relação de proporcionalidade entre a temperatura e as tensões de transformação de fase, que resulta em uma relação linear crescente, é prevista pela Lei de Clausius-Clapeyron em LMF (OTSUKA E WAYMAN, 1998). É possível observar na Figura 12 o comportamento mecânico superelástico de uma LMF de NiTi submetida a carregamentos mecânicos em diferentes temperaturas, todas superiores a A_f .

Figura 12: Curvas tensão-deformação para diferentes temperaturas.



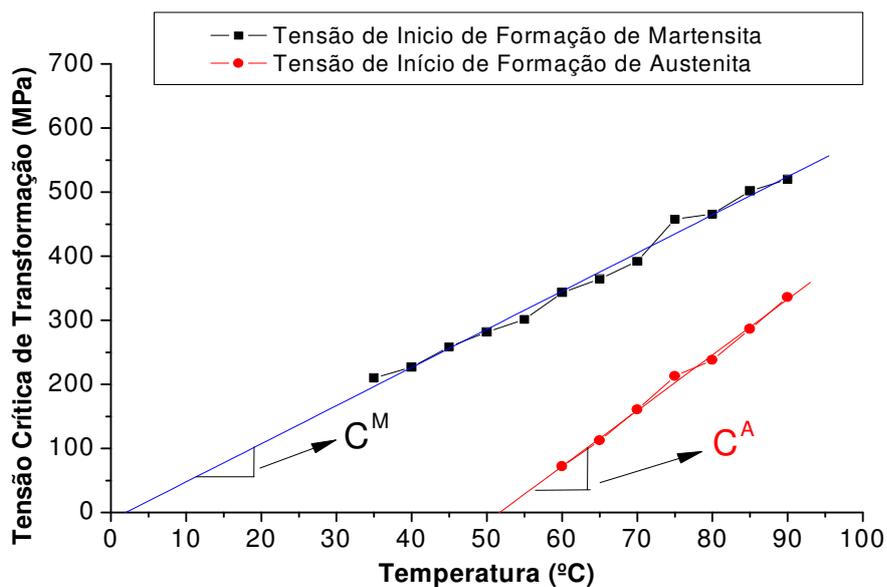
Fonte: Autoria Própria.

Observando os laços tensão-deformação apresentados na Figura 12 é possível constatar uma forte dependência térmica do comportamento superelástico. Neste contexto, a propriedade termomecânica que relaciona o aumento das tensões críticas de transformação de fase com a temperatura é o coeficiente de influência de tensão,

stress influence coefficient (LAGOUDAS, 2008). Essa propriedade é obtida através do cálculo da inclinação da curva resultante das tensões críticas de transformação de fase para diferentes temperaturas. Desta forma, tem-se que os coeficientes C^M e C^A , representam a variação das tensões críticas de transformação martensítica e austenítica, respectivamente, em função da temperatura. A Figura 13 apresenta uma curva experimental gerada a partir das tensões críticas de transformação de fase para diferentes temperaturas de ensaio em uma LMF de NiTi. A partir dessa curva, pode-se determinar os coeficientes C^M e C^A através do cálculo da razão entre a variação de tensão e a variação de temperatura. Essa relação é descrita pela Equação 3.

$$\alpha_{\sigma, T} = \frac{\Delta \sigma}{\Delta T} \quad (3)$$

Figura 13: Representação do comportamento das tensões críticas de início de transformação de fase em função da temperatura.



Fonte: (Ramos de Oliveira & Bezerra Filho, 2009)

Esses coeficientes são parâmetros de fundamental importância em modelos físico-matemáticos que descrevem o comportamento termomecânico superelástico das LMF, sendo responsáveis por acoplar o comportamento térmico e a resposta mecânica desses materiais.

3.3. LMF de NiTi

3.3.1. Aspectos Gerais

Após a descoberta das LMF de AuCd e AgCd nos anos 1930, foi apenas em 1963 que o pesquisador William J. Buehler, no *Naval Ordnance Laboratory* dos Estados Unidos, descobriu o NiTiInol (*Nickel Titanium Naval Ordnance Laboratory*), que despertou grande interesse científico e tecnológico devido aos seus aspectos metalúrgicos e as potenciais aplicações práticas. Dentre as LMF, as ligas de NiTi são mais conhecidas e vêm sendo amplamente estudadas, assim como apresentam o maior número de aplicações comerciais (LAGOUDAS, 2008).

No que diz respeito ao EMFS, EMFD e superelasticidade, as LMF de NiTi apresentam esse comportamento de maneira bem mais intensa, comparativamente a outras ligas, como aquelas de base cobre (CuZnAl, CuAlNi, CuAlBe, entre outras), tornando esse material ideal em uma ampla variedade de possíveis aplicações. Além disso, esta classe de LMF ainda apresenta uma excelente resistência a corrosão e biocompatibilidade, o que permite sua utilização na área médica e odontológica.

Em comparação com outras composições de LMF menos utilizadas, o conhecimento relativo a cristalografia e comportamento termomecânico, assim como efeitos de tratamentos térmicos e variação das temperaturas de transformação de fase em função da composição química nas ligas de NiTi são bem compreendidos.

Os efeitos termomecânicos característicos das LMF são apresentados pelas ligas de NiTi apenas em uma estreita faixa, em torno da composição equiatômica. Por volta dos anos 1960, o pesquisador William J. Buehler junto com sua equipe, descobriu que ligas de NiTi equiatômicas apresentavam uma temperatura máxima final de transformação austenítica (A_f) da ordem de 120°C. Com essa característica, essas LMF apresentavam o comportamento de EMF na temperatura ambiente. Ao diminuir a composição atômica percentual de Ni, em nada alterava as temperaturas de transformação, porém, ao aumentar o percentual atômico de 50% at para 51% at de Ni, as temperaturas de transformação puderam ser baixadas até $A_f = -40$ °C, obtendo assim, LMF superelásticas.

Além da sensibilidade das temperaturas críticas de transformação com relação a composição química da liga NiTi, os tratamentos termomecânicos também apresentam uma influência importante. Tratamentos térmicos, como recozimento

entre 300 °C e 500 °C, podem alterar drasticamente o comportamento de uma LMF de NiTi equiatômica, podendo até mesmo alterar suas propriedades de superelasticidade para EMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998). Nesse contexto, as LMF de NiTi podem ser minuciosamente projetadas para apresentar tanto seu EMF quanto a superelasticidade, permitindo que o projetista tenha controle adequado sobre seu comportamento termomecânico. Algumas propriedades termomecânicas básicas das LMF de NiTi podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1: Valores típicos de algumas propriedades termomecânicas de LMF NiTi.

Propriedades Físicas	NiTi (Superelástico)	NiTi (EMF)
Densidade	6.45 g/cc	6.45 g/cc
Propriedades Mecânicas		
Tensão Máxima	754 - 960 MPa	754 - 960 MPa
Tensão Limite de Escoamento	560 MPa	100 MPa
Alongamento até ruptura	15.5 %	15.5 %
Módulo de Elasticidade	75.0 GPa	28.0 GPa
Coefficiente de Poisson	0.30	0.30
Módulo de Cisalhamento	28.8 GPa	10.8 GPa
Propriedades Elétricas		
Resistividade Elétrica	0.0000820 ohm-cm	0.0000760 ohm-cm
Susceptibilidade Magnética	0.0000038	0.0000025
Propriedades Térmicas		
Calor Específico	0.320 J/g-°C	0.320 J/g-°C
Condutividade Térmica	10.0 W/m-K	10.0 W/m-K
Ponto de Fusão	1240 - 1310 °C	1240 - 1310 °C

Fonte: MatWeb 2014.

3.3.2. Aplicações Estáticas

As LMF de NiTi vêm sendo cada vez mais utilizadas em diversas áreas, como na medicina, odontologia, engenharia civil, indústria automobilística, aeroespacial e robótica.

Suas propriedades funcionais específicas, como o EMFS, o EMFD e a superelasticidade, associada a alta capacidade de amortecimento na fase martensítica e durante a transformação de fase, dão espaço as mais diversas aplicações nessas áreas.

Na indústria automotiva, com a modernização dos veículos e a constante demanda por dispositivos de segurança, bem como a incessante busca por veículos mais confortáveis e com maior desempenho, o número de sensores e atuadores baseados em LMF vem crescendo de forma importante (JANI ET AL., 2014).

Graças a geração de força e deslocamento resultante do efeito memória de forma, a utilização de fios de NiTi como atuadores vêm substituindo cada vez mais os atuadores eletromagnéticos (motores de indução) no acionamento de retrovisores, palhetas de ajuste térmico (climatizadores), dispositivos de travamento de portas, bem como válvulas de controle de temperatura e sistema de lubrificação em motores automotivos (JANI ET AL., 2014).

A simplicidade e a miniaturização desse gênero de atuadores, pode proporcionar uma significativa redução de peso, de escala e custo na produção de dispositivos que utilizam essas ligas em relação aos dispositivos que utilizam atuadores clássicos. Os benefícios da utilização desses novos dispositivos podem ser vistos no estudo realizado por Neugebauer et al. (2010), onde se compara a utilização de um motor DC e um atuador de NiTi no acionamento de palhetas utilizados em sistemas de ar condicionado automotivo. A Tabela 2 apresenta um comparativo entre as características de ambos tipos de acionamento.

Tabela 2: Características apresentadas por um atuador utilizando motor DC e um fio de NiTi.

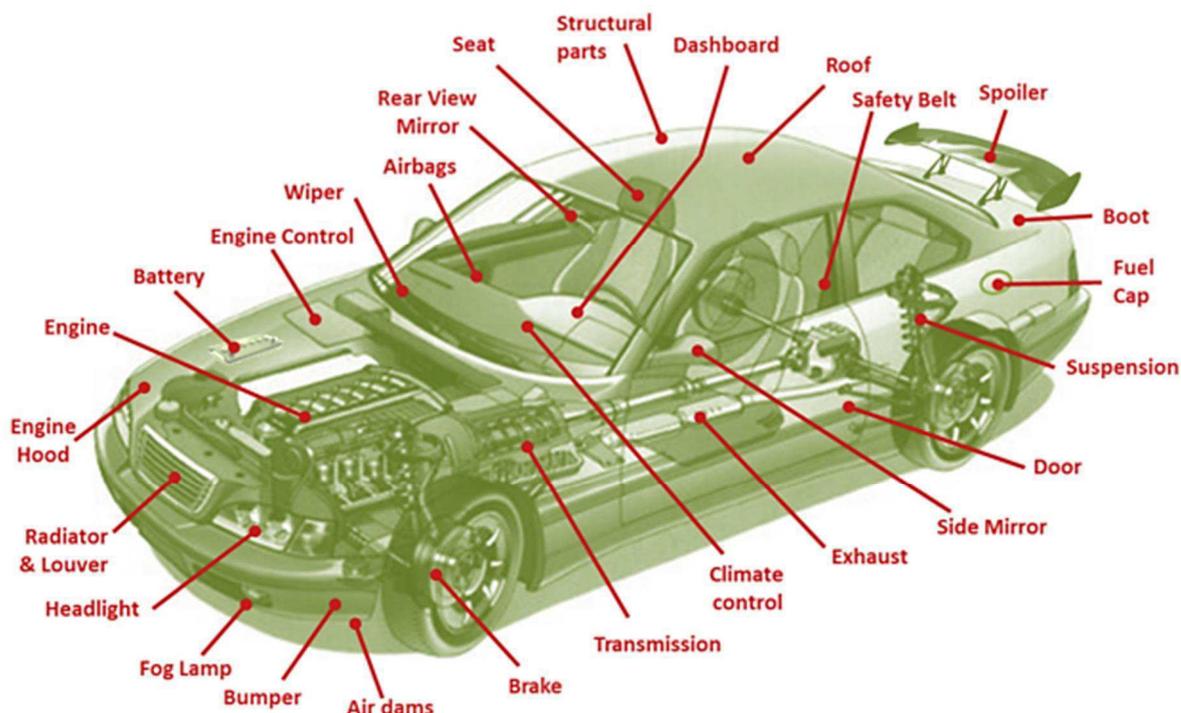
Parâmetros	Motor DC	Atuador de NiTi
		
Tempo de atuação	3s	2-3s
Espaço ocupado	Compacto	Volume do fio
Emissão acústica	Baixo ruído	Sem ruído
Complexidade mecânica	Alta	Baixo
Massa	~65g	~20g
Precisão de posicionamento	$\pm 1,5^\circ$	$\pm 2,25^\circ$
Energia consumida	1W	1W

Fonte:(Jani et al., 2014)

Observando os dados apresentados na Tabela 2, é possível perceber as vantagens do atuador de NiTi com relação ao acionamento utilizando um motor DC. Dentre essas vantagens, a emissão acústica, que no caso do atuador de NiTi é inexistente, o espaço ocupado e a massa do componente, que também é bem menor que a do motor DC, são características que mostram a grande vantagem na utilização de fios de NiTi para o acionamento desse tipo de dispositivo.

Inúmeras aplicações utilizando LMF vem sendo desenvolvidas em substituição a sistemas eletromagnéticos e eletropneumáticos (BELLINI ET AL. 2009). Uma das preocupações na indústria automotiva é quanto ao nível operacional de temperatura atingido em um veículo comum. Nesse contexto, os dispositivos desenvolvidos para essas aplicações precisam apresentar comportamento funcional dentro desses limites de temperatura de trabalho, que podem variar de -40°C a $+125^\circ\text{C}$ (LEO & BUCKLEY, 1998). A Figura 14 apresenta uma ilustração mostrando potenciais aplicações de LMF de NiTi na indústria automotiva.

Figura 14: Dispositivos e potenciais aplicações de LMF em veículos automotivos.



Fonte: (Jani et al., 2014)

Além das aplicações na indústria automobilística, as LMF vêm sendo também utilizadas em uma vasta gama de dispositivos robóticos comerciais, especialmente como micro atuadores e músculos artificiais (MOHAMED ALI & TAKAHATA, 2010; FURST ET AL., 2013). Os principais desafios nessa área são: aumentar o desempenho e miniaturização da plataforma de hardware e aumentar a inteligência do sistema integrado. Nesse contexto, a utilização de elementos de LMF pode proporcionar a fabricação dispositivos menores e mais leves associados a uma boa resposta mecânica.

Com a evolução dos dispositivos robóticos utilizando LMF, começaram a surgir protótipos de próteses antropomórficas utilizando essas ligas. A utilização de fios de LMF de NiTi atuando como tendões é objeto de estudo de diversos pesquisadores hoje em dia. Chee et al. (2005) assim como Kaplanoglu (2012) apresentam resultados referentes ao desenvolvimento de um protótipo de mão robótica utilizando tendões artificiais de NiTi. A Figura 15 apresenta a imagem de um desses protótipos e o esquema de funcionamento do dispositivo.

Figura 15: Exemplo de mão robótica acionada por fios de LMF. (a) Protótipo. (b) Esquema de funcionamento.



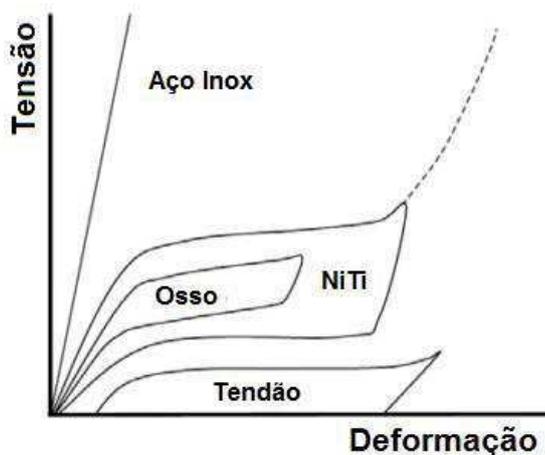
Fonte: (Chee et al. 2005).

Apesar das LMF de NiTi apresentarem um maior custo de produção em relação a outras ligas, como os aços inox em geral, por exemplo, suas propriedades mecânicas únicas associadas a alta resistência, a corrosão e bio-compatibilidade proporciona um grande potencial de aplicações em dispositivos biomédicos.

O baixo módulo de elasticidade, em relação ao aço inox, faz com que as LMF de NiTi sejam bastante utilizadas em próteses de interface óssea, pois essa característica, além de permitir uma maior aceitação do organismo implantado, diminuindo assim o risco de rejeição, proporciona um comportamento mecânico mais próximo do tecido ósseo (SAIGAL & FONTE, 2011). A Figura 16 apresenta um gráfico tensão-deformação qualitativo comparando as propriedades mecânicas do aço inox, NiTi, tecido ósseo e tecido conjuntivo (tendão).

Com o desenvolvimento dos procedimentos cirúrgicos, técnicas como o cateterismo vem se tornando bastante utilizadas devido a sua característica pouco invasiva e de melhor recuperação para o paciente. Nessas técnicas, a utilização de fios de NiTi vem sendo largamente realizada devido a sua biocompatibilidade assim como suas propriedades mecânicas (KRISHNAN, 2004). Em Dispositivos como *stents*, as LMF de NiTi apresentam grande vantagem em comparação com o aço inox pois o comportamento superelástico dessa liga pode resistir com maior eficiência ao esmagamento durante o processo fisiológico normal (força radial da artéria sobre o dispositivo) ao qual o mesmo é submetido (MORGAN, 2004).

Figura 16: Comportamento mecânico do aço inox, NiTi superelástico, Osso e Tendão.



Fonte: (Jani et al., 2014)

Na área odontológica, a utilização dessas LMF NiTi está cada vez mais popular e tem proporcionado uma maior eficiência no tratamento ortodôntico. Devido ao efeito superelástico maiores deslocamentos podem ser impostos com um nível de força praticamente constante. Isso implica em um melhor aproveitamento da força aplicada, pois a mesma se manterá constante durante um maior período, e manterá constante a movimentação dentária. A Figura 17 apresenta a utilização de arcos ortodônticos de NiTi.

Figura 17: Aplicação de arcos ortodônticos de LMF NiTi para tratamento dentário.

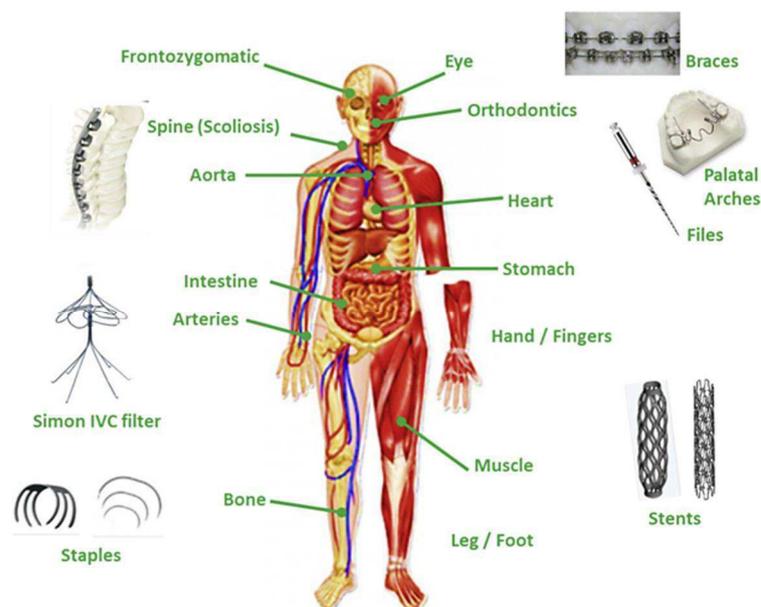


Fonte:(FerTec et al., 2014)

Nesse contexto inúmeros dispositivos vêm sendo desenvolvidos para utilização nas áreas médica e odontológica. Graças às propriedades únicas das LMF de NiTi, cada vez mais dispositivos são utilizados com maior eficiência e proporcionando uma melhor recuperação de pacientes submetidos aos mais diversos procedimentos

cirúrgicos. A Figura 18 apresenta exemplos de dispositivos e potenciais aplicações dessas LMF na área biomédica.

Figura 18: Dispositivos e potenciais aplicações de LMF de NiTi na área biomédica.



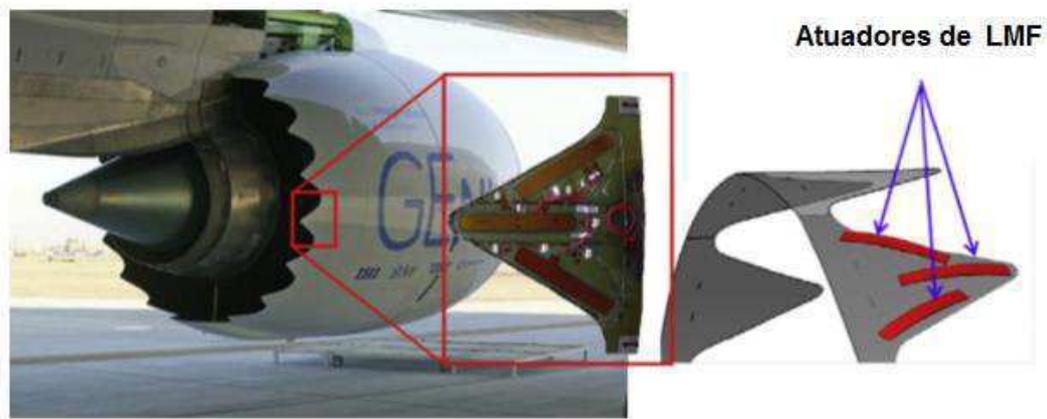
Fonte: (Jani et al., 2014)

3.3.3. Aplicações Dinâmicas

Além das aplicações de caráter estático, as LMF apresentam excelentes propriedades no que diz respeito ao comportamento dinâmico. A capacidade de dissipar energia devido a histerese apresentada pelo ciclo superelástico faz com que esses materiais sejam uma boa escolha na aplicação em sistemas de amortecimento e de controle de vibrações. Na indústria aeroespacial, essas LMF vêm sendo bastante utilizadas, pois nesse ramo da engenharia as solicitações mecânicas apresentam um caráter dinâmico predominante. Nesse contexto, a utilização de materiais compósitos que utilizam reforço com LMF de NiTi tem apresentado resultados promissores em aplicações desse tipo.

A empresa aeroespacial Boeing desenvolveu um dispositivo aerodinâmico utilizando atuadores de LMF, conhecido como Chevron de geometria variável, do inglês *Variable Geometry Chevron* (VGC). Instalado no difusor das turbinas a jato, esse dispositivo mostrado na Figura 19 tem por objetivo promover a redução do ruído gerado durante o pouso e a decolagem dos aviões.

Figura 19: Dispositivo conhecido como Chevron, utilizado para atenuação de ruído.



Fonte: (Oehler et al., 2012)

Ainda na indústria aeroespacial, compósitos ativos utilizando fibra de carbono associada a reforços de fios de LMF embebidos em uma matriz polimérica podem proporcionar grandes avanços no que diz respeito a controle de vibração. Em sistemas submetidos a vibrações mecânicas, a frequência de ressonância é algo que se deve evitar ao máximo. A ressonância é atingida quando a frequência de excitação da estrutura coincide com a frequência natural da mesma, e neste ponto a estrutura começa a apresentar grandes amplitudes de vibração e conseqüentemente grandes níveis de tensão mecânica são atingidos.

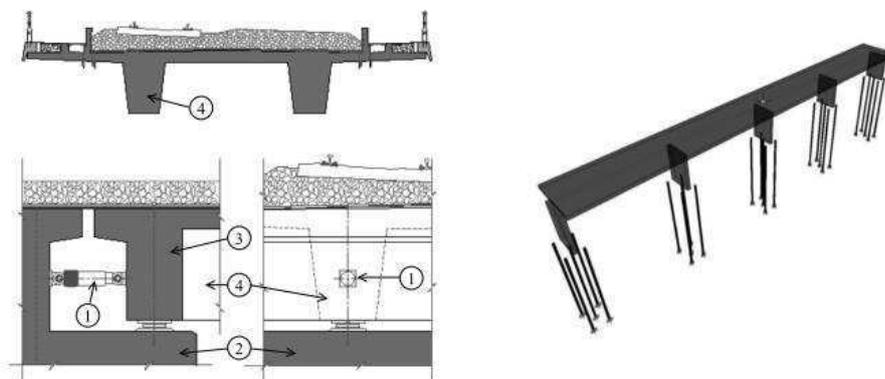
Nesse contexto, em equipamentos sujeitos a esse tipo de solicitação mecânica, se faz necessário aplicar dispositivos absorvedores de energia ou proporcionar a variação de rigidez do corpo, visto que a frequência natural é diretamente proporcional a essa propriedade. Dessa forma, a aplicação das LMF em compósitos ativos de fibra de carbono tem proporcionado bons resultados no que diz respeito ao controle de vibrações. Além da energia dissipada por essas ligas, devido a histerese de tensão presente no comportamento mecânico, as mesmas podem alterar sua rigidez ao passar pela mudança de fase por aquecimento. Yuse & Kikushima (2005) apresentam resultados referentes ao controle de vibração utilizando atuadores compósitos de LMF/CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*, polímeros reforçados por fibra de carbono).

Na engenharia civil, a ocorrência de fenômenos sísmicos muitas vezes gera resultados catastróficos. A preocupação com esses eventos tem se refletido no

desenvolvimento de novas tecnologias, bem como na utilização de dispositivos aplicados na construção de edifícios, pontes e viadutos, com o objetivo de minimizar suas consequências. Nesse contexto (ALAM ET AL., 2007; Debbarma & Saha, 2012) apresentaram um estudo sobre a utilização das LMF aplicados a engenharia civil com o objetivo de aumentar o desempenho estrutural dessas construções.

Amarante & Cismasiu (2011) analisaram numericamente a resposta dinâmica de um viaduto submetido a eventos sísmicos, equipado com um sistema de engastes superelásticos de NiTi. A influência da resposta superelástica do sistema sobre a estrutura foi analisada através do deslocamento relativo, velocidade e aceleração do *deck* principal quando este foi submetido a diversas situações de carregamento dinâmico. A Figura 20 apresenta uma ilustração do problema analisado. Nesse contexto, os resultados apresentados foram bastante promissores. Conseguiu-se reduzir em cerca de 40% o nível de deslocamento e em 50% as velocidades atingidas pelo sistema. Dessa forma, o nível de absorção de energia dissipada pelo elemento de NiTi chegou a 23% da energia total de oscilação.

Figura 20: Esquema do viaduto reforçado por LMF utilizado nas análises computacionais.



Legenda: 1- Dispositivo de LMF; 2- Suporte; 3- Viga Transversal; 4- Viga Principal

Fonte: (Amarante & Cismasiu, 2011)

Ainda na engenharia civil, (TORRA ET AL., 2013) analisaram a resposta dinâmica de um dispositivo fabricado em LMF superelástica de NiTi acoplado a cabos de aço de uma ponte estaiada. Foram obtidos resultados bastante promissores no que diz respeito ao amortecimento gerado pela dissipação de energia, bem como a redução das amplitudes de oscilação sofrida pela estrutura, demonstrando a eficiência do dispositivo utilizando LMF. A Figura 21 apresenta uma imagem da montagem experimental realizada.

Figura 21: Vista geral dos cabos de aço de uma ponte estaiada. (A) Cabos. (B) Dispositivo de LMF de NiTi. (C) Instrumentação eletrônica utilizada.



Fonte: (Torra et al., 2013)

Com a utilização desses dispositivos, foi possível reduzir pela metade as amplitudes de oscilação sofridas pela estrutura. Além disso, devido a dependência térmica do comportamento da LMF empregada, o dispositivo apresentou boa resposta mecânica tanto no verão, onde são atingidas temperaturas de até 40 °C, quanto no inverno, onde as temperaturas poderiam cair até cerca de - 20 °C, ratificando assim o potencial desses materiais.

3.4. Comportamento Dinâmico

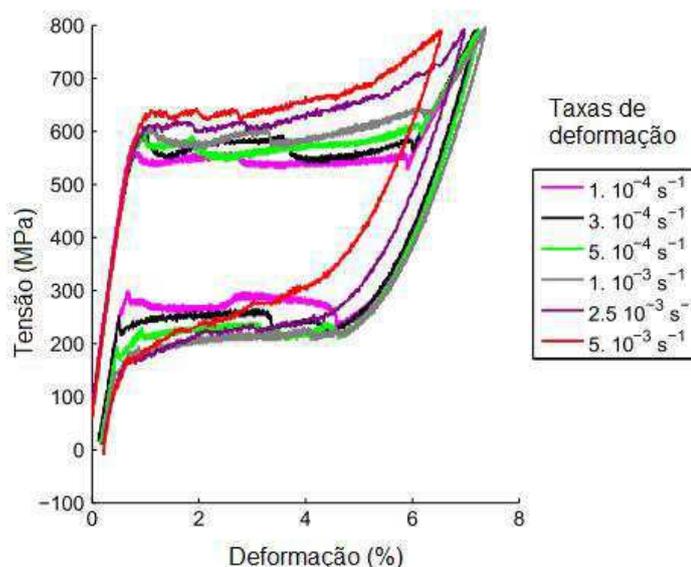
3.4.1. Aspectos Experimentais

Devido ao grande potencial das LMF no que diz respeito a aplicações dinâmicas, inúmeros estudos vêm sendo realizados a fim de caracterizar para melhor compreender e aplicar esses materiais funcionais. Diversos grupos de pesquisa espalhados pelo mundo têm investigado a resposta dinâmica superelástica dessas LMF.

Morin et al. (2011) realizaram um estudo dirigido ao comportamento dinâmico de fios de LMF de NiTi. Estes pesquisadores submeteram fios NiTi superelásticos, de 2mm de diâmetro, a carregamentos cíclicos em *diferentes taxas de deformação*. Esses ensaios foram realizados utilizando uma máquina de ensaios dinâmicos MTS 810 equipada com uma célula de carga de 100 kN, além de um termopar do tipo K de 0,25 mm de diâmetro que teve por objetivo captar a variação de temperatura do corpo

de prova. Esses fios foram submetidos a uma tensão máxima final de 800 MPa. A Figura 22 apresenta os resultados obtidos desses experimentos.

Figura 22: Resposta superelástica de um fio de NiTi submetido a diferentes taxas de carregamento.

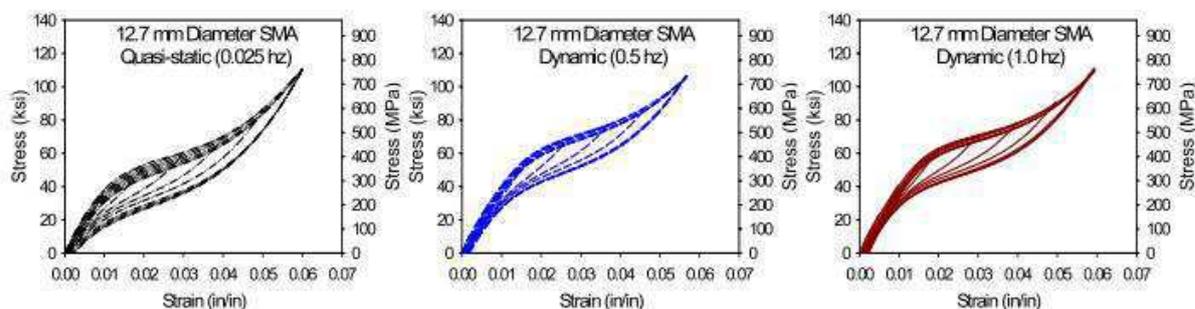


Fonte: (Morin et al., 2011a)

Ainda que para baixos níveis de taxas de deformação, foi possível observar, a partir dos resultados apresentados na Figura 22, a variação da resposta mecânica em função destas diferentes taxas. Esses resultados mostram o nível de sensibilidade do material às taxas de carregamento estudadas.

DesRoches & McCormick (2003) realizaram uma investigação sobre a influência do diâmetro dos corpos de prova na resposta dinâmica superelástica de ligas de NiTi. Foram utilizados fios de 7,1; 12,7 e 25,4 mm de diâmetro submetidos a frequências de deformação de 0,025; 0,5 e 1 Hz. As amostras foram submetidas a ciclos superelásticos de 2, 3, 4, 5 e 6% de deformação. Para isso, foi utilizada uma máquina de ensaios dinâmicos MTS 647 equipada com uma célula de carga com capacidade máxima de 250 kN. A Figura 23 permite visualizar os resultados obtidos para o fio de 12,7 mm de diâmetro, submetido as diferentes frequências de deformação.

Figura 23: Resposta dinâmica superelástica de fios de NiTi a diferentes frequências de ensaio.

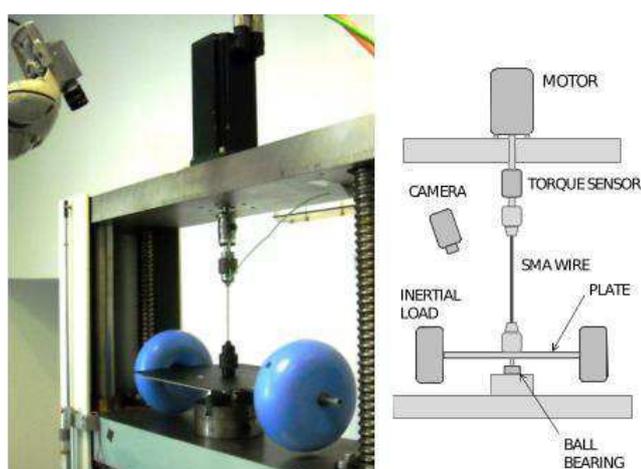


Fonte: (DesRoches & McCormick, 2003).

Os testes realizados mostraram que o aumento na frequência de carregamento levou a um aumento tanto do patamar superelástico, quanto das tensões de transformação. Também foi possível observar um leve aumento no patamar de descarregamento do laço superelástico. Esse comportamento implica em uma diminuição da histerese mecânica, influenciando diretamente na redução do amortecimento viscoso equivalente apresentado pelo material.

Doaré et al. (2012) analisaram o comportamento dinâmico superelástico de fios de LMF de NiTi submetidos a um carregamento torsional. Um pêndulo de torção foi desenvolvido exclusivamente para a realização dos experimentos. A Figura 24 apresenta uma imagem bem como um esquema do aparato utilizado.

Figura 24: Montagem experimental e esquema do pêndulo torsional utilizado nos experimentos com fios de LMF.

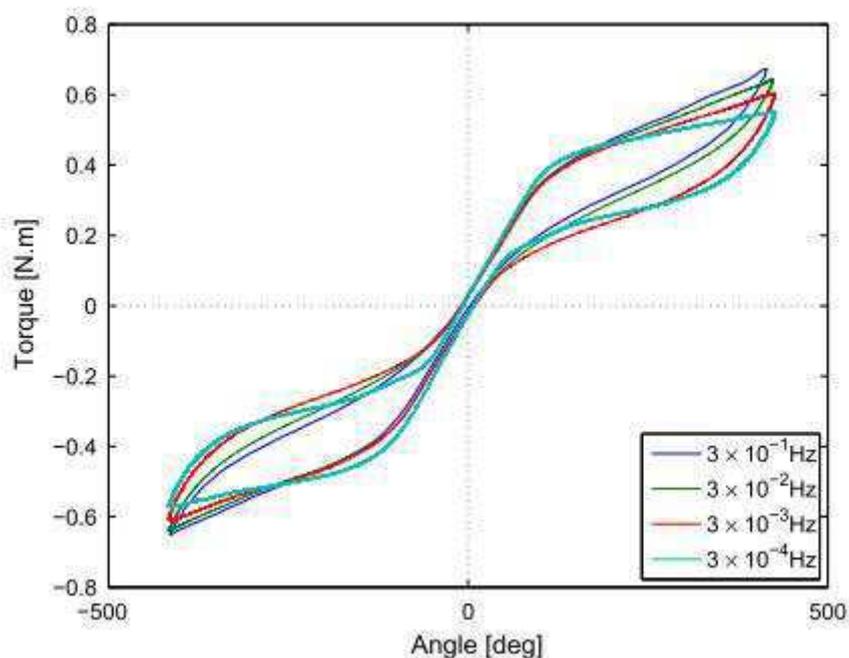


Fonte: (Doaré et al., 2012)

Os fios LMF foram submetidos a ciclos de deformação torsional de 175°, 250°, 350° e 450°. Dessa forma, para os maiores níveis de ângulo de torção, foi possível

atingir o comportamento superelástico pleno. Em cada um desses níveis, variou-se a frequência de ensaio de 10^{-5} Hz a 1 Hz, obtendo assim uma gama de resultados referentes ao comportamento superelástico do material em torção. A Figura 25 apresenta os resultados obtidos para aplicação de uma torção de 450° para diferentes frequências de ensaios.

Figura 25: Caracterização do efeito dinâmico superelástico torsional em um fio de NiTi a diferentes frequências de ensaio.



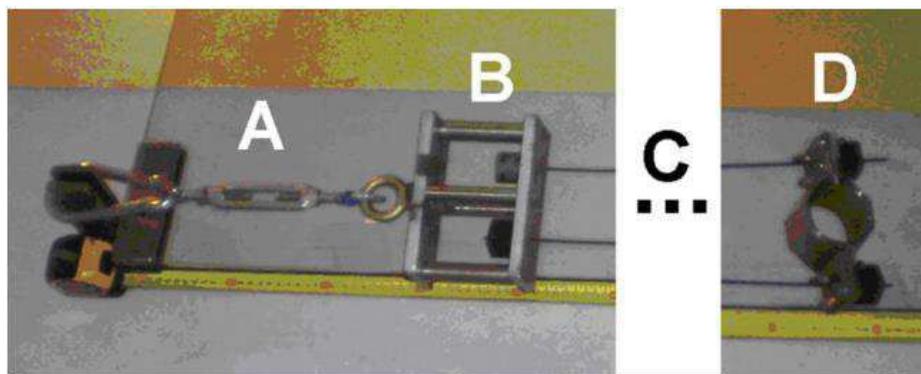
Fonte:(Doaré et al., 2012).

De forma semelhante ao gráfico clássico de tensão-deformação, na Figura 25 podemos observar o torque em função do ângulo de deformação. É possível perceber claramente a evolução do comportamento superelástico em função da frequência de ensaio. Para as frequências mais altas, foram obtidos os maiores níveis de torque assim como observou-se também uma diminuição na histerese apresentada. Esse comportamento é semelhante ao apresentado por Morin et al. (2011) quando utilizou fios NiTi submetidos a tração uniaxial.

Conforme mostrado anteriormente, Torra et al.(2013) construíram um dispositivo utilizando fios de LMF de NiTi com o objetivo de reduzir o nível de oscilação sofrido por cabos (estaias) de pontes estaiadas. Tal dispositivo foi construído utilizando dois fios de NiTi de 2,36 mm de diâmetro acoplados a terminais de sustentação em suas extremidades. Esses terminais foram engastados de forma a

limitar o movimento oscilatório radial das estaias (variação da flecha da catenária). A Figura 26 apresenta o dispositivo fabricado. Além da caracterização superelástica, resultados dinâmicos referentes a diminuição das amplitudes de oscilação foram obtidos a partir dos experimentos realizados.

Figura 26: Dispositivo com fios de LMF NiTi utilizado para amortecer os níveis de oscilação sofridos por cabos de aço de pontes estaiadas.

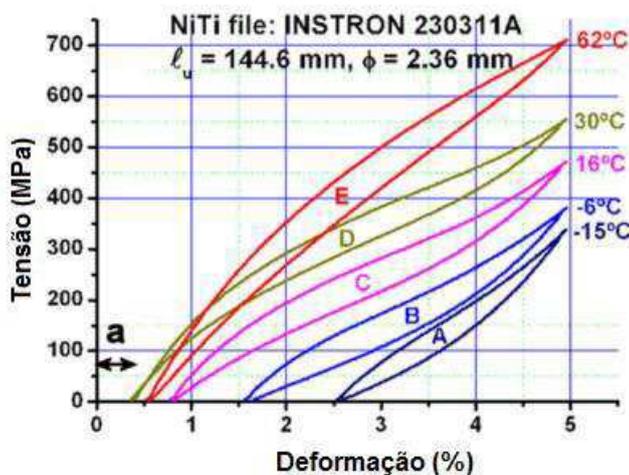


Legenda: A- Tensionador; B- Fixação dos Fios de NiTi; C- Comprimento de ~1000mm; D- Engaste

Fonte:(Torra et al., 2013)

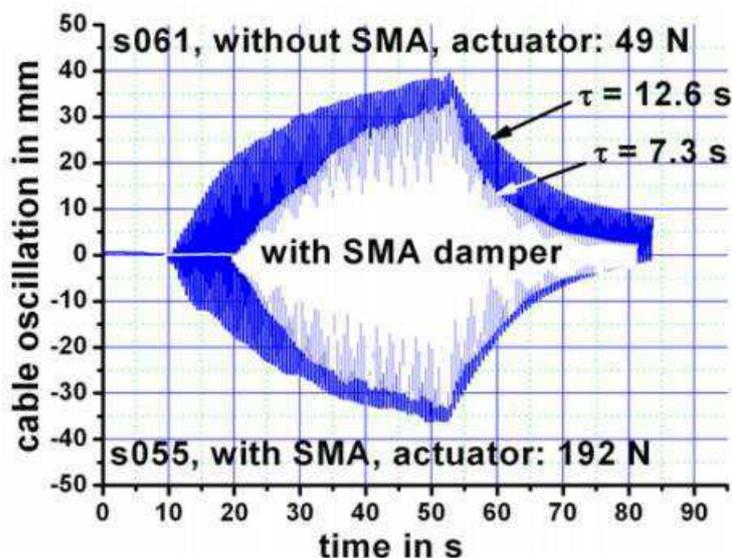
A Figura 27 apresenta a resposta mecânica superelástica dos fios de NiTi utilizados. É possível observar os diferentes níveis de tensão atingidos pelo material ao serem submetidos a diversas temperaturas. Esses resultados reforçam a dependência térmica no comportamento superelástico do material.

Figura 27: Resposta mecânica de um fio de NiTi submetido a carregamentos dinâmicos a várias temperaturas.



Fonte:(Torra et al., 2013)

Figura 28: Resultados experimentais do comportamento oscilatório dos cabos de aço sem a utilização (gráfico azul) e com a utilização do sistema de amortecimento de SMA (gráfico branco).



Fonte: (Torra et al., 2013).

Na Figura 28 se pode perceber uma redução considerável nas amplitudes de oscilação sofridas pelo sistema. Além disso, o decaimento oscilatório ocorre de forma mais acentuada, reduzindo o tempo de amortecimento em quase 50 %. De forma geral, os resultados obtidos através dos experimentos realizados mostraram uma viabilidade técnica na aplicação desses dispositivos.

Nesse contexto, é possível perceber então a influência da taxa de deformação ou carregamento na resposta mecânica das LMF de NiTi, ratificando assim, a importância da investigação do comportamento dinâmico desse tipo de material.

3.5. Comportamento Térmico de LMF de NiTi sob Carregamento Dinâmico

3.5.1. Aspectos Experimentais

A transformação de fase martensítica termoelástica é um fenômeno termomecânico e, portanto, está intrinsicamente acoplado a efeitos térmicos. A transformação martensítica direta (Austenita-Martensita) apresenta um comportamento exotérmico, ou seja, é liberado calor latente durante sua transformação. Já na transformação reversa (Martensita-Austenita) tem-se uma

absorção de calor do meio ambiente, caracterizando assim um comportamento endotérmico.

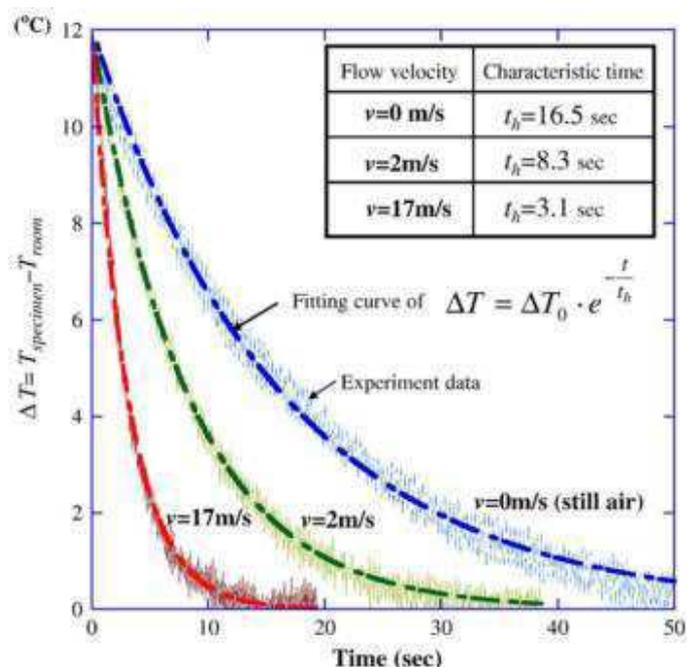
Quando se submete as LMF a ciclos superelásticos, sabe-se que durante o carregamento há uma liberação de calor devido ao efeito exotérmico da transformação de fase direta e ao descarregar o material, tem-se uma absorção de calor devido ao efeito endotérmico característico da transformação reversa. Nesse contexto, vários estudos experimentais vêm sendo desenvolvidos a fim de investigar a influência da taxa de deformação sobre o comportamento termomecânico superelástico desses materiais (ALONSO ET AL. 2013), (DUNIPI ET AL. 2014), (Y. J. HE & SUN, 2011), (HE ET AL. 2010), (MORIN ET AL. 2011), (ZHANG ET AL., 2010).

Diversos autores atribuem a evolução do comportamento superelástico, quando submetidos a um aumento nas taxas de deformação, ao aumento da temperatura que ocorre durante os ciclos exotérmicos e endotérmicos. Shaw & Kyriakides (1995) realizaram experimentos utilizando LMF submetidas a carregamentos superelásticos em diferentes meios: ao ar e em água. Seus resultados mostraram uma forte dependência do comportamento mecânico quando os ensaios eram realizados ao ar, o que sugere que essa dependência é devido ao acoplamento termomecânico (efeito térmico).

Grabe & Bruhns (2008) chegaram a mesma conclusão quando mostraram experimentalmente que a dependência na taxa de deformação desaparecia completamente quando a temperatura da amostra era mantida constante, ratificando que o comportamento térmico se sobrepunha a qualquer comportamento dinâmico existente.

Ainda no âmbito da investigação térmica, He et al. (2010) submeteram amostras superelásticas de NiTi a diversas condições de carregamento dinâmico. Além disso, foi observado o comportamento térmico da amostra para três diferentes condições ambientes, ar parado e velocidades do ar no entorno da amostra de 2 e 17 m/s. A Figura 29 apresenta resultados experimentais para as diferentes condições ambientais impostas aos corpos de prova utilizados.

Figura 29: Temperatura da LMF em função do tempo para diferentes condições ambientais.

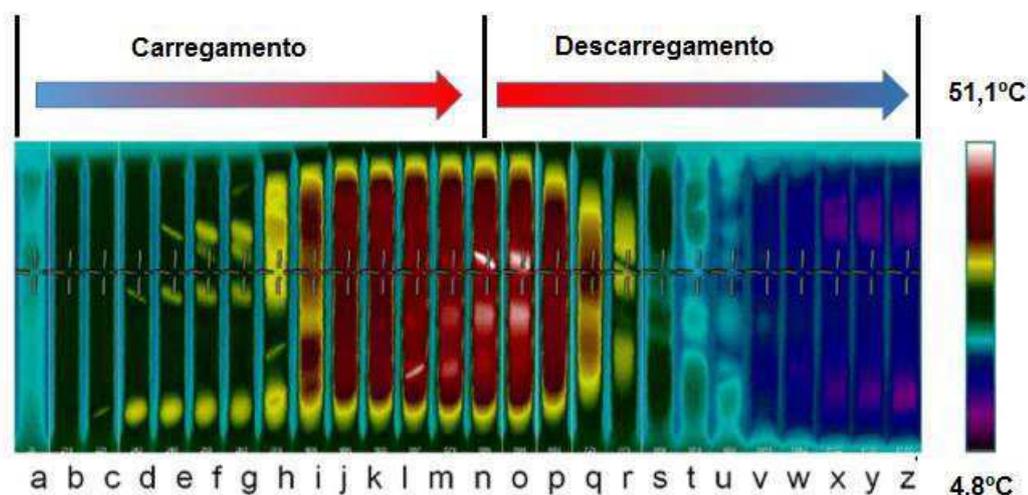


Fonte: (He et al. 2010).

O gráfico da Figura 29 mostra o comportamento térmico da amostra quando submetida a diferentes condições ambientais. Observa-se que para a maior velocidade do ar ($v = 17$ m/s) o tempo de resfriamento apresentado pelo material foi menor que para as outras condições de ensaio. Dessa forma, pode-se concluir que ao submeter esses materiais a carregamentos cíclicos dinâmicos (altas taxas de carregamento), não há tempo suficiente para que o calor gerado seja liberado e, portanto, esse acúmulo de calor leva ao aumento da temperatura da amostra.

Ainda com o objetivo de estudar o comportamento térmico no regime superelástico das LMF, Zhang et al. (2010) submeteram amostras de LMF de NiTi a deformações cíclicas de até 6% a diferentes taxas de carregamento na temperatura ambiente (23°C). Em paralelo, com o auxílio de uma câmera termográfica modelo FLIR PM695, foi observado a resposta térmica do material quando submetido aos ciclos de deformação. A imagem da Figura 30 apresenta o resultado obtido por esses pesquisadores.

Figura 30: Imagem termográfica obtida durante o ensaio cíclico de um corpo de prova superelástico de NiTi.

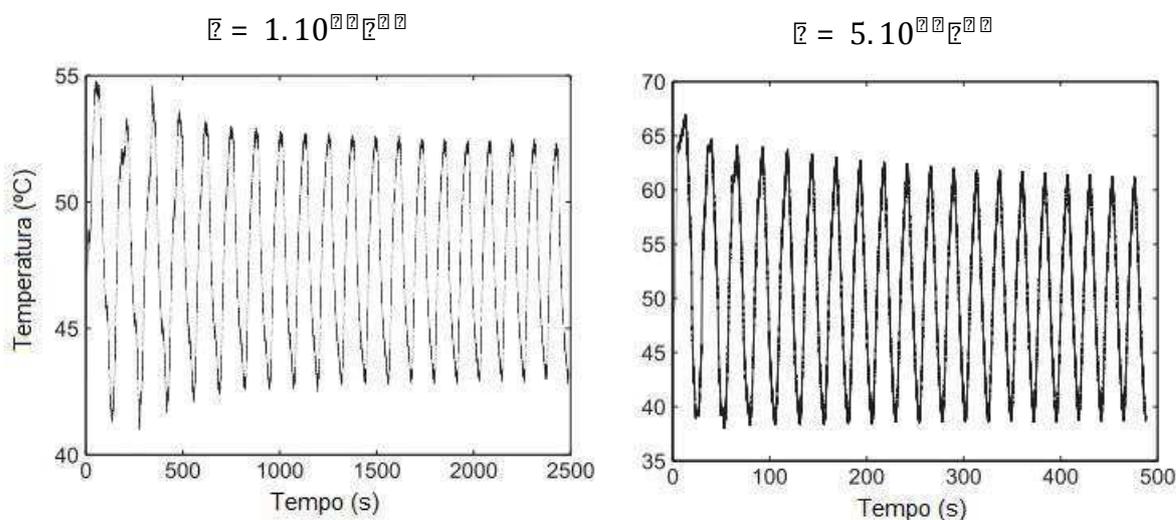


Fonte: (Zhang et al. 2010).

A Figura 30 apresenta uma sequência de imagens termográficas obtidas durante a ciclagem mecânica da LMF NiTi. É possível observar, nessa composição de imagens, o desenvolvimento do comportamento térmico sofrido pelo material. Durante o carregamento, do ponto *a* ao ponto *n*, a amostra, inicialmente a temperatura ambiente (aproximadamente), apresenta um aumento de temperatura devido a liberação de calor proveniente do efeito exotérmico da transformação de fase, atingindo cerca de até 51,1 °C, conforme verifica-se na escala ao lado da imagem. Durante o descarregamento, do ponto *n* ao ponto *z*, nota-se a diminuição na temperatura apresentada pelo material. Ao final do descarregamento, o corpo de prova atinge uma temperatura de aproximadamente 4,8 °C, evidenciando o efeito endotérmico da transformação de fase reversa. Ao final desse estudo, Zhang et al. (2010) concluíram que o efeito térmico apresenta grande influência sobre o comportamento superelástico desse material.

Durante ensaios cíclicos a diferentes taxas de deformação, Morin et al.(2011) monitoraram o comportamento térmico de um fio de NiTi de 2 mm de diâmetro submetido a uma temperatura ambiente de 50 °C com o auxílio de um micro termopar do tipo K. Os fios foram submetidos a taxas de deformação variando de $1E-4 s^{-1}$ e $5E-3 s^{-1}$ e uma carga máxima de 800 MPa. A Figura 31 apresenta a resposta térmica em função do tempo, obtida para duas taxas de deformação distintas.

Figura 31: Resposta térmica em função do tempo de fios de NiTi submetidos a diferentes taxas de deformação.

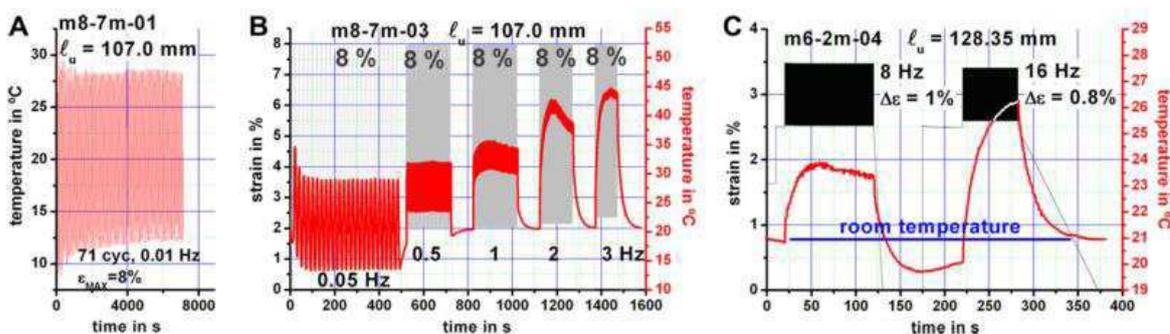


Fonte: (Morin et al., 2011)

A partir da Figura 31, constata-se a variação de temperatura apresentada pelo material durante o carregamento cíclico. Para a menor taxa de deformação ($\dot{\epsilon} = 1.10^{-2} \text{ s}^{-1}$), inicialmente a uma temperatura de 50 °C, o material atinge uma temperatura máxima de ~ 53 °C durante o carregamento e uma temperatura mínima de ~ 43 °C durante o descarregamento. Para o ensaio realizado a uma maior taxa de deformação ($\dot{\epsilon} = 5.10^{-2} \text{ s}^{-1}$), as temperaturas máximas e mínimas atingiram em média 63 °C e 40 °C, respectivamente.

Torra et al. (2013) desenvolveram um dispositivo fabricado com fios de LMF de NiTi superelásticos visando amortecer vibrações mecânicas sofridas por pontes estaiadas. O dispositivo foi submetido a frequências de deformação variando de 0,01 Hz a 16 Hz. Durante os ensaios realizados a temperatura ambiente (21 °C), a resposta térmica da LMF foi acompanhada utilizando-se micro termopares do tipo K instalados ao longo do dispositivo. A Figura 32 apresenta os resultados obtidos para as diferentes frequências de ensaio as quais o dispositivo foi submetido.

Figura 32: Resposta térmica em função do tempo de fios de NiTi submetidos a diferentes taxas de deformação.



Fonte: (Torra et al., 2013).

Observa-se no gráfico A da Figura 32, que para uma frequência de deformação de 0,01 Hz, a resposta térmica do material se mostra similar ao resultado obtido por Morin et al. (2011), mostrado na Figura 31. Isto é, ambos os estudos mostraram um aumento da temperatura durante o carregamento e uma redução durante o descarregamento.

No gráfico B da Figura 32, verifica-se o comportamento térmico para diferentes frequências de ensaios realizados sob uma deformação de 8 %. Para a frequência de 0,05 Hz, a temperatura mínima atingida pela amostra é de aproximadamente 14 °C, que corresponde a 6 °C abaixo da temperatura ambiente. Isso mostra que o comportamento endotérmico da transformação de fase reversa tem um efeito bastante forte nessa frequência. Para 0,5 Hz, ainda é possível observar um comportamento térmico oscilatório, porém com uma menor amplitude de temperatura e esse comportamento se repete ainda para 1 Hz. Porém, ao atingir as frequências de 2 e 3 Hz, é possível observar um aumento importante na temperatura do material, chegando até ~45 °C.

No gráfico C da Figura 32, constata-se que ao submeter o dispositivo a frequências de 8 Hz e 16 Hz, porém com menores amplitudes de deformação, ainda é possível observar um aumento considerável na temperatura do material. De acordo com estes resultados é possível observar que para as maiores frequências, o calor liberado durante os ciclos exotérmicos não tem tempo suficiente para ser dissipado para o meio, provocando assim um aumento da temperatura do material. Por consequência, sabe-se que este aumento na temperatura do material acarreta um

aumento das tensões de transformação de fase, obedecendo à Lei de Clausius-Clapeyron para as LMF.

Nesse contexto, é possível concluir que a dependência da resposta dinâmica superelástica das LMF é principalmente devido ao efeito da temperatura, e não da taxa de carregamento do material (MORIN ET AL., 2011).

3.6. Modelos constitutivos para o comportamento termomecânico das LMF

O comportamento termomecânico apresentado pelas LMF é bastante complexo quando se percebe que o mesmo apresenta dependência direta da tensão e da temperatura. Esses aspectos estão intimamente ligados a efeitos de mudanças de fase cristalográficas sujeitas a efeitos térmicos intrínsecos do processo. Por esse motivo, para descrever o comportamento de determinados sistemas que utilizam esses materiais, deve ser feita a utilização de modelos constitutivos adequados. Assim, o modelo deve ser capaz de lidar convenientemente com o conjunto de propriedades das LMF de acordo com o tipo de aplicação. Nesse contexto, modelos que negligenciam o efeito das taxas de carregamento e deformação, podem ser aplicados com sucesso na descrição do comportamento mecânico em análises quase estática, que é o caso dos modelos propostos por Auricchio et al.(2006) e McCormick et al.(2006). Já em situações onde se faz necessária a descrição de fenômenos dinâmicos, os modelos que apresentam uma dependência da taxa de carregamento e taxa de deformação são indispensáveis. Nesse último caso, os modelos apresentados por Liang & Rogers (1990) e Tanaka et al.(1986) podem ser utilizados.

Atualmente, vários modelos constitutivos podem ser encontrados na literatura. A maioria deles, descrevem o comportamento do material de forma unidimensional, o que facilita seu desenvolvimento e podem ser expandidos para casos bi e tridimensional. Uma das características mais comuns presente na maioria desses modelos são: **leis de comportamento mecânico**, que descrevem as relações de tensão-deformação. **Leis** que descrevem a **cinética da transformação** de fase martensítica. E no caso dos modelos que levam em consideração a dependência do carregamento mecânico no comportamento superelástico, **equações de balanço de**

energia são acopladas para descrever os efeitos térmicos presente nas transformações de fase.

Tipicamente, os modelos constitutivos apresentam leis comportamentais que regem o desenvolvimento das tensões (σ), deformações (ϵ), temperatura (T), e frações martensíticas (f). A fração martensítica é uma variável de estado que descreve a quantidade de martensita presente no material durante a transformação de fase. Assim, ao deformar o material, a coexistência de duas fases se desenvolve durante o processo. Nesse contexto, a maioria dos modelos representam o nível de deformação do material dividido em duas parcelas: uma parcela de deformação elástica (ϵ_{el}) e outra parcela de transformação de fase (ϵ_{tr}). A Equação 4 descreve esse comportamento:

$$\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{tr} \quad (4)$$

Sabendo que a deformação responsável pela transformação de fase pode ser expressa em função da deformação máxima residual (ϵ_{tr}^0) e a fração martensítica (f), e levando em conta que a deformação elástica é igual a deformação austenítica (ϵ_{el}), a deformação total pode ser reescrita como mostrado na Equação 5:

$$\sigma = E_a \epsilon + E_m f \epsilon_{tr}^0 \quad (5)$$

$$0 \leq f \leq 1.$$

Dessa forma, a lei que descreve o comportamento mecânico pode ser escrita como mostrado pela Equação 6, onde:

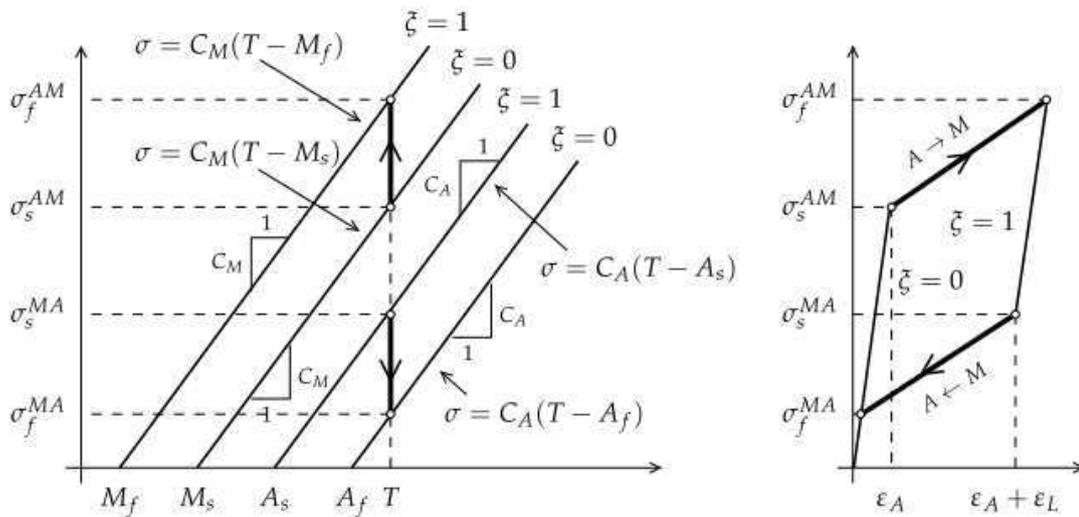
$$\sigma = E_a \epsilon = E_a \epsilon_{tr}^0 f = E_a \epsilon_{tr}^0 (1 - f) \quad (6)$$

em que (E_a) representa o módulo de elasticidade da fase austenita.

As leis cinéticas de transformação descrevem matematicamente a evolução do comportamento da fração martensítica em função dos níveis de tensão mecânica e temperatura experimentados pelo material.

A Figura 33a apresenta-se um diagrama tensão-temperatura crítica de transformação de fase. Nela é possível observar, para uma determinada temperatura T , o caminho percorrido durante a transformação de fase induzida por tensão. O mesmo caminho é representado em termos de tensão-deformação na Figura 33b.

Figura 33: (a) Diagrama tensão-temperatura. (b) Diagrama tensão-deformação.



Fonte:(Cismasiu, 2010).

Durante a transformação direta ($A \rightarrow M$) o material passa de uma tensão de início de transformação martensítica (σ_f^{MA}), para uma tensão final de transformação martensítica (σ_s^{MA}). De forma análoga, durante a transformação de fase reversa ($M \rightarrow A$), o material sai de uma tensão de início de transformação austenítica (σ_f^{AM}), para uma tensão final de transformação austenítica (σ_s^{AM}). Nesse contexto, a variação da fração martensítica ocorre de $\xi = 0 \rightarrow \xi = 1$ durante a transformação direta ($A \rightarrow M$), e de $\xi = 1 \rightarrow \xi = 0$ durante a transformação reversa ($M \rightarrow A$). As funções que descrevem a evolução da fração martensítica durante a transformação de fase induzida por tensão são representadas pelas Equações 7 e 8. Para a transformação ($A \rightarrow M$) tem-se:

$$\xi = \frac{\sigma - \sigma_f^{MA}}{\sigma_s^{MA} - \sigma_f^{MA}} \quad (7)$$

E para a transformação (M→A), tem-se:

$$\dot{M} = \frac{C_M (T - M_s)}{C_A (M_s - T)} \quad (8)$$

Para as transformações de fase induzidas pela variação de temperatura, as equações que descrevem o comportamento da fração martensítica tomam como base as temperaturas críticas de transformação M_F , M_S , A_S e A_F , assim como as constantes C_M e C_A . Nesse contexto, as equações que descrevem esse comportamento são representadas pelas Equações 9 e 10. Para a transformação (A→M) tem-se:

$$\dot{M} = \frac{C_M (T - M_s)}{C_A (M_s - T)} \quad (9)$$

E para a transformação (M→A), tem-se:

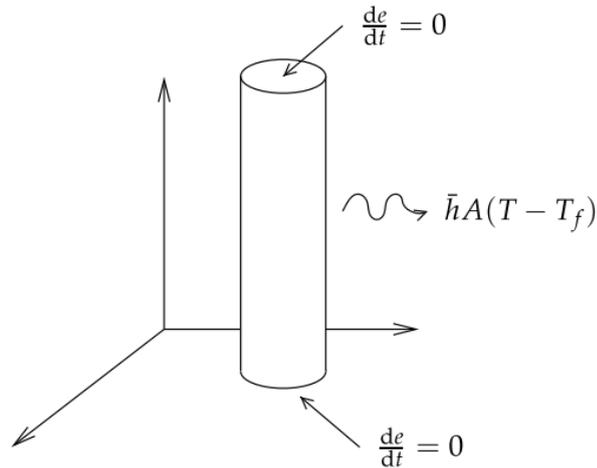
$$\dot{M} = \frac{C_M (T - M_s)}{C_A (M_s - T)} \quad (10)$$

Quando são assumidas condições de carregamento quase estático, as trocas de calor ocorridas entre a superfície do material e o meio ao seu redor ocorrem de tal forma que um comportamento isotérmico é observado. Contudo, ao submeter o corpo de prova a carregamentos dinâmicos, a capacidade de dissipação de energia térmica é limitada pelo coeficiente de convecção de calor. Nesse contexto, o calor gerado durante o carregamento cíclico é maior que o dissipado por convecção, provocando variações na temperatura do material, o que influencia diretamente nas propriedades mecânicas apresentadas. Para descrever esse fenômeno, as leis que descrevem o comportamento mecânico e a cinética da transformação martensítica devem ser acopladas a equações que descrevem o balanço térmico e consideram o efeito térmico apresentado pelo efeito das transformações de fase (CISMASIU, 2010).

A Figura 34 apresenta um esquema do balanço de energia realizado para um corpo de prova cilíndrico, fixo nas duas extremidades e circulado por ar a uma temperatura T_f . Assume-se que a condução de calor através das extremidades do

cilindro é desprezível e que toda a troca de calor com o meio ambiente é realizada por convecção através da superfície lateral do mesmo.

Figura 34: Esquema representado o balanço de energia térmica para um corpo de prova cilíndrico.



Fonte:(Cismasiu, 2010).

O fenômeno de condução de calor através do cilindro é descrito pela lei de Fourier (INCROPERA & DeWITT, 1992) através da Equação 11, como sendo:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (11)$$

em que o fluxo de calor \dot{Q} é expresso em função do gradiente de temperatura e da condutividade térmica k . De acordo com a conservação de energia, para um pequeno elemento, o problema de condução de calor transiente pode ser descrito através do equacionamento diferencial de condução de calor mais um termo de geração, como apresentado pela Equação 12, em que:

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{q} \quad (12)$$

O termo \dot{q} representa o calor gerado pelo corpo durante o ciclo superelástico. Esse calor é geralmente conduzido através do mesmo e dissipado via convecção e/ou radiação. A mudança no nível de energia interna (\dot{Q}) está associada a habilidade do

material armazenar calor através do aumento de sua temperatura. Esse comportamento é descrito pela Equação 13, como segue:

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

em que ρ é a densidade do material e c representa o calor específico.

A equação que representa o balanço de calor resulta da substituição do termo que representa a variação da energia interna, mostrado pela Equação 13, assim como o termo de geração de calor, apresentado pela Equação 12 na lei de condução de Fourier descrita pela Equação 11. Chega-se assim a Equação 14, como segue:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \dot{q}''' \quad (14)$$

Com o intuito de verificar a aplicabilidade da Equação 14, o número de Biot (Bi) pode ser determinado. Esse número é um índice adimensional calculado através da razão entre a transferência de calor por condução e a transferência de calor por convecção. Essa razão determina se há ou não variação significativa de calor dentro do corpo. O número de Biot é definido pela Equação 15:

$$Bi = \frac{h L_c}{k} \quad (15)$$

em que L_c representa o comprimento característico do corpo, que é definido pela razão entre o volume do corpo e a área de superfície. h representa o coeficiente médio de transferência de calor por convecção e k representa a condutividade térmica do material.

Para valores de Biot menores que 0,1, implica dizer que a condução de calor dentro do corpo é desprezível em relação a convecção de calor na superfície do mesmo, portanto, gradientes internos de temperatura podem ser desprezados. Nesses casos, a análise unidimensional leva a valores de erro menores que 10% (INCROPERA & DeWITT, 1992) e a equação que rege o balanço de calor pode ser simplificada para:

$$-\frac{\partial \rho_{\text{mag}}}{\partial t} = \frac{\partial \rho_{\text{mag}}}{\partial t} - \rho_{\text{mag}} - \rho_{\text{mag}} \dots \quad \dots(16)$$

em que V é o volume do corpo e A representa a área de superfície.

A energia gerada por unidade de volume descrita na Equação 16 é definida pela Equação 17:

$$\rho_{\text{mag}} = \rho_{\text{mag}} \frac{\partial \rho_{\text{mag}}}{\partial t} + \frac{\partial \rho_{\text{mag}}}{\partial t} \quad (17)$$

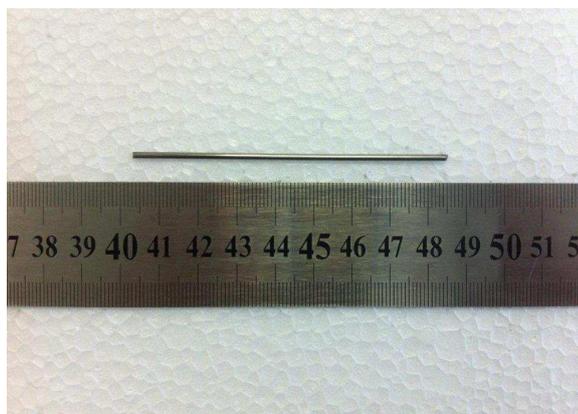
em que o primeiro termo do lado direito da Equação 17 está relacionado a fração martensítica, e assumindo um calor latente de transformação constante (L_m). O segundo termo é relacionado a energia interna. Em um ciclo tensão-deformação, a energia interna dissipada corresponde a área total gerada pelo laço histerético. Nesse contexto, a potência térmica gerada pelo ciclo corresponde a essa energia dividida pelo tempo de duração do ciclo.

4. Materiais e Métodos

4.1. Fios Superelásticos de LMF NiTi

Para a realização dos testes experimentais desta pesquisa foram utilizados fios superelásticos de NiTi de 1,8 mm de diâmetro. A partir desses fios foram retiradas amostras de aproximadamente 80 mm de comprimento para serem utilizadas como corpos de prova para a realização dos ensaios. A Figura 35 mostra uma imagem do corpo de prova utilizado durante os testes.

Figura 35: Fotografia do corpo de prova de fios de LMF NiTi utilizado durante os testes.



Fonte: Autoria própria.

Os fios NiTi são fabricados pela Fort Wayne Metals (USA) e fornecidos no Brasil pela empresa Sandinox. Estes fios seguem os requisitos da norma ASTM F2063 que trata dos padrões de qualidade para LMF de NiTi utilizadas em dispositivos médicos e implantes cirúrgicos. Segundo o fabricante, o fio apresenta uma composição de 55,9%Ni e 44,1%Ti em massa, com as propriedades mecânicas descritas pela Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades mecânicas do fio NiTi utilizado no trabalho.

Propriedades Mecânicas do Fio Superelástico	
Alongamento	19,4%
Tensão de Escoamento	508 MPa
Resistência a Tração	1408 MPa
Dureza	44 HRC

Fonte: Certificado de origem Sandinox N° 249361.

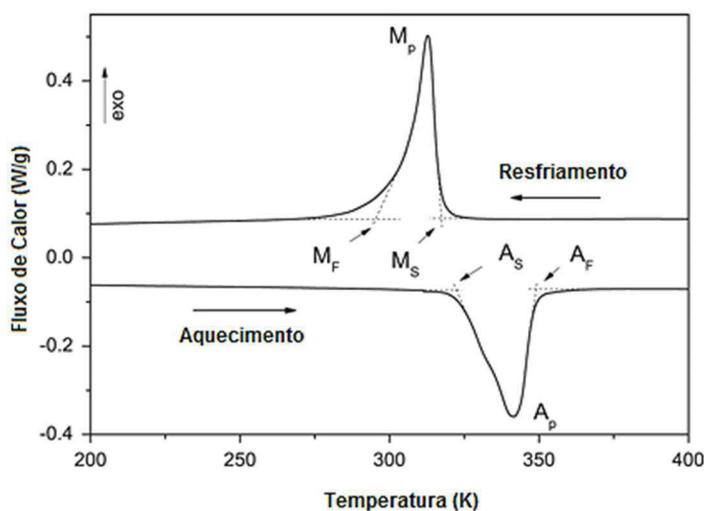
4.2 Caracterização Termomecânica Preliminar

4.2.1 Análise Térmica via DSC

Para determinar as características termomecânicas do fio NiTi, primeiramente foi realizado um ensaio de calorimetria diferencial de varredura (DSC). Este ensaio consiste em submeter uma amostra do material e uma amostra de referência, inerte, a uma variação de temperatura simultânea. A quantidade de calor necessária para

aumentar a temperatura da amostra de ensaio e da amostra de referência é medida em função da temperatura. O gráfico obtido através de um ensaio DSC é apresentado na Figura 36.

Figura 36: Gráfico do fluxo de calor em função da temperatura obtido através de um ensaio DSC.



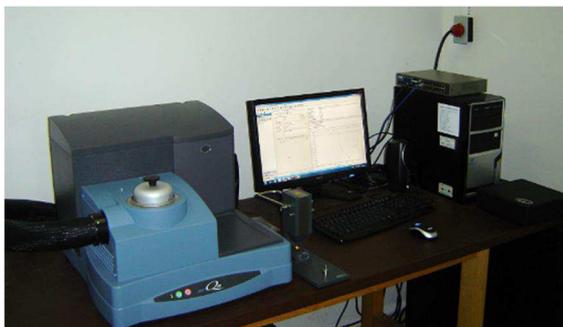
Fonte: Autoria própria.

Na Figura 36 é possível observar a formação de dois picos, um durante o resfriamento e outro durante o aquecimento. O primeiro corresponde a uma transformação exotérmica, característica da transformação martensítica direta. A partir deste, determina-se as temperaturas inicial e final da transformação direta, da austenita em martensita (M_S e M_F), assim como a temperatura de pico da transformação M_P . O segundo pico corresponde a uma transformação endotérmica, característica da transformação reversa e a partir do qual, de forma análoga, é possível obter as temperaturas inicial e final de transformação da martensita em austenita (A_S e A_F) bem como a temperatura de pico da transformação A_P . A partir da diferença das temperaturas de pico M_P e A_P pode-se determinar a histerese térmica da transformação de fase. Além dessas temperaturas características, é possível obter as entalpias de transformação de fase direta e reversa, calculando-se a área gerada pelos picos exotérmico e endotérmico, respectivamente.

Nesse contexto, foram realizados ensaios de DSC no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG. O ensaio foi realizado variando a temperatura da amostra entre -70°C e $+140^{\circ}\text{C}$ a uma taxa de

5°C/min. Para isso, utilizou-se um equipamento DSC da marca TA instruments modelo Q20 apresentado pela Figura 37.

Figura 37: Equipamento DSC modelo Q20 da TA Instruments.



Fonte: Autoria própria.

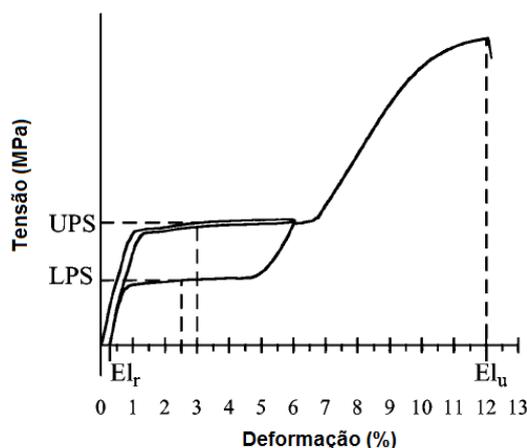
4.2.2. Ensaio de Tração a Temperatura Ambiente

Para a caracterização mecânica dos fios de NiTi foram realizados ensaios de tração a temperatura ambiente. Esse ensaio tem por objetivo caracterizar o material no que diz respeito aos níveis de tensão, deformação e patamar de transformação de fase induzida por tensão. Os ensaios foram realizados com base na norma ASTM F2516-07e2, que trata da padronização de ensaios de tração em LMF superelásticas de NiTi.

Segundo essa norma, a caracterização consiste em submeter o corpo de prova a um ciclo de 6 % de deformação com posterior retorno superelástico por descarregamento. Em seguida o corpo de prova é tracionado até a ruptura. A partir da curva tensão - deformação resultante desse ensaio é possível obter as seguintes propriedades: a tensão do patamar superior (UPS - *Upper Plateau Strength*), a tensão do patamar inferior (LPS - *Lower Plateau Strength*), o alongamento residual (EI_r - *residual elongation*) e o alongamento total (EI_u - *ultimate elongation*). Com os valores obtidos das tensões dos patamares superior e inferior, pode-se calcular a histerese de tensão do material.

A Figura 38 apresenta um gráfico tensão-deformação tipicamente resultante deste ensaio, assim como as propriedades mencionadas anteriormente.

Figura 38: Gráfico obtido de um ensaio de tração para ligas NiTi superelásticas seguindo a norma ASTM F2516-07e2.



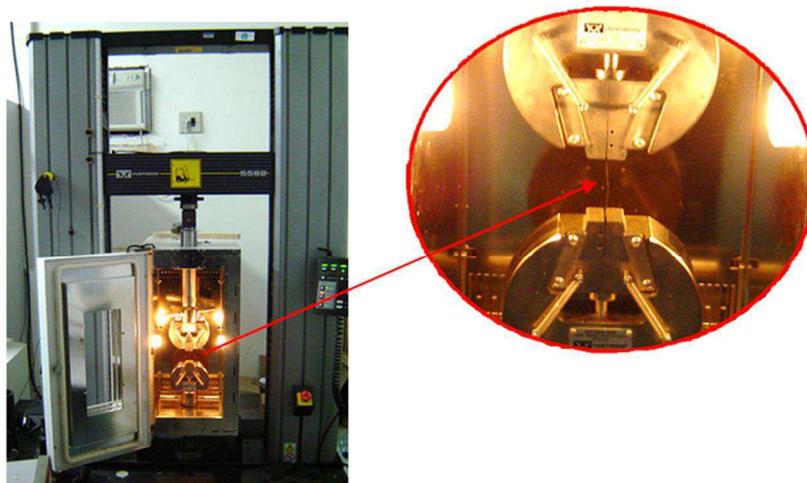
Fonte: Norma ASTM F2516-07e2.

Nesse contexto, foram realizados ensaios de tração uniaxial utilizando-se uma máquina de ensaios universal da marca Instron, modelo 5582, equipada com uma célula de carga de 100 kN. Os ensaios foram realizados utilizando uma taxa de deformação de $0,02 \text{ min}^{-1}$ durante o ciclo de 6 % de deformação e a uma taxa de $0,2 \text{ min}^{-1}$ no carregamento até a ruptura.

4.2.3. Comportamento Superelástico em Função da Temperatura

Foram realizados ensaios cíclicos de tração uniaxial a diferentes temperaturas. Para isso, foi utilizada a mesma máquina de ensaios universal mencionada anteriormente, desta vez equipada com uma câmara térmica para controle de temperatura. Os ensaios foram realizados a 15 diferentes temperaturas de ensaios, variando a cada 5°C , partindo de 30 até 100°C . Os ensaios foram realizados sob controle de deformação e utilizando os parâmetros de ensaios estabelecidos pela norma ASTM F2516-07e2 (apenas o ciclo superelástico até 6 % foi realizado). A partir desses resultados, foi possível observar a evolução do comportamento mecânico em função da temperatura bem como a obtenção dos coeficientes C^A e C^M que são de fundamental importância na caracterização térmica dessas LMF. A Figura 39 apresenta a montagem experimental utilizada para a realização dos ensaios.

Figura 39: Máquina de ensaios universal marca Instron modelo 5582. Detalhe mostrando corpo de prova montado dentro da câmara térmica.



Fonte: Autoria própria.

Podemos ver na Figura 39 a máquina de ensaios universal equipada com uma câmara térmica utilizada para a realização dos ensaios a diferentes temperaturas. Observa-se no detalhe, a montagem do corpo de prova utilizado.

4.3. Estabilização Cíclica em Regime Superelástico

Os corpos de prova de fios LMF NiTi utilizados nos ensaios dinâmicos foram submetidos a uma pré-ciclagem a fim de estabilizar seu comportamento termomecânico de superelasticidade. Foram realizados um total de 400 ciclos superelásticos sob controle de carregamento a uma taxa de 0,1 Hz e uma carga máxima de 1400 N, que corresponde a cerca de 550 MPa para os fios estudados. Esses parâmetros foram utilizados de forma que a taxa de ciclagem durante a estabilização fosse baixa o suficiente para não provocar o acúmulo de calor no corpo de prova, ao mesmo tempo em que a carga utilizada promovesse a total transformação de fase do material. Tais parâmetros foram selecionados com base nos resultados obtidos após a caracterização mecânica realizada preliminarmente (ensaio monotônico a temperatura ambiente).

Os ensaios cíclicos foram realizados em uma máquina de ensaios dinâmicos da marca MTS, modelo MTS 793 series, equipada com uma célula de carga de 100 kN. A Figura 38 mostra o equipamento utilizado.

Figura 40: Máquina de ensaios dinâmicos da marca MTS modelo MTS 793 series.



Fonte: Autoria própria.

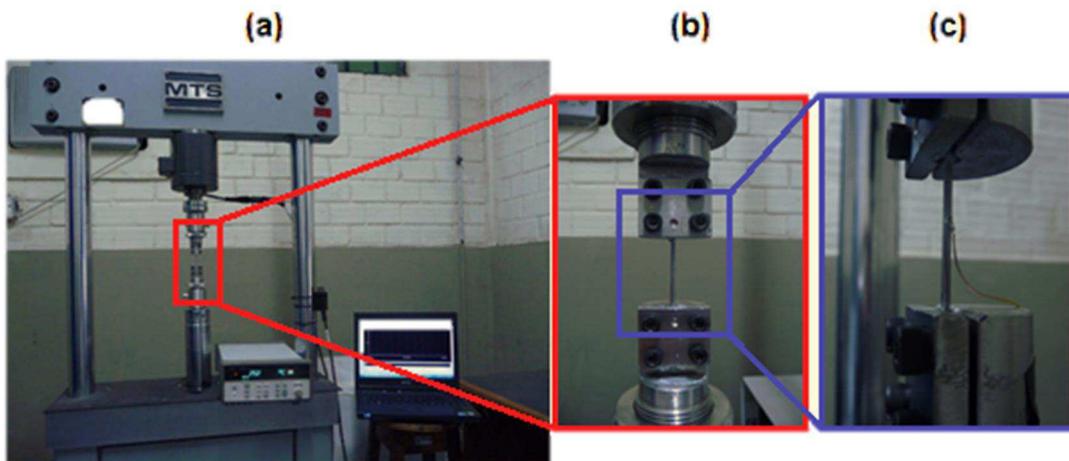
4.4. Definição de Parâmetros para Análise da Resposta Dinâmica do Material

Para a investigação do comportamento térmico e dinâmico do fio superelástico de LMF NiTi, as frequências de ensaio utilizadas foram baseadas em um estudo realizado anteriormente (RAMOS DE OLIVEIRA, 2012). Nesse estudo foram analisadas as seguintes frequências de aplicação de carga para um fio de 0,5 mm: 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 5 Hz, 10 Hz, 15 Hz, 20 Hz e 25 Hz. Os resultados apontaram que para frequências de ensaio de até 3 Hz a geração de calor durante a fase exotérmica do ciclo não influenciava no aumento da temperatura do corpo de prova e acima desse valor o comportamento dinâmico-mecânico era fortemente influenciado pelo aumento da temperatura do material.

Com base nesses resultados, o presente trabalho utilizou as seguintes frequências de ensaio: 0,1 Hz, 0,2 Hz, 0,3 Hz, 0,4 Hz, 0,5, 0,6 Hz, 0,7 Hz, 0,8 Hz, 0,9 Hz, 1 Hz, 2 Hz, 3 Hz, 4 Hz, 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz, 9 Hz e 10 Hz. Para todas as frequências foram realizados 130 ciclos a uma deformação máxima de 6 %. Para a realização destes, foi utilizada a máquina de ensaios dinâmicos da modelo MTS 793 series, equipada com uma célula de carga de 100 kN, apresentada pela Figura 40. Todos os ensaios foram realizados a temperatura ambiente, de aproximadamente 27°C.

Ainda durante os ensaios dinâmicos foram realizadas medições de temperatura em tempo real usando um micro termopar tipo K (80 μm de diâmetro) acoplado ao fio NiTi. A aquisição dos dados de temperatura foi realizada com um sistema de aquisição de dados da Agilent, modelo 34970A. A montagem experimental utilizada durante esses ensaios pode ser observada na imagem da Figura 41.

Figura 41: Montagem experimental. (a) Visão geral. (b) Fio NiTi nas garras da máquina MTS. (c) Micro termopar acoplado ao fio NiTi.



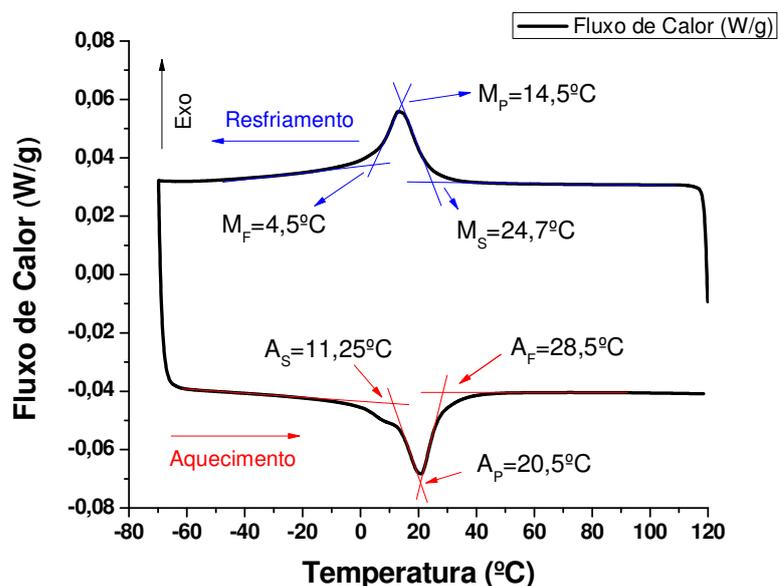
Fonte: Autoria própria.

5. Resultados e Discussões

5.1. Análise Térmica via DSC.

Com o objetivo de assegurar-se das propriedades informadas pelo fabricante, foi realizada uma caracterização térmica via DSC a fim de determinar as temperaturas de transformação de fase do fio superelástico de LMF NiTi. A partir da curva obtida deste ensaio, mostrada na Figura 42, foi possível determinar as temperaturas críticas de transformação de fase, M_S , M_F , A_S e A_F , assim como as temperaturas de pico da transformação, M_P e A_P .

Figura 42: Análise térmica DSC do fio NiTi.



Fonte: Autoria Própria.

As temperaturas críticas de transformação de fase obtidas a partir da curva de fluxo de calor em função da temperatura apresentada na Figura 42 são apresentadas na Tabela 4. As entalpias da transformação direta e reversa foram, respectivamente, 4,7 J/g e 4,8 J/g.

Tabela 4: Temperaturas críticas de transformação de fase da liga utilizada.

	M _F	M _S	A _S	A _F	M _P	A _P
Temperatura (°C)	4,5	24,7	11,2	28,5	14,5	20,5

Fonte: Autoria Própria.

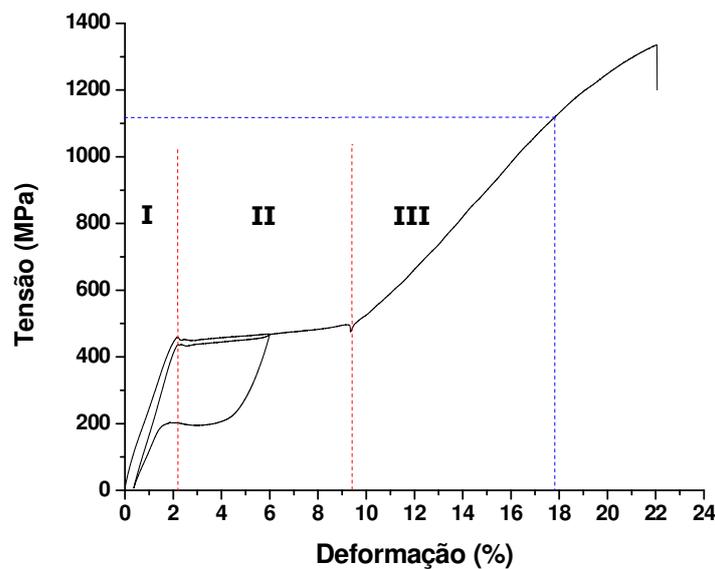
De acordo com esses resultados, verifica-se que o fio de LMF NiTi apresenta superelasticidade completa a partir de 28,5°C. Essa temperatura é muito próxima da temperatura em que os ensaios dinâmicos foram realizados. Observa-se também que a histerese térmica do fio NiTi, calculada como a diferença entre as temperaturas de pico A_P e M_P, é de apenas 6°C. Esses valores reduzidos de histerese em temperatura e entalpias de transformação, indicam que a transformação de fase induzida pela temperatura no fio NiTi envolve a formação da martensita conhecida por fase R, e não a martensita monoclinica B19', para a qual os valores de histerese e entalpias são

muito mais altos (OTSUKA E WAYMAN, 1998). Este fato é comprovado no trabalho de Grassi (2014).

5.2. Caracterização Superelástica a Temperatura Ambiente

Para efeito de caracterização mecânica, o fio de NiTi foi submetido a um ensaio quase estático tomando como base as diretrizes de ensaio apresentadas pela norma ASTM F2516-07e2. Nesse contexto, a Figura 43 apresenta a curva tensão deformação obtida a partir desse ensaio.

Figura 43: Curva Tensão-Deformação para o teste quase estático seguindo a norma ASTM F2516-07e2.



Fonte: Autoria Própria.

A curva apresentada na Figura 43 apresenta três regiões distintas correspondentes a diferentes estágios do material até a ruptura:

- Na região I: o material apresenta uma deformação linear elástica ainda no estado austenítico (aproximadamente 2%). Nesse estágio, ao cessar o carregamento, o material retornará ao ponto de tensão zero seguindo uma trajetória também linear.

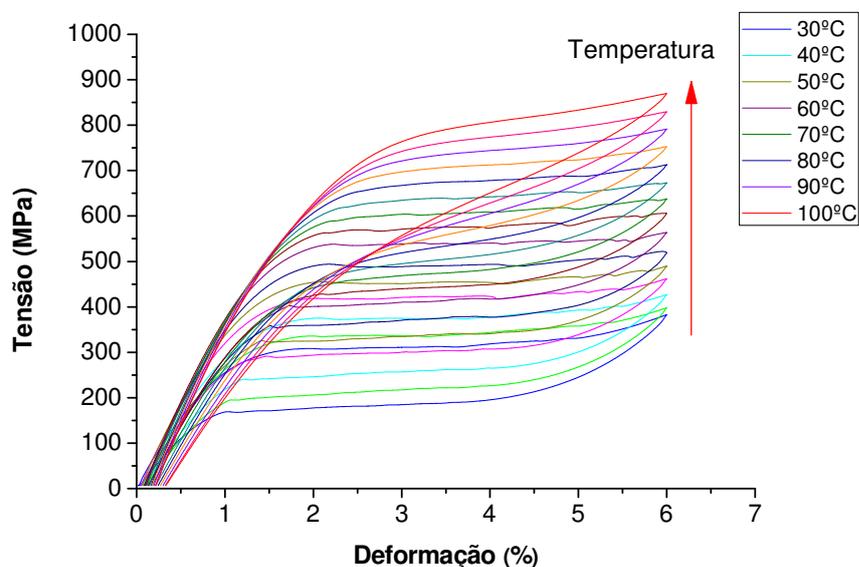
- Na região II: nota-se o início da transformação de fase do material. O patamar que caracteriza esse fenômeno tem início em aproximadamente 450 MPa estendendo-se até 500 MPa com quase 10% de deformação. É possível perceber que para uma deformação de aproximadamente 8% houve uma variação de apenas 50 MPa no carregamento aplicado, enquanto que na região I observa-se uma grande variação de tensão para um baixo nível de deformação. Essa é uma das características que dão a essas LMF vantagens sobre os materiais clássicos como o aço em aplicações do tipo ortodônticas onde se necessita de grandes deslocamentos dentários com um carregamento aproximadamente constante (FERCEC ET AL., 2014);
- Na região III: o material apresentando uma microestrutura completamente martensítica induzida por tensão inicia sua deformação linear elástica. O comportamento elástico nessa fase estende-se até aproximadamente 1100 MPa com quase 18% de deformação seguido de deformação plástica até a ruptura.

Nesse contexto, constata-se que o material apresentou uma deformação total recuperável situada entre 10 e 18%, diferentemente das ligas metálicas clássicas que apresentam uma deformação elástica de apenas 0,2%.

5.3. Comportamento Superelástico a Diferentes Temperaturas

Durante a caracterização termomecânica superelástica, foram realizados ensaios a diferentes temperaturas. Esses ensaios foram realizados com o objetivo de mapear o comportamento mecânico superelástico do fio de LMF NiTi a temperaturas variando entre 30°C e 100°C. A partir desses resultados pode-se observar qualitativamente sua evolução, assim como quantificar esse comportamento através da determinação dos coeficientes C^A e C^M , que representam o aumento das tensões críticas de transformação de fase em função da temperatura. A Figura 44 apresenta os gráficos tensão-deformação obtidos para diferentes temperaturas de ensaio.

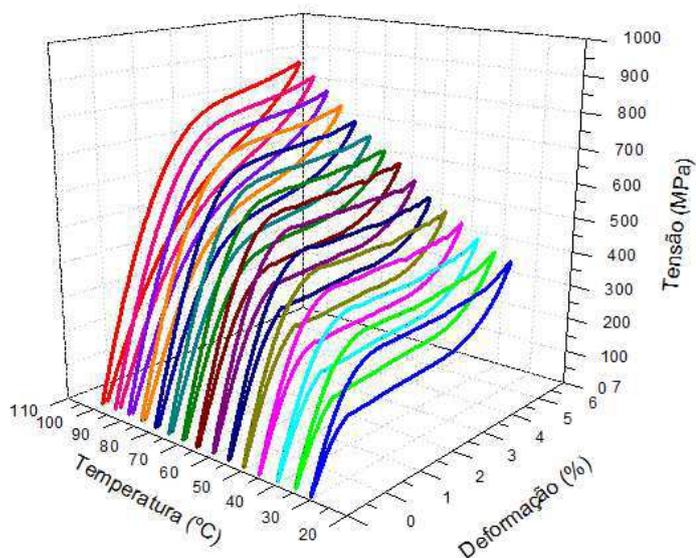
Figura 44: Curvas tensão-deformação do fio de LMF NiTi a várias temperaturas.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 44 apresenta o comportamento termomecânico do fio superelástico de NiTi quando submetida ao mesmo tipo de ensaio mecânico sob diferentes temperaturas. Mesmo apresentando uma estrutura cristalina 100% austenítica (estrutura presente em altas temperaturas), o material ainda apresenta uma forte dependência térmica na sua resposta superelástica. É possível perceber que a tensão necessária para gerar 6 % de deformação sobe de cerca de 350 MPa a uma temperatura de 30°C, para aproximadamente 850 MPa quando o material se encontra a 100°C. Esse fenômeno ocorre devido ao fato da estrutura austenítica encontrar-se estável a altas temperaturas e para induzir a transformação martensítica é necessário a aplicação de energia mecânica ao sistema. Dessa forma, quanto maior o nível de energia térmica do material (temperatura), maior será a energia mecânica (tensão aplicada) necessária para induzir essa transformação. Este comportamento está na origem de uma lei de Clausius-Clapeyron, específica para LMF (OTSUKA E WAYMAN, 1998). A Figura 45 apresenta a mesma resposta termomecânica da Figura 44, porém sob uma perspectiva tridimensional.

Figura 45: Curvas tensão-deformação dos fios superelásticos de NiTi para diferentes temperaturas.

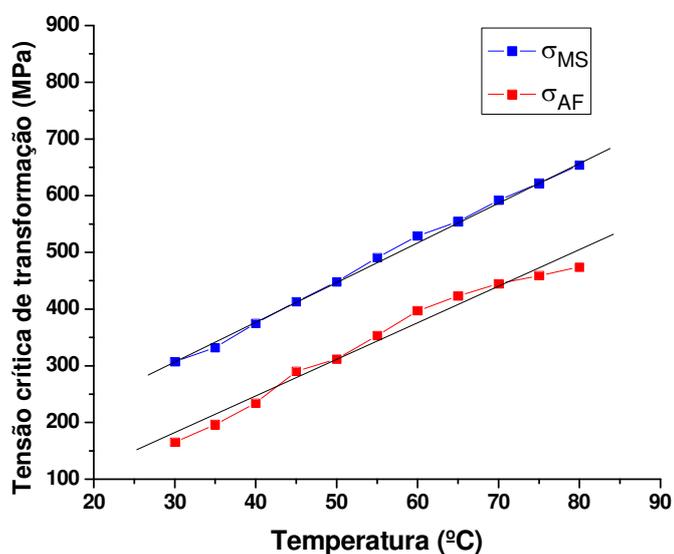


Fonte: Autoria Própria.

A partir das curvas mostradas nas Figuras 44 e 45, foi possível determinar os coeficientes C^A e C^M para o fio NiTi estudado. O coeficiente C^A foi obtido usando as tensões críticas finais de transformação reversa durante o descarregamento (σ_{AF}) enquanto que o coeficiente C^M foi obtido usando as tensões críticas de início da transformação direta durante o carregamento (σ_{MS}). A Figura 44 apresenta as curvas de tensão crítica de transformação de fase em função da temperatura para usadas para a determinação de ambos coeficientes.

A partir das curvas mostradas na Figura 44 foi possível determinar os coeficientes C^A e C^M do fio NiTi. Nesse contexto, os valores obtidos foram: $C^A = 6,5$ MPa/°C e $C^M = 7,1$ MPa/°C.

Figura 46: Curvas de tensão crítica de transformação em função da temperatura de ensaio para o fio de LMF NiTi.

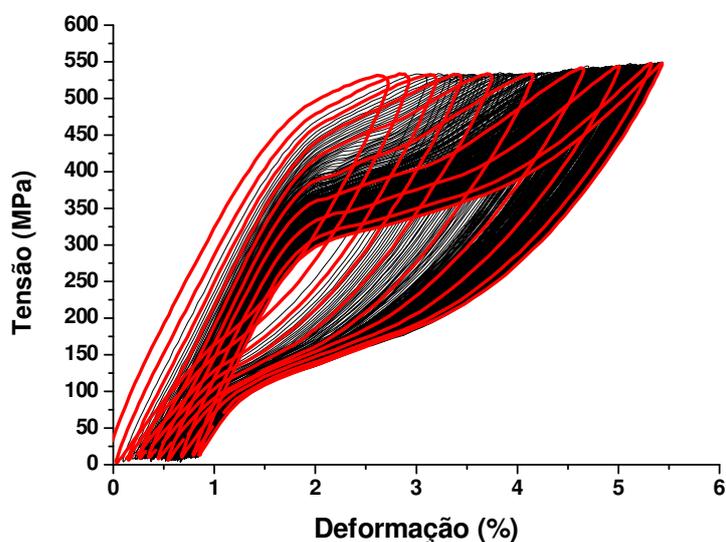


Fonte: Autoria Própria.

5.4. Estabilização Cíclica do Regime Superelástico

Mesmo para LMF superelásticas de NiTi, ciclos de carregamento e descarregamento podem levar ao acúmulo de alguma deformação residual. Tais deformações podem ocorrer devido a defeitos que surgem na estrutura cristalina após a ciclagem do material. Ao submeter essas LMF a vários ciclos mecânicos, esses defeitos tendem a saturar e proporcionam uma estabilização na resposta mecânica superelástica. Nesse contexto, os corpos de prova utilizados durante os testes foram submetidos a ciclos de carregamento mecânico a fim de atingir esse estágio. A Figura 47 apresenta as curvas tensão-deformação resultante do ensaio cíclico de estabilização.

Figura 47: Evolução da curva tensão-deformação do fio de NiTi submetido a vários ciclos de deformação.



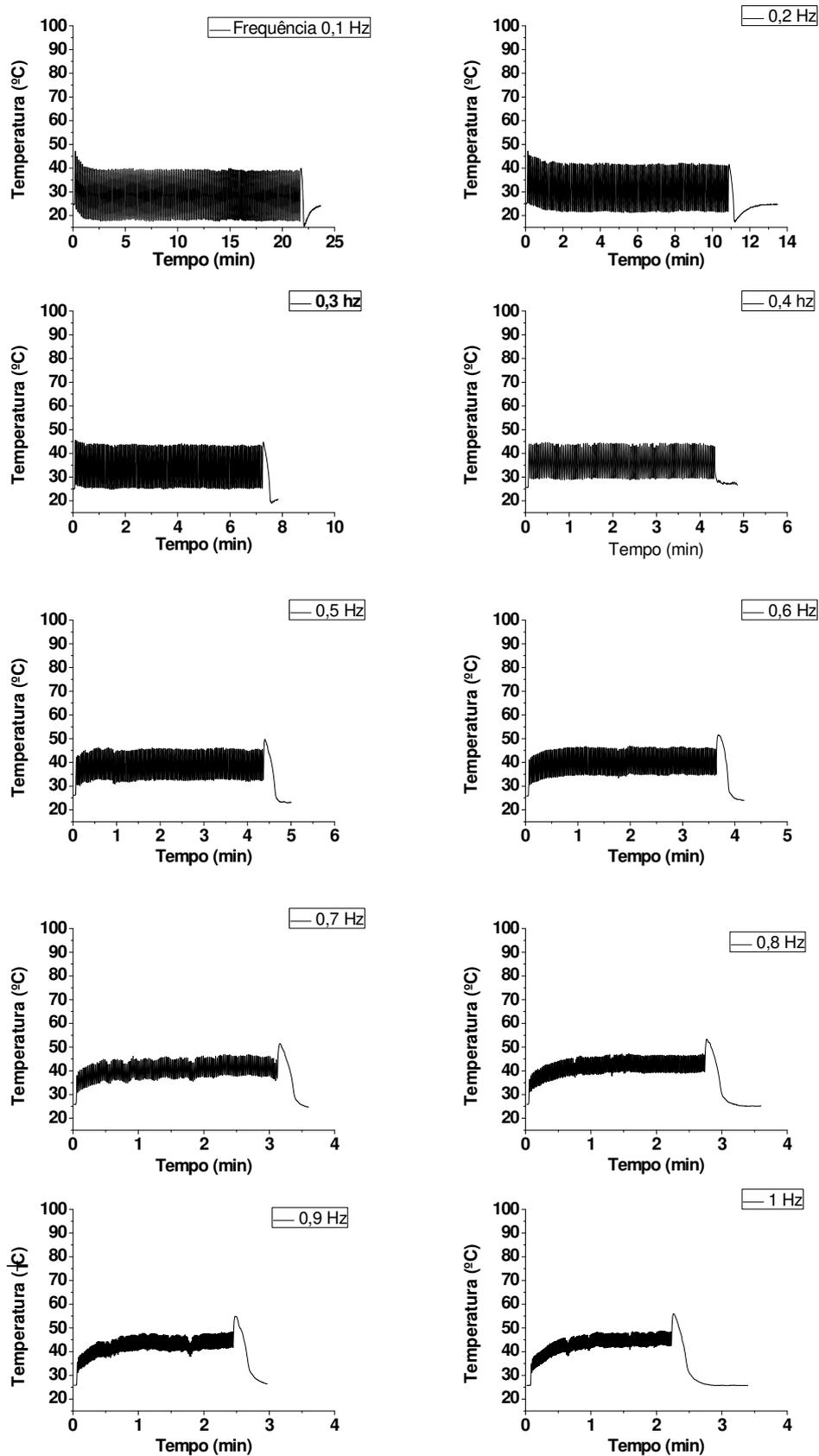
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 47 apresenta a evolução do comportamento superelástico do fio de NiTi com o a ciclagem mecânica. As curvas coloridas em vermelho correspondem aos ciclos seguindo uma função 2^n para dar maior destaque a evolução do comportamento. Observa-se que para os primeiros ciclos, o patamar superelástico característico desse material ainda não se apresenta. A partir do 32º ciclo, aproximadamente, esse patamar começa a aparecer e tem seu desenvolvimento mais definido nos ciclos subsequentes. Nota-se ainda, que nos últimos ciclos, o comportamento superelástico se apresenta bastante estável.

5.5. Comportamento Térmico

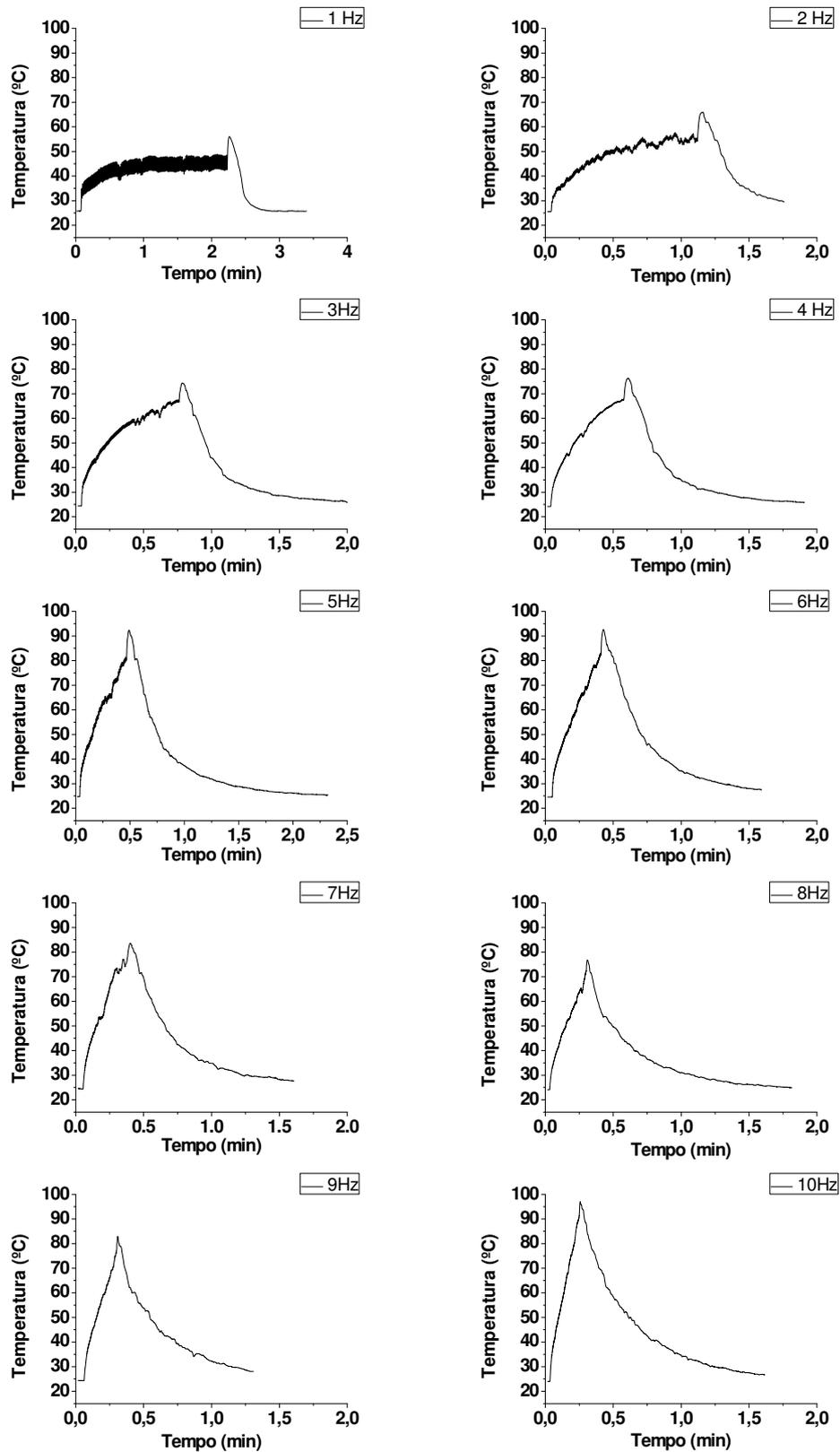
Após a estabilização cíclica, foram realizados ensaios dinâmico-mecânicos nos fios de NiTi a diferentes frequências. Os fios foram submetidos a frequências variando de 0,1 a 10 Hz. As Figuras 48 e 49 apresentam o comportamento térmico do fio NiTi quando submetidos a esses carregamentos cíclicos, com a montagem da Figura 41.

Figura 48: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 49: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 1 Hz e 10 Hz.

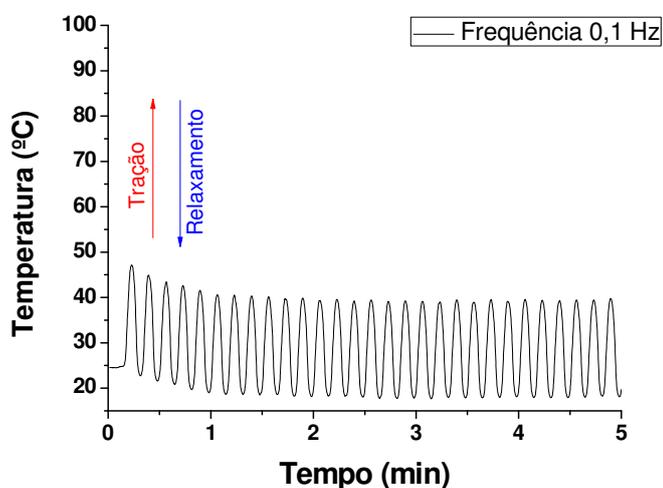


Fonte: Autoria Própria.

A transformação de fase direta, de austenita para martensita, é um fenômeno exotérmico, portanto há uma liberação de calor latente durante a transformação, enquanto que a transformação de fase reversa consome calor latente, sendo endotérmica. Segundo Lagoudas (2008), para serem considerados como ensaios isotérmicos a qualquer temperatura, não se deve exceder uma taxa de deformação de 0,01~0,05 %/s quando se trabalha com LMF superelásticas. Do contrário, as altas taxas de deformação provocam um aumento na temperatura do material porque não há tempo suficiente para que ocorra a dissipação da energia térmica gerada pela transformação de fase direta (exotérmica) e este calor acumula-se, gerando aumento de temperatura e, conseqüentemente, aumento a rigidez da LMF.

Os comportamentos apresentados nas Figuras 46 e 47 mostram a evolução da temperatura do fio de NiTi durante os ensaios de tração realizados para diferentes frequências de carregamento cíclico. A Figura 48 apresenta em detalhe a resposta térmica do fio quando submetido a frequência mais baixa, de 0,1 Hz. Nessa figura é possível observar que a variação de temperatura (pico a pico) ratifica o caráter exotérmico e endotérmico das transformações de fase devido ao carregamento e descarregamento do material. Observa-se que o fio NiTi apresenta um aquecimento seguido de um resfriamento abaixo da temperatura inicial do ensaio (cerca de 25°C), demonstrando o comportamento térmico da transformação.

Figura 50: Temperatura do fio NiTi para uma frequência de ensaio de 0,1Hz.

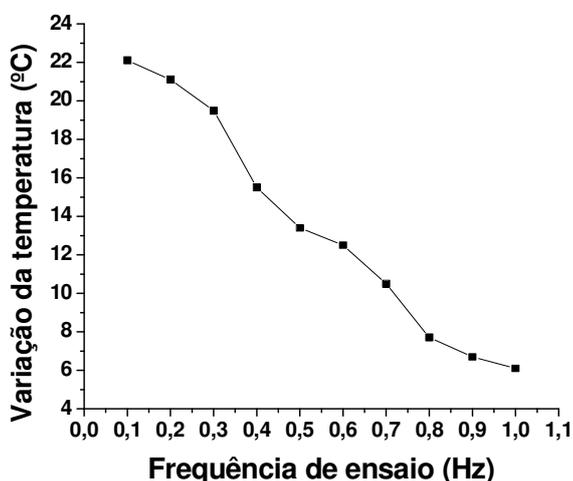


Fonte: Autoria Própria.

Observando os gráficos apresentados na Figura 48, nota-se que o comportamento cíclico da resposta térmica apresentado pelo fio NiTi se apresenta bastante pronunciado até a frequência de 1 Hz. Pode-se perceber ainda que, para as frequências de 0,1 Hz e 0,2 Hz, houve uma leve diminuição na temperatura média do fio, estabilizando-se logo nos primeiros ciclos. Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura 50.

Ainda na Figura 48, verifica-se que para as frequências de 0,5 Hz a 1 Hz a temperatura aumenta consideravelmente já nos primeiros ciclos, atingindo cerca de 40°C. Esse aumento ocorre de forma gradativa até atingir um regime permanente durante todo o ensaio. É possível observar também que com o aumento da frequência, a diferença entre a temperatura máxima e mínima atingida pelo fio NiTi tende a diminuir. Isto ocorre devido a diminuição do tempo entre os ciclos de geração de calor (exotérmico) e absorção de calor (endotérmicos). A Figura 51 descreve graficamente esse comportamento.

Figura 51: Variação da temperatura durante a ciclagem mecânica entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz.

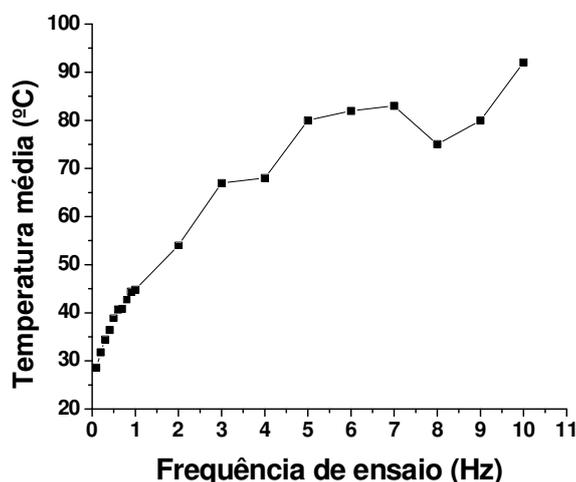


Fonte: Autoria Própria.

Observando as curvas apresentadas na Figura 49, nota-se que a temperatura do corpo de prova quando submetido a frequências de ensaio acima de 2 Hz, começa a apresentar um comportamento diferente em relação as frequências menores (0,1 Hz a 1 Hz). Observa-se que para os níveis de frequência compreendidos entre 2 Hz e 10 Hz, a tendência de estabilização da temperatura não ocorre mais como

anteriormente. Nesse intervalo, as temperaturas atingem valores bastante elevados influenciando diretamente no comportamento mecânico do material, como será mostrado no tópico subsequente. O elevado aumento na temperatura do fio NiTi se deve ainda aos comportamentos exotérmicos e endotérmicos das transformações de fase direta e reversa, respectivamente. Nesse contexto, as frequências atingidas são elevadas demais para permitir que o calor gerado durante esses ciclos seja dissipado. A Figura 52 apresenta o aumento médio de temperatura dos fios NiTi submetidos as frequências de ensaio variando entre 0,1 Hz e 10 Hz.

Figura 52: Temperatura média do fio NiTi em função da frequência de ensaio.

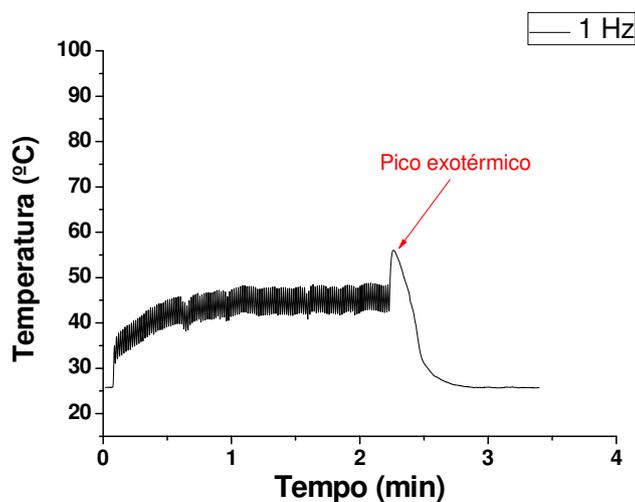


Fonte: Autoria Própria.

Qualitativamente, observa-se na Figura 52 que o aumento médio da temperatura ocorre de forma bastante pronunciada com o aumento da frequência, principalmente entre 0 e 3 Hz. Os níveis de temperatura chegam a atingir cerca de 95 °C para a maior frequência de ensaio (10 Hz). Com base nos valores de temperaturas de transformação resumidos na Tabela 4, essa temperatura é 67°C superior a temperatura A_f do fio NiTi, influenciando diretamente a resposta mecânica do material.

Ao observar os gráficos de temperatura-tempo apresentados nas Figuras 48 e 49, verifica-se que a partir dos ensaios realizados a 0,5 Hz, no final de cada curva de temperatura-tempo, ocorre o surgimento de um pico de temperatura. A Figura 53 apresenta com maior destaque esse fenômeno.

Figura 53: Temperatura do fio NiTi durante a ciclagem mecânica para uma frequência de 1 Hz.



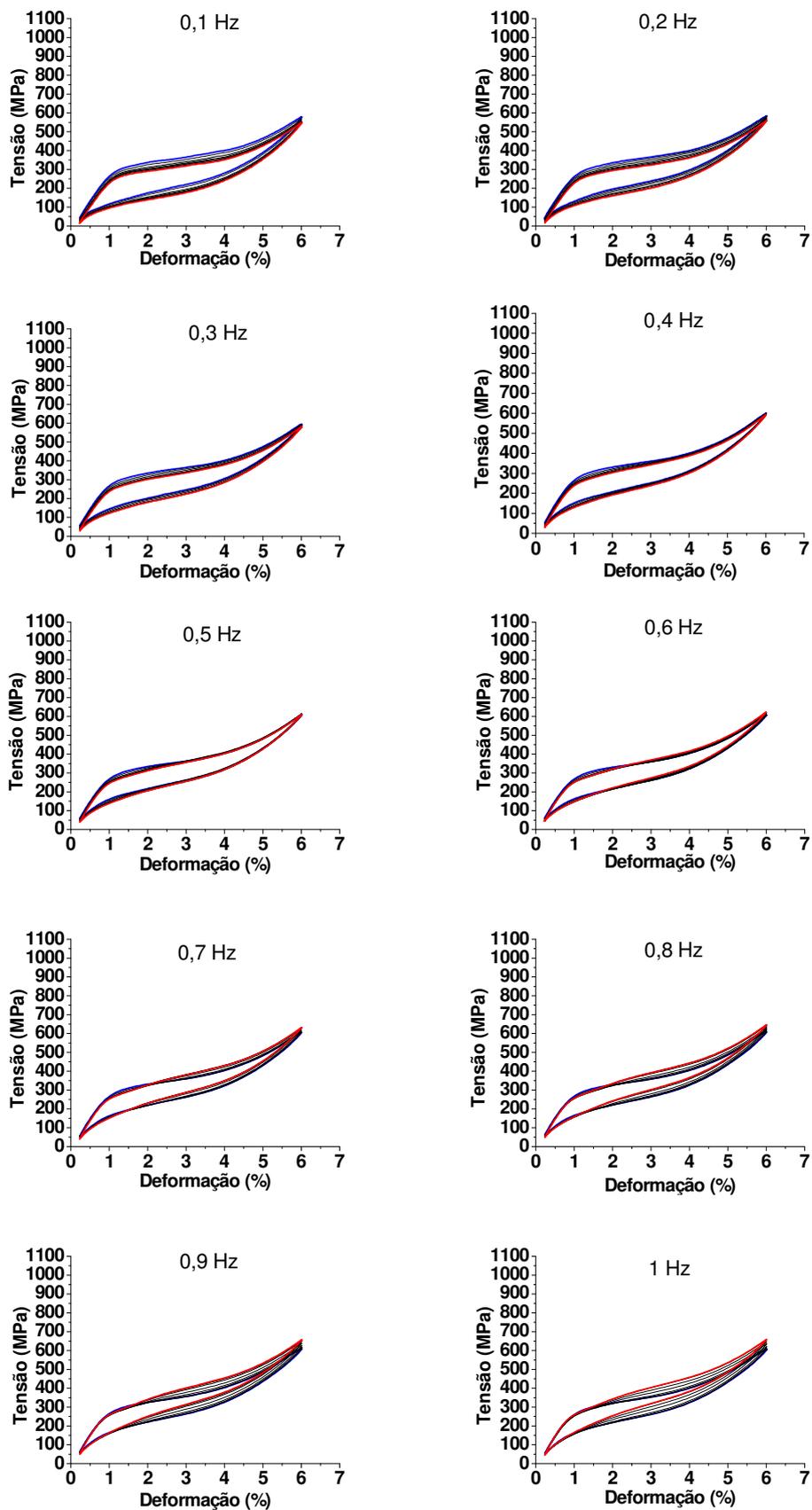
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 53 apresenta com mais clareza o pico exotérmico presente no final da curva temperatura-tempo para a frequência de ensaio de 1 Hz. Esse fenômeno ocorre devido ao último ciclo realizado após a ciclagem mecânica do material. Nesse estágio, o fio NiTi finaliza sua ciclagem com uma tração, o que impõe uma transformação de fase direta no material, que por sua vez, tem caráter exotérmico. Nesse contexto, o aumento de temperatura ocorre sem ser seguido de uma transformação reversa, o que tenderia a baixar a temperatura do mesmo devido a sua característica endotérmica. Dessa forma, verifica-se que a transformação de fase reversa com sua parcela endotérmica é de fundamental importância na evolução do comportamento térmico do material.

5.6. Comportamento Dinâmico-Mecânico

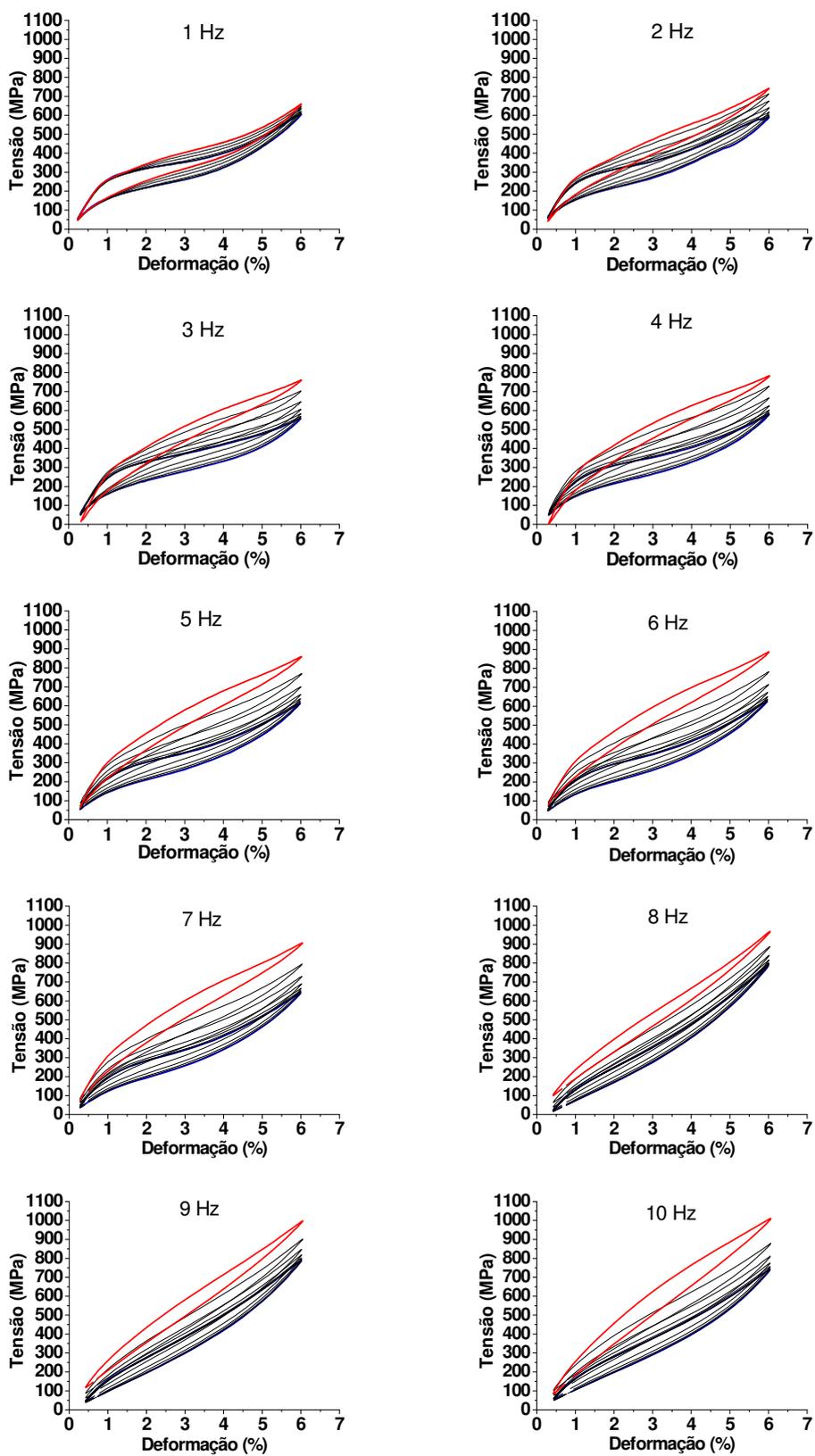
As Figuras 54 e 55 apresentam a resposta superelástica do comportamento dinâmico mecânico do fio de NiTi submetido a carregamentos cíclicos axiais a temperatura ambiente. Com o intuito de otimizar o estudo da evolução do comportamento dinâmico e reduzir a quantidade de dados analisados, foram traçados gráficos tensão-deformação com os ciclos seguindo uma função exponencial de 2^n . Dessa forma, os gráficos apresentados nas Figuras 54 e 55 mostram os ciclos: 1º, 2º, 4º, 8º, 16º, 32º, 64º e 128º. A curva em azul indica o primeiro ciclo e a curva em vermelho indica o 128º ciclo. Na sequência, os resultados analisados foram seguindo esse mesmo critério.

Figura 54: Resposta superelástica do fio de NiTi testado à temperatura ambiente sob carregamento cíclico entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz.



Fonte: Autoria Própria.

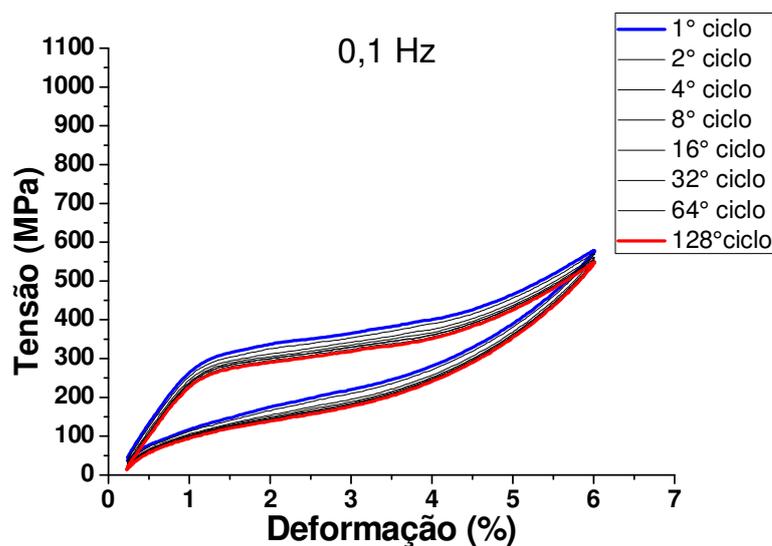
Figura 55: Resposta superelástica do fio de NiTi testado à temperatura ambiente sob carregamento cíclico entre as frequências de 1 Hz e 10 Hz.



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 54 apresenta as curvas referentes as frequências compreendidas entre 0,1 Hz e 1 Hz. Desse conjunto de resultados observa-se que, para as frequências de 0,1 Hz a 0,5 Hz, a curva tensão-deformação apresenta uma ligeira redução nos níveis de tensão entre o primeiro e o último ciclo. Esse comportamento está em acordo com o efeito térmico apresentado na Figura 48, onde nota-se que o fio NiTi sofre uma leve diminuição na temperatura devido ao efeito endotérmico da transformação de fase reversa. A Figura 56 apresenta de forma detalhada a curva tensão-deformação para o fio NiTi quando submetido a um carregamento cíclico a 0,1 Hz.

Figura 56: Curva tensão-deformação do fio NiTi a 0,1 Hz.

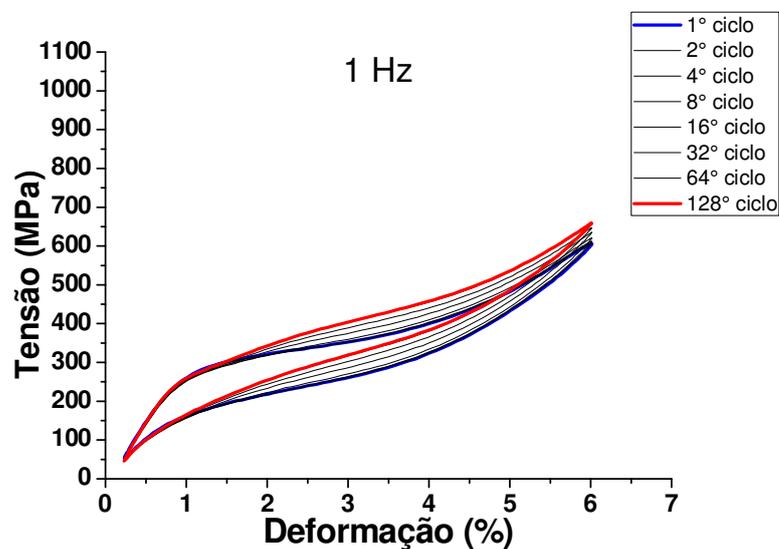


Fonte: Autoria Própria.

Ainda observando a Figura 54, constata-se que o comportamento apresentado na Figura 56 se repete até frequências de ensaio da ordem de 0,5 Hz. A partir dessa frequência de ensaio, a evolução do comportamento mecânico passa a ocorrer de forma inversa ao apresentado anteriormente. Analisando as curvas referentes as frequências de ensaio de 0,7 Hz a 1 Hz, observa-se um leve aumento nos níveis de tensão atingida pelo fio NiTi. Esse comportamento corresponde a lei de Clausius-Clapeyron para LMF (OTSUKA & WAYMAN, 1998), a qual estabelece que o aumento

da temperatura do material leva diretamente ao aumento das tensões críticas de transformação de fase. Dessa forma, constata-se a sensibilidade do material em relação a esse comportamento, pois um leve aumento da temperatura média do corpo de prova provoca um correspondente leve aumento na resposta mecânica do mesmo. A Figura 57 apresenta com maior detalhe a resposta mecânica do comportamento dinâmico do fio NiTi quando submetido ao carregamento cíclico a 1 Hz.

Figura 57: Curva tensão-deformação do fio NiTi a 1 Hz.



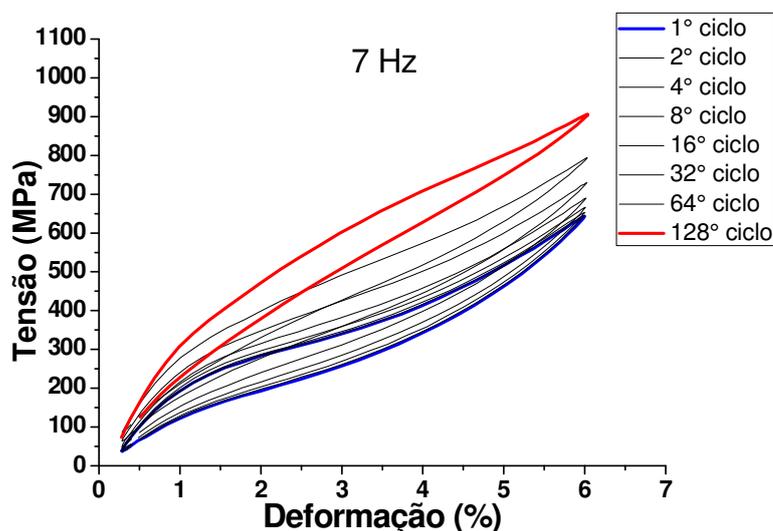
Fonte: Autoria Própria.

Observando ainda a Figura 54 para as frequências de 0,7 Hz a 1 Hz, verifica-se que as tensões críticas de início da transformação martensítica (σ_{MS}) assim como as tensões críticas de fim de transformação austenítica (σ_{AF}) não se alteram. Esse comportamento é diferente do apresentado pela tensão crítica de fim da transformação martensítica (σ_{MF}) e pela tensão crítica de início da transformação austenítica (σ_{AS}), que apresentam uma tendência de crescimento com o passar dos ciclos. Esse comportamento ocorre devido à natureza não isotérmica do ensaio cíclico. O auto aquecimento do material durante a ciclagem faz com que ao atingir a tensão crítica final de transformação martensítica o fio NiTi já esteja a uma temperatura suficientemente alta para que esta tensão sofra também um aumento. O mesmo efeito ocorre durante o descarregamento onde ao sair de um nível de temperatura mais alto o material inicia sua transformação de fase reversa a uma

tensão crítica σ_{AS} mais elevada. Durante essa transformação a absorção de calor devido ao caráter endotérmico da transformação associado a dissipação de calor do meio faz com que ao atingir a tensão crítica final de transformação reversa (σ_{AF}) a temperatura já esteja mais baixa e não influencie no comportamento mecânico do fio NiTi.

A Figura 55 apresenta as curvas tensão-deformação referentes aos ensaios dinâmicos nas frequências de 1 Hz a 10 Hz. Constata-se, nesse caso, o aumento dos níveis de tensão atingido pelo fio NiTi quando submetido a esse tipo de carregamento. Esta resposta mecânica também está diretamente associada a resposta térmica apresentada nas curvas temperatura-tempo da Figura 49. O forte aumento dos níveis de tensão mecânica atingidos já nos primeiros ciclos ocorre mesmo para frequências da ordem de 2 Hz. Com o aumento da frequência de ensaio esse comportamento se apresenta cada vez mais evidente. A Figura 58 mostra a evolução da curva tensão-deformação para uma frequência de ensaio de 7 Hz, na qual se observa esse comportamento com maiores detalhes.

Figura 58: Curva tensão-deformação a 7Hz.



Fonte: Autoria Própria.

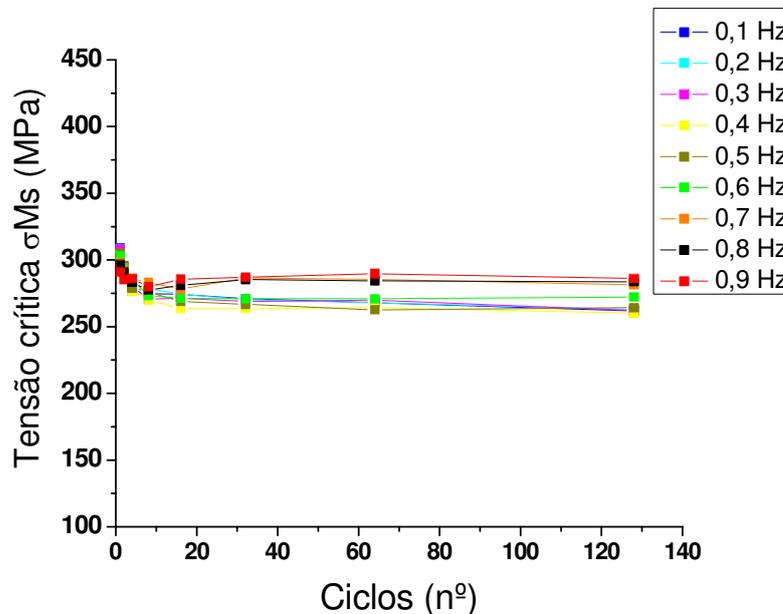
Ao observar as curvas apresentadas nas Figuras 54 e 55, bem como a Figura 58, nota-se o grande aumento das tensões no fio NiTi quando submetido a frequências de deformação compreendidas entre 1 Hz e 10 Hz. Esse aumento é

evidenciado pelo deslocamento para cima do laço histerético de tensão - deformação.

5.7. Propriedades Mecânicas em Função do Número de Ciclos.

A partir das curvas tensão-deformação apresentadas nas Figuras 54 e 55, foram analisadas as seguintes propriedades mecânicas em função no número de ciclos: tensão crítica de início de transformação martensítica σ_{MS} , tensão crítica final de transformação austenítica, σ_{AF} , tensão máxima (que ocorre a 6 % de deformação) e energia dissipada. Essas propriedades foram definidas anteriormente nas Figuras 10 e 11. As Figuras 59 e 60 apresentam as curvas de tensão crítica de início de transformação martensítica em função do número de ciclos para as frequências de ensaio de 0,1 Hz a 7Hz.

Figura 59: Tensão crítica de transformação σ_{MS} em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 0,9 Hz.



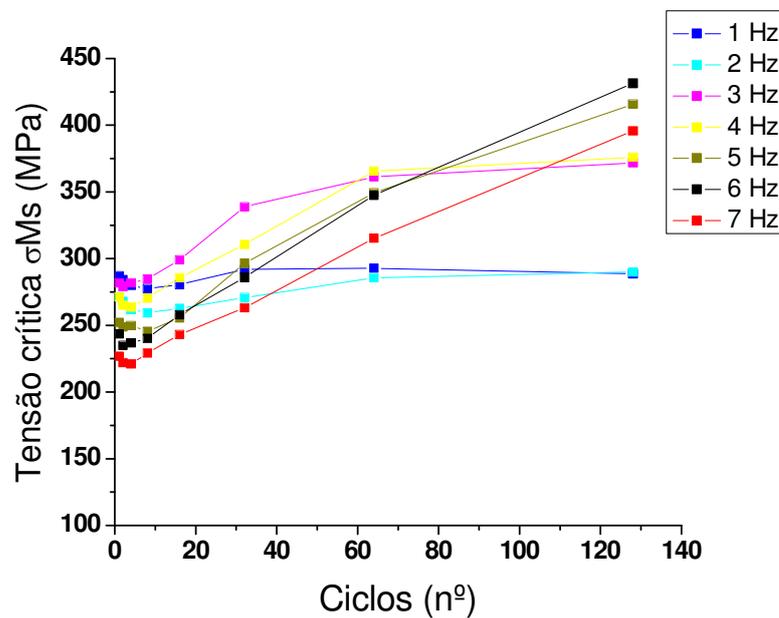
Fonte: Autoria Própria.

Visando abranger todos os ciclos e otimizar a análise realizada, as curvas foram traçadas com base nas propriedades dos ciclos seguindo novamente a função exponencial 2^n . Assim, os ciclos selecionados foram: 1º, 2º, 4º, 8º, 16º, 32º, 64º e 128º, gerando 8 pontos em cada curva.

Na Figura 59 percebe-se que para os primeiros ciclos ocorre uma leve queda na tensão crítica de transformação σ_{Ms} , ratificando o comportamento apresentado pelos ciclos superelásticos apresentados nas curvas tensão-deformação da Figura 54. Com o desenvolvimento da ciclagem, há uma estabilização dessa propriedade para todas as frequências de ensaio.

A Figura 60 apresenta a evolução dessa mesma propriedade para as frequências de ensaio variando de 1 Hz a 7 Hz.

Figura 60: Tensão crítica de transformação σ_{Ms} em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 7 Hz.



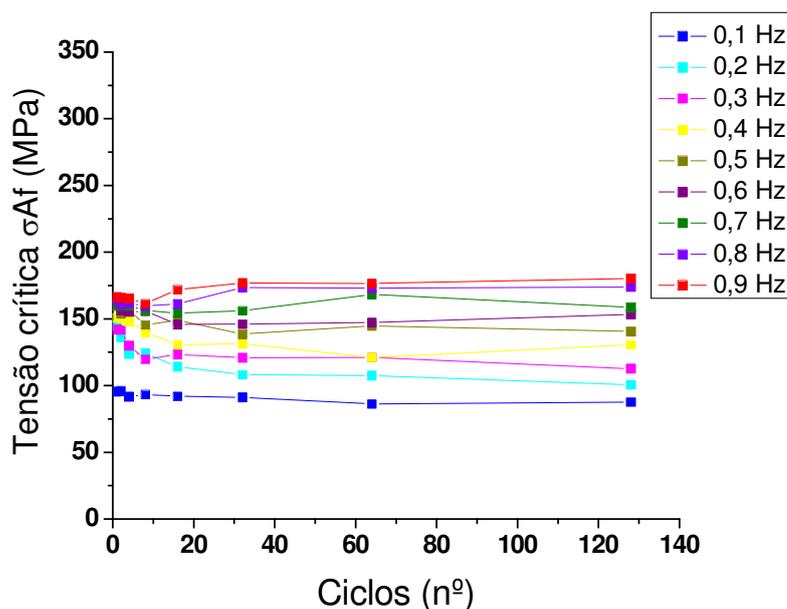
Fonte: Autoria Própria.

Nesse caso, as tensões críticas de transformação de fase foram determinadas apenas até a frequência de 7 Hz devido ao comportamento dinâmico-mecânico apresentado pelo fio NiTi. Observando as curvas mostradas na Figura 55, constata-se que a partir dessa frequência, o laço histerético tensão - deformação não apresenta

uma transformação de fase bem definida, impossibilitando a determinação precisa das tensões críticas de transformação, tanto direta quanto reversa. Observando a Figura 60, nota-se que o comportamento dessa propriedade em função do número de ciclos segue um padrão quase linear crescente para as frequências entre 3 Hz a 7 Hz, sendo mais pronunciado para as frequências mais altas. Esse aumento de tensão se deve ao auto aquecimento resultante do comportamento dinâmico-mecânico experimentado pelo fio NiTi.

O comportamento da tensão crítica final de transformação austenítica (σ_{Af}) em função do número de ciclos, para frequências de ensaio variando entre 0,1 Hz e 7 Hz, é mostrado nas Figuras 61 e 62.

Figura 61: Tensão crítica de transformação σ_{Af} em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 0,9 Hz.



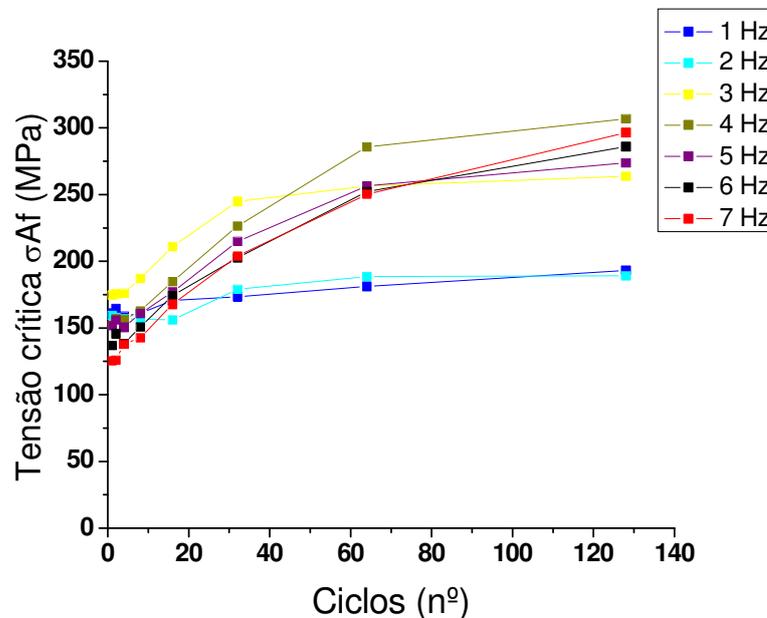
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 61 apresenta essa propriedade para as frequências de ensaio variando de 0,1 Hz a 0,9 Hz. Verifica-se que para cada nível frequência, não há praticamente variação dessa propriedade com o passar dos ciclos. É possível perceber ainda uma dependência dessa propriedade no que diz respeito a frequência de ensaio, principalmente quando se observa o ciclo de número 128. Nota-se que o

aumento da frequência implica em um considerável aumento na tensão crítica de transformação σ_{AF} , passando de cerca de 100 MPa a 0,1 Hz para cerca de 175 MPa para 0,9 Hz.

A Figura 62 apresenta essa mesma análise realizada para frequências de ensaio entre 1 Hz e 7 Hz. Pelo mesmo motivo citado anteriormente, as tensões críticas de transformação σ_{AF} não foram determinadas para as frequências acima de 7 Hz devido a forma da curva tensão - deformação resultante desses ensaios, que não apresenta inflexões específicas para aplicação do método das tangentes como definido na Figura 10. Para as frequências de ensaio de 1 Hz e 2 Hz, o comportamento da tensão σ_{AF} apresenta pouca variação com o passar dos ciclos. Já para as frequências situadas entre 3 Hz e 7 Hz essa tensão crítica apresenta um comportamento quase linear crescente com o aumento dos ciclos. Os níveis de tensão crítica se elevam de cerca de 125 MPa para cerca de 275 MPa a uma frequência de 7 Hz.

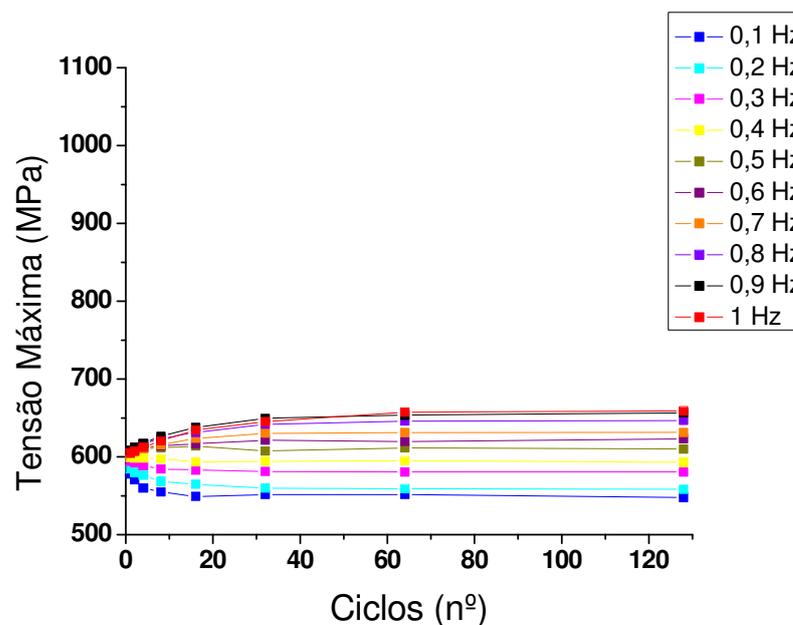
Figura 62: Tensão crítica de transformação σ_{AF} em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 7 Hz.



Fonte: Autoria Própria.

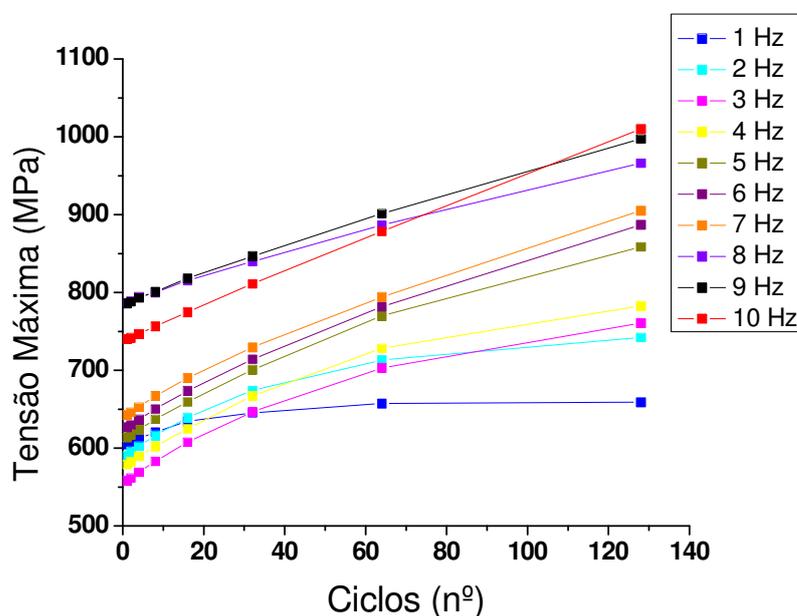
A Figura 63 apresenta o comportamento da tensão máxima atingida pelo fio NiTi quando submetido aos ensaios cíclicos entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz. Observa-se que para as frequências de 0,1 Hz e 0,2 Hz, há uma leve diminuição na tensão máxima atingida pelo material quando submetido a ciclagem mecânica. Esse comportamento se deve ao leve resfriamento sofrido pelo fio NiTi devido ao comportamento termomecânico das transformações de fase, demonstrado pela curva temperatura-tempo apresentada na Figura 48. Nota-se que para as frequências de 0,3 Hz e 0,4 Hz o efeito da ciclagem não tem praticamente influência sobre a tensão máxima atingida pelo material. Já para as frequências entre 0,5 Hz e 1 Hz, percebe-se um leve aumento da tensão máxima nos primeiros 20 ciclos, tendendo a se estabilizar com o desenvolvimento da ciclagem. Nesses níveis de frequência, o aumento da tensão máxima sofrido pelo fio NiTi atinge um máximo de cerca de 50 MPa entre o primeiro e o último ciclo. Verifica-se ainda que há uma notável dependência da tensão máxima com a frequência de ensaio. Esse comportamento se desenvolve de modo diretamente proporcional ao aumento da frequência para essa faixa apresentada.

Figura 63: Tensão máxima em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 1 Hz.



A Figura 64 apresenta o comportamento da tensão máxima atingida pelo fio de LMF NiTi em função do número de ciclos para as frequências de ensaios variando entre 1 Hz e 10 Hz. Para esses níveis de frequência é possível observar um comportamento praticamente linear crescente com o desenvolvimento dos ciclos. Esse comportamento se deve ao fenômeno de auto aquecimento experimentado pelo material ao ser submetido ao carregamento cíclico de deformação. Observa-se ainda que para as frequências compreendidas entre 2 Hz e 10 Hz, esse comportamento apresenta o mesmo padrão e aponta para uma dependência desse comportamento com a frequência de ensaio. Para a frequência de 10 Hz, o fio NiTi sofre um aumento de tensão de cerca de 250 MPa, passando de uma tensão máxima de 750 MPa no primeiro ciclo, para uma tensão máxima de aproximadamente 1000 MPa no último ciclo de deformação. Esse comportamento ratifica o efeito termomecânico sofrido pelo material quando submetido a carregamentos cíclicos.

Figura 64: Tensão máxima em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 10 Hz.

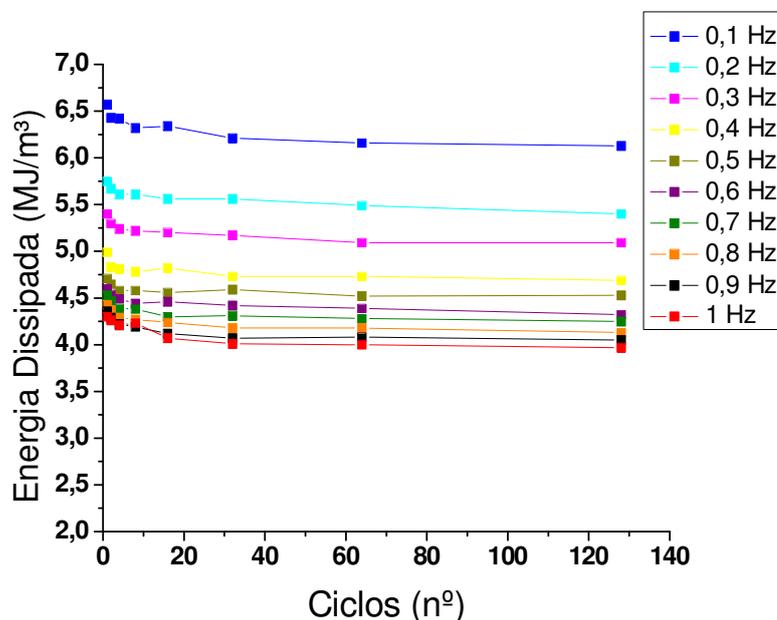


Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 65 e 66 apresentam o comportamento da energia dissipada pelo ciclo superelástico de tensão - deformação em função do número de ciclos sofridos pelo fio de LMF NiTi a diferentes frequências de ensaio.

Observa-se na Figura 65 o comportamento da energia dissipada pelo fio NiTi em função do número de ciclos para as frequências variando de 0,1 Hz a 1 Hz. A energia dissipada se comporta de forma bastante estável com o passar da ciclagem mecânica. Nota-se uma leve queda nos 10 primeiros ciclos seguidos de uma estabilização do comportamento. A sobreposição das curvas permite perceber a influência da frequência de ensaio sobre a energia dissipada. Verifica-se uma redução na energia dissipada com o aumento da frequência de ensaio. É possível perceber ainda que essa queda ocorre para os primeiros níveis de frequência analisados, de 0,1 Hz a 0,4 Hz. Nessa faixa os níveis de energia passam de cerca de 6,25 MJ/m³ para valores em torno de 4,75 MJ/m³. Para os níveis de frequência de ensaio compreendidos entre 0,5 Hz e 1 Hz, a variação de energia dissipada ocorre de forma menos pronunciada. Para esses níveis de frequência, o fio NiTi apresenta valores que variam de 4,0 MJ/m³ a 4,6 MJ/m³.

Figura 65: Energia dissipada pelo fio de LMF NiTi em função do número de ciclos para as frequências entre 0,1 Hz e 1 Hz.

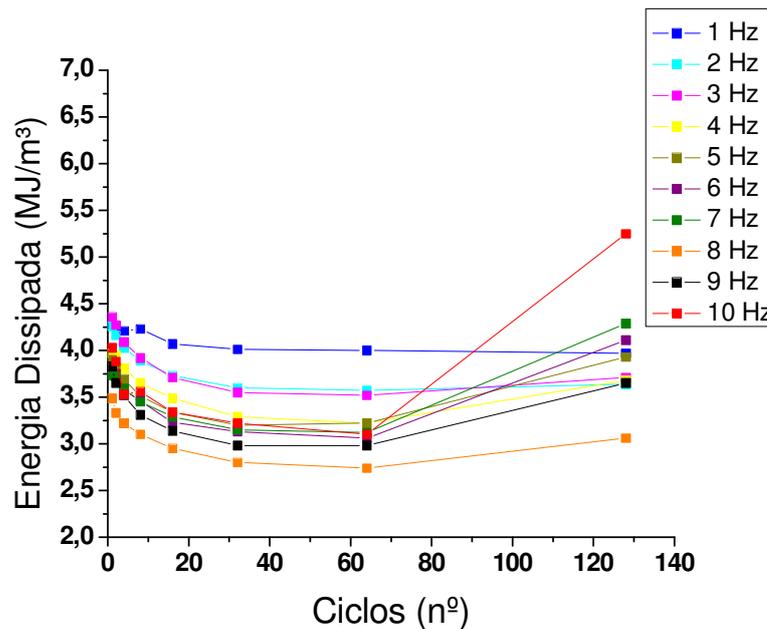


Fonte: Autoria Própria.

A Figura 66 apresenta os valores de energia dissipada em função do número de ciclos para os fios NiTi submetidos a frequências de ensaio entre 1 Hz e 10 Hz. Para essa ordem de frequência de deformação, os níveis de energia mecânica

dissipada pelo fio são menores que aqueles mostrados na Figura 65 para frequências inferiores a 1 Hz. Nota-se que para os ensaios realizados nas frequências de 2 Hz e 3 Hz, ocorre uma diminuição considerável na energia dissipada durante os 40 primeiros ciclos. Esse comportamento se repete para os ensaios realizados nas frequências de 4 Hz a 10 Hz. A diminuição na energia dissipada se deve a redução da histerese de tensão observada nas curvas tensão-deformação apresentadas na Figura 55. Para os ensaios realizados nas frequências entre 5 Hz e 10 Hz, observa-se um aumento da energia dissipada a partir do 64º ciclo. Esse aumento se deve ao aumento no nível de tensão máxima apresentado pelo fio NiTi em virtude do auto aquecimento sofrido durante a ciclagem.

Figura 66: Energia dissipada pelo fio de LMF NiTi em função do número de ciclos para as frequências entre 1 Hz e 10 Hz.



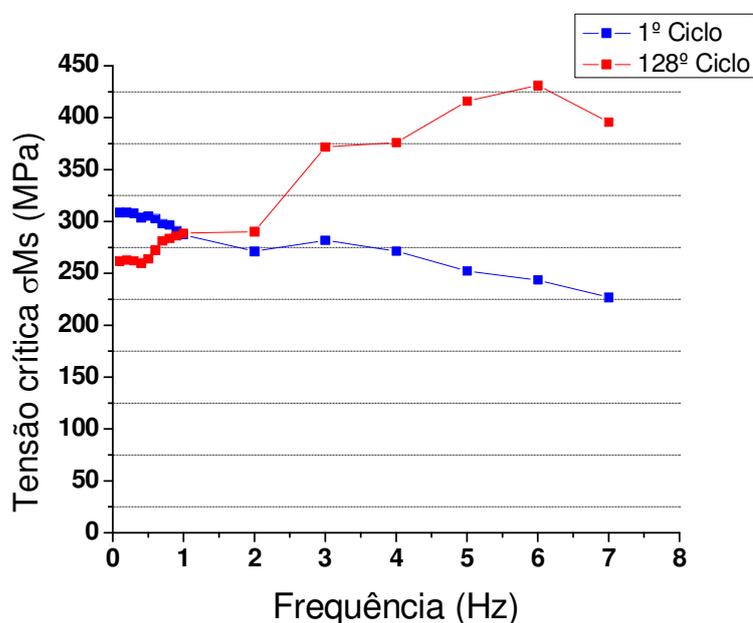
Fonte: Autoria Própria.

5.8. Propriedades Mecânicas em Função da Frequência de Ensaio

A partir das curvas de tensão-deformação apresentadas nas Figuras 54 e 55, foram analisadas as seguintes propriedades: tensão crítica de início de transformação martensítica M_s , tensão crítica final de transformação austenítica A_f , tensão máxima e energia dissipada. Cada uma dessas propriedades foi analisada em função da

frequência de ensaio. Além disso, a verificação foi realizada para o ciclo superelástico de número 1 e 128. Nesse contexto, a Figura 67 apresenta as curvas de tensão crítica de início de transformação martensítica em função da frequência de ensaio para o primeiro e o 128º ciclo. Para a análise dessa propriedade as curvas obtidas durante os ensaios realizados entre as frequências de 8 Hz e 10 Hz foram descartadas pois o formato do laço histerético tensão - deformação impossibilitou a determinação dessas tensões críticas de transformação.

Figura 67: Tensão crítica de início de transformação martensítica σ_{Ms} em função da frequência de ensaio.



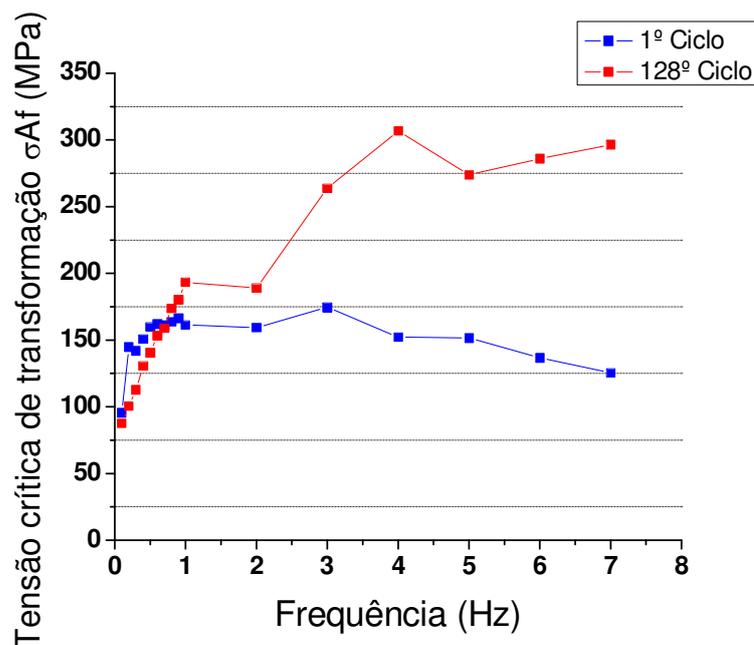
Fonte: Autoria Própria.

Observa-se na Figura 67 que para o primeiro ciclo ocorre uma leve queda no nível de tensão inicial para indução da transformação de fase martensítica. Para os ensaios realizados entre as frequências de 0,1 Hz e 1 Hz, observa-se uma queda de tensão em torno de 25 MPa. Já para os ensaios realizados entre 1 Hz e 10 Hz, a variação foi de quase 50 MPa. A curva referente ao 128º ciclo de cada frequência de ensaio, apresenta um comportamento oposto. Pode-se perceber com clareza o aumento sofrido pelo nível de tensão necessário pra indução da fase martensita. O fio de NiTi apresentou um aumento de cerca de 200 MPa para uma frequência de 6 Hz em relação as frequências anteriores. Esse comportamento se deve ao auto

aquecimento sofrido pelo fio NiTi quando o mesmo atinge o último estágio da sua ciclagem.

A Figura 68 apresenta a evolução da tensão crítica final de transformação austenítica em função da frequência de ensaio. Percebe-se que o comportamento da tensão crítica σ_{Af} segue basicamente o mesmo que o apresentado pela tensão crítica σ_{Ms} . Pode-se perceber que o aumento da frequência não apresenta grande influência sobre o comportamento termomecânico do primeiro ciclo. Nesse estágio, os fenômenos termodinâmicos sofridos pela LMF estão em desenvolvimento e portanto o fio NiTi não sofre grandes alterações térmicas.

Figura 68: Tensão crítica final de transformação martensítica σ_{Af} em função da frequência de ensaio.



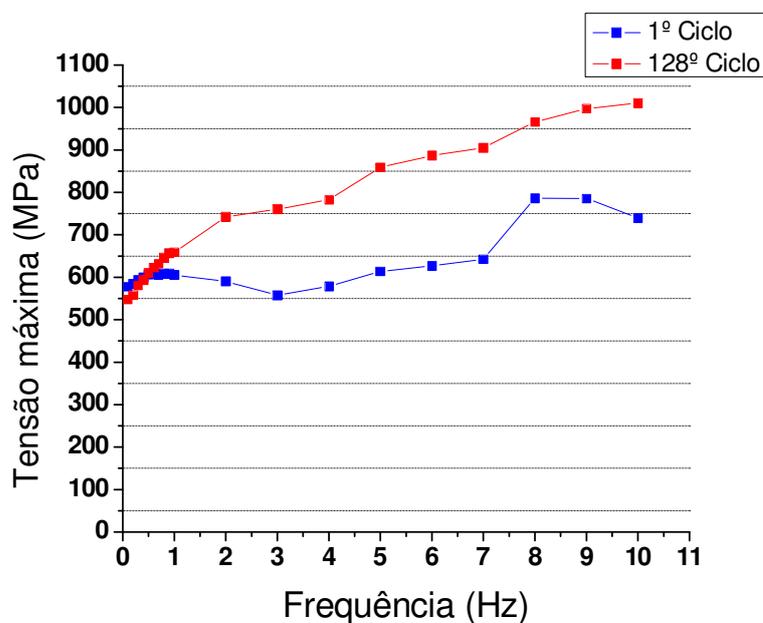
Fonte: Autoria Própria.

Por outro lado, a Figura 68 revela que a tensão crítica σ_{Af} sofre bastante influência da frequência de ensaio quando observa-se o 128º ciclo de deformação. É nesse estágio que a LMF demonstra mecanicamente a influência sofrida pelos efeitos térmicos da ciclagem dinâmica. O aumento de tensão crítica de transformação chega a cerca de 200 MPa, o mesmo nível de alteração sofrido pela tensão crítica σ_{Ms} .

A Figura 69 mostra o comportamento da tensão máxima apresentada em função da frequência de ensaio. Pode-se perceber que mesmo com o aumento da

frequência, as tensões máximas atingidas durante o primeiro ciclo de deformação apresentam um valor estável em torno de 600 MPa. Para as frequências de ensaios compreendidas entre 8 Hz e 10 Hz, esses valores sobem para cerca de 750 MPa. Ao observar o 128º ciclo, observa-se um comportamento linear crescente dessa propriedade. Já nas primeiras frequências de ensaio, entre 0,1 Hz e 1 Hz, a tensão máxima sofreu um aumento gradativo, passando de 550 MPa para 650 MPa. Entre os ensaios realizados nas frequências de 2 Hz a 10 Hz, esses valores subiram de 750 MPa para cerca de 1050 MPa, representando um crescimento global de aproximadamente 500 MPa.

Figura 69: Tensão máxima atingida no fio de LMF NiTi em função da frequência de ensaio.



Fonte: Autoria Própria.

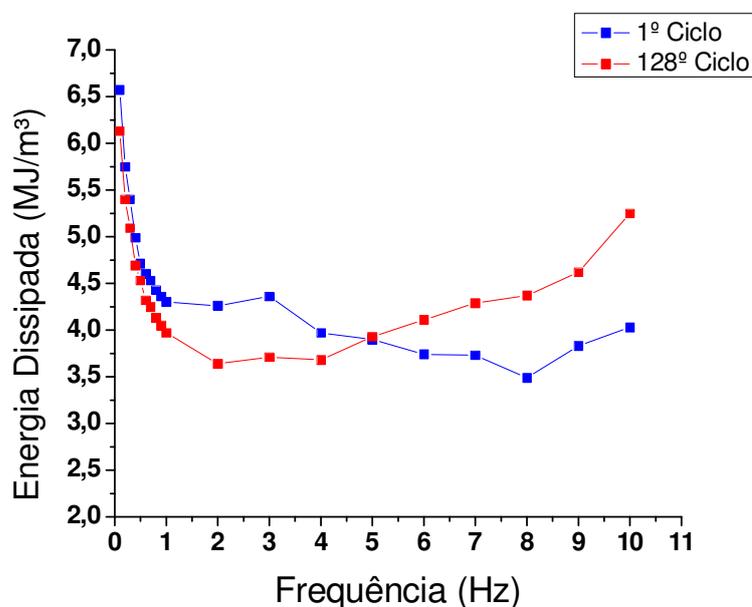
Visando investigar o comportamento da energia dissipada em função da frequência de ensaio, a Figura 70 apresenta curvas referentes a essa propriedade. Verifica-se que a energia mecânica dissipada pelo ciclo histerético apresenta um comportamento bastante sensível a frequência de ensaio.

Independente do ciclo analisado, essa propriedade apresenta uma diminuição considerável com o aumento da frequência de deformação aplicada. Já nos primeiros

níveis, de 0,1 Hz a 1 Hz, a energia dissipada diminui cerca de 2,25 MJ/m³ tanto para o primeiro ciclo quanto para 128º ciclo, ratificando sua dependência da frequência de ensaio.

A partir de 5 Hz, o comportamento da energia dissipada sofre uma inversão quando compara-se os valores obtidos do primeiro ciclo e do 128º ciclo. O crescimento observado a partir dessa frequência se deve ao aumento das tensões máximas atingidas pelos laços superelásticos. Esse fenômeno proporciona o aumento da área gerada pela curva tensão-deformação o que se traduz na energia mecânica dissipada.

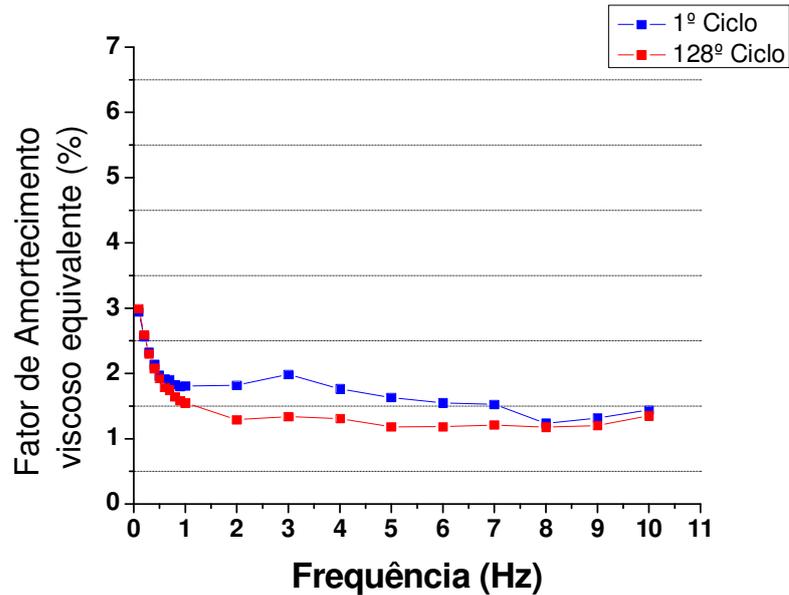
Figura 70: Energia dissipada no fio de LMF NiTi em função da frequência de ensaio



Fonte: Autoria Própria.

A Figura 71 apresenta o comportamento do fator de amortecimento viscoso equivalente em função da frequência de ensaio. Observa-se que para os primeiros níveis de frequência (entre 0,1 Hz e 2 Hz) o comportamento desse coeficiente segue aquele apresentado pela energia dissipada. Porém, para frequências de ensaio entre 2 Hz e 10 Hz, o mesmo apresenta um comportamento estável, tanto para os valores do primeiro ciclo quanto para os 128º ciclo.

Figura 71: Fator de amortecimento viscoso equivalente em função da frequência de ensaio



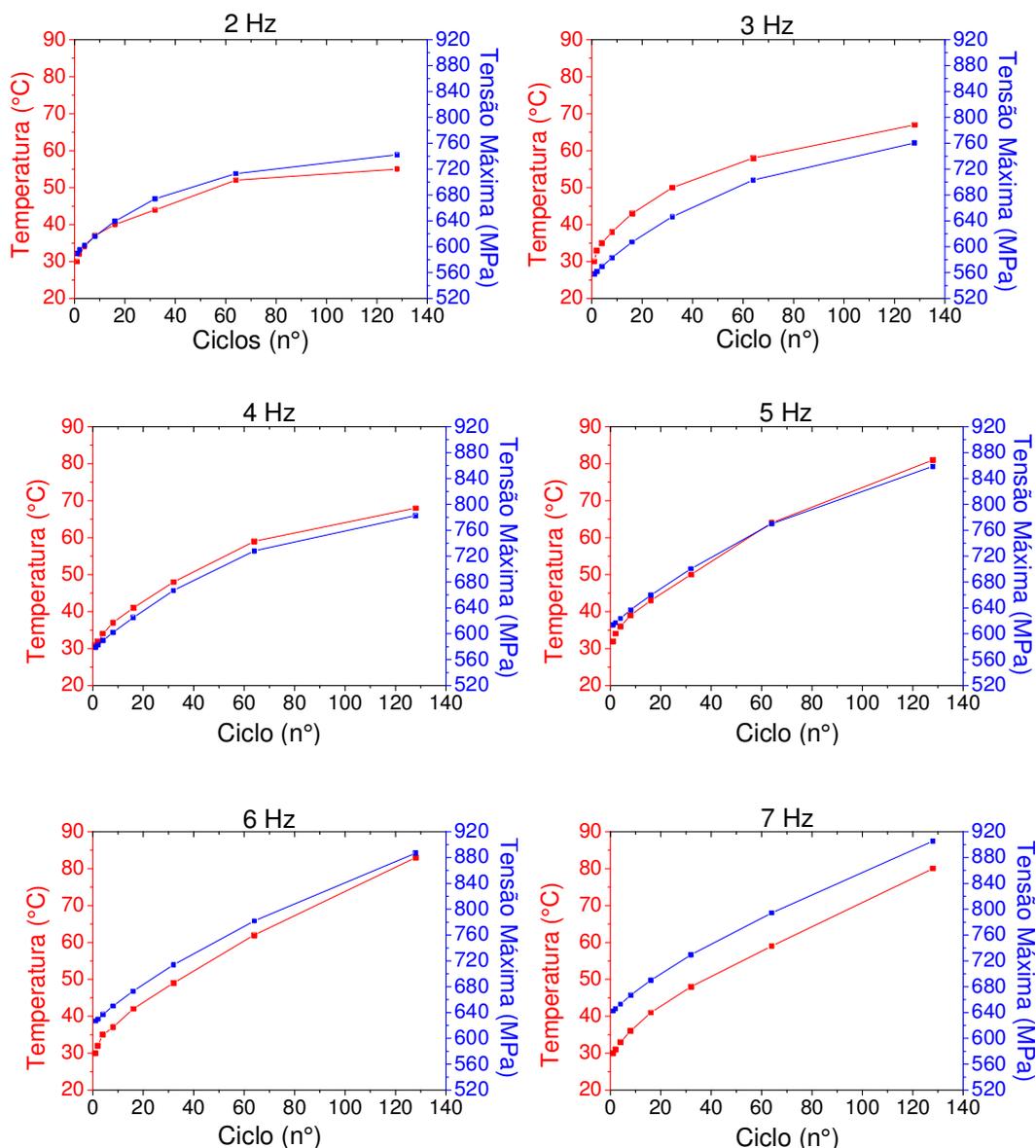
Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Equação 2, página 34, o fator de amortecimento viscoso equivalente (η) é calculado a partir da razão entre a energia mecânica dissipada pelo elemento superelástico (E_{diss}) e a energia mecânica dissipada por um elemento de mola linear equivalente (E_{diss}). Com a diminuição do ciclo superelástico entre as frequências de 0,1Hz e 4Hz, o fator de amortecimento segue o comportamento apresentado pela energia dissipada (Figura 70). Porém, a partir de 5Hz, com o aumento dos níveis de tensão máxima decorrente do aumento de temperatura, o valor da energia dissipada por um elemento de mola clássico (E_{diss}) aumenta de forma mais importante, impondo assim uma estabilização no comportamento do fator de amortecimento.

5.9 Propriedades Mecânicas em Função da Temperatura

A Figura 72 apresenta o comportamento da tensão máxima e da temperatura do fio de LMF superelástico em função do número de ciclos para os ensaios realizados entre as frequências de 2 Hz e 7 Hz. Observa-se que ao longo da ciclagem mecânica o aumento da temperatura e da tensão máxima apresentada pelo fio evoluem proporcionalmente.

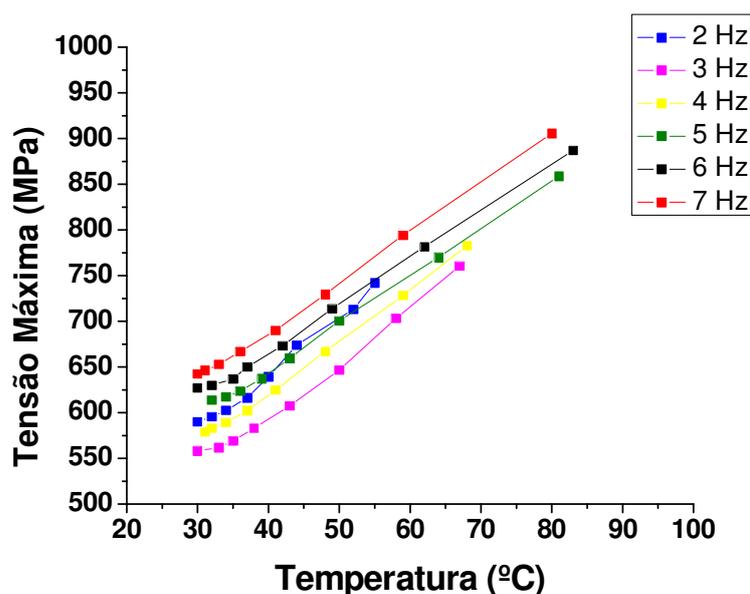
Figura 72: Tensão Máxima e temperatura em função do número de ciclos



Fonte: Autoria Própria.

O comportamento apresentado na Figura 72 sugere uma dependência linear entre a tensão máxima e a temperatura do fio durante os ensaios dinâmicos a diferentes frequências. Para verificar esta relação linear foi traçado o gráfico da Figura 73, apresentando o comportamento da tensão máxima em função da temperatura apresentada pelo fio durante a ciclagem dinâmica.

Figura 73: Tensão Máxima em função da temperatura para as frequências entre 2Hz e 7Hz



Fonte: Autoria Própria.

Ao observar a Figura 73 pode-se perceber a forte influência da temperatura sobre a resposta mecânica do fio. Seguindo o comportamento previsto pela Lei de Clausius-Clapeyron, o aumento da temperatura devido à geração de calor durante o ciclo exotérmico é um fator de grande importância durante a ciclagem dinâmico-mecânica do fio de NiTi.

A partir das curvas apresentadas pela Figura 73 foi possível determinar o coeficiente de variação das tensões críticas de transformação de fase (C) para os ensaios dinâmicos realizados nas frequências de 2Hz a 7Hz. Para efeito de estudo, os coeficientes obtidos a partir dos ensaios dinâmicos foram chamados de Coeficientes Dinâmicos e foram obtidos a partir da variação da tensão máxima com o aumento da temperatura durante a ciclagem dinâmica.

Nesse contexto a Tabela 5 apresenta os coeficientes dinâmicos obtidos para os ensaios realizados entre as frequências de 2 Hz e 7 Hz.

Tabela 5: Coeficiente Dinâmico de aumento das tensões críticas de transformação

Frequência	Coeficiente Dinâmico (C)
2 Hz	6.2 MPa/°C
3 Hz	5.6 MPa/°C
4 Hz	5.6 MPa/°C
5 Hz	5.1 MPa/°C
6 Hz	5.1 MPa/°C
7 Hz	5.3 MPa/°C

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos resultados apresentados pela Tabela 5 observa-se que os coeficientes dinâmicos obtidos entre os ensaios realizados nas frequências de 3Hz a 7Hz apresentam um desvio pouco elevado, de cerca de 9%. Ainda assim, ao se comparar esses valores dinâmicos aos obtidos pelos coeficientes $C^A = 6,5 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$ e $C^M = 7,1 \text{ MPa/}^\circ\text{C}$, que representam o comportamento termomecânico quase-estático, tem-se uma pequena variação entre eles, de cerca de 15%. Com esse resultado pode-se ressaltar mais uma vez importância da influência térmica na resposta dinâmica superelástica do fio de NiTi.

6. Conclusões

Neste trabalho foi estudada a influência da frequência de ensaio na resposta térmica e dinâmico-mecânica de um fio de NiTi superelástico inicialmente a temperatura ambiente. Para isso, o fio de NiTi foi submetido a frequências de ensaio sob controle de deformação a diferentes frequências, variando entre 0,1 Hz e 10 Hz.

Em termos do comportamento térmico apresentado pelo fio NiTi, observou-se que para as frequências compreendidas entre 0,1 Hz e 1 Hz, o mesmo apresentou uma oscilação de temperatura bastante perceptível, qualitativamente traduzível pela presença de `serrilhados_ na curva temperatura - tempo. Essa oscilação ocorreu de modo a aquecer o fio NiTi durante o carregamento e resfria-lo durante o descarregamento. Para as frequências de ensaio mais baixas, referentes a 0,1 Hz e 0,2 Hz, durante o descarregamento, o fio de NiTi chegou a apresentar temperaturas inferiores a temperatura ambiente, correspondendo a uma queda de cerca de 5 °C. Para os ensaios realizados entre as frequências mais altas, entre 2 Hz e 10 Hz, o efeito térmico sofrido pelo fio de NiTi foi bastante pronunciado. Para a frequência de 2 Hz o fio NiTi atingiu temperaturas da ordem de 50 °C, crescendo até cerca de 95 °C para o ensaio realizado a frequência de 10 Hz.

Esse comportamento térmico apresentou grande influência sobre a resposta dinâmico-mecânica do fio de LMF NiTi. Foi possível observar que mesmo o leve resfriamento sofrido durante os menores níveis de frequência, apresentou uma influência proporcional na resposta mecânica do fio, como mostrado pelas Figuras 54 e 56. A evolução do comportamento superelástico teve início já para a frequência de 0,7 Hz, para a qual foi possível perceber o leve aumento das tensões máximas apresentadas durante a ciclagem.

Ao observar o comportamento das tensões críticas de transformação, bem como a tensão máxima do ciclo superelástico em função do número de ciclos, foi possível constatar que para as frequências de ensaio mais baixas, de 0,1 Hz a 0,9 Hz, não ocorreu alteração significativa nos valores determinados. Já para os ensaios realizados nas frequências mais altas, na faixa de 1 Hz a 10 Hz, o efeito da ciclagem levou a uma tendência de crescimento linear dessas tensões associadas aos laços superelásticos. Esse comportamento não foi seguido pela energia dissipada. Para os

ensaios realizados entre as frequências de 0,1 Hz a 3 Hz, houve uma queda na dissipação de energia nos primeiros 30 ciclos, seguido de uma estabilização até o final da ciclagem. Os ensaios realizados a partir de 4 Hz, apresentaram o mesmo comportamento até o ciclo de número 64, a partir daí, foi possível observar um aumento na energia dissipada para as maiores frequências. Esse comportamento está associado ao aumento do laço histerético em virtude do efeito termomecânico sofrido pelo fio NiTi.

Constatou-se que o fator de amortecimento viscoso equivalente apesar da dependência com a energia dissipada, não apresentou a mesma tendência de comportamento, sendo considerado independente do aumento da frequência entre 2Hz e 10Hz.

Foi possível também obter o coeficiente de aumento das tensões críticas de transformação de fase a partir dos ensaios dinâmicos. Tais valores quando comparados com os valores médios obtidos dos coeficientes C^A e C^M (obtidos através dos ensaios quase estáticos) apresentaram pouca variação, assegurando assim o efeito da dependência térmica na resposta dinâmica dos fios.

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, foi possível perceber que o efeito térmico sofrido pelo fio de LMF NiTi sob carregamento dinâmico apresenta grande influência sobre a resposta mecânica do mesmo. Dessa forma, ao aplicar esse tipo de elemento na forma de molas, cabos e outras, em dispositivos sujeitos a carregamentos dinâmicos, deve-se levar em conta que as tensões mecânicas, bem como os níveis de energia dissipada, podem variar sensivelmente com o tipo de carregamento cíclico sofrido pelo mesmo. Nesse contexto, a caracterização dinâmica se faz necessária, diferentemente dos materiais metálicos convencionais de engenharia, para os quais a resposta mecânica quase estática não varia sensivelmente em relação ao carregamento dinâmico.

7. Sugestão para Trabalhos Futuros

Com base nos resultados e conclusões obtidos nesta pesquisa, apresenta-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Realizar aquisição das temperaturas com o auxílio de outras técnicas de medição, como por exemplo termografia;
- Realizar um estudo térmico mais aprofundado a fim de determinar todos os parâmetros termodinâmicos envolvidos nos ensaios, como o coeficiente de convecção térmica (h);
- Utilizar modelos matemáticos para simular o comportamento termomecânico de um fio com as mesmas dimensões a fim de comparar os resultados teóricos e experimentais.

8. Referências

- Alam, M. S., Youssef, M. a, & Nehdi, M. 2007. Utilizing shape memory alloys to enhance the performance and safety of civil infrastructure: a review. *Canadian Journal of Civil Engineering*, Canada. Volume 34, Número 9, pp 1075-1086
- Alonso, T., Chagnon, G., Alloy, S. M., & Modulus, Y. 2013. Etude du comportement thermomécanique d'un fil fin de NiTi par spectromètre dynamique mécanique et thermique. 21ème Congrès Français de Mécanique. Bordeaux, 26 au 30 août 2013. pp 1-6.
- Amarante, F. P., & Cismasiu, C. 2011. Bridge hinge-restrainers built up of NiTi superelastic shape-memory alloys. *Centro de Investigação em Estruturas e Construção - UNIC, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, Quinta da Torre, 2829-516 Caparica, Portugal*. pp 1-12
- Bellini, A., Colli, M., & Dragoni, E. 2009. Mechatronic Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps: A Case Study. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. Volume 56, Número 7, pp 2644-2656.
- Benafan, O., Brown, J., Calkins, F. T., Kumar, P., Stebner, a. P., Turner, T. L., Young, M. L. 2013. Shape memory alloy actuator design: CASMART collaborative best practices and case studies. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*. Cleveland, OH 44135, USA. Volume. 10, Número 1, pp 1-42.
- Cismasiu, C. 2010. *Shape Memory Alloys*. Edited by Corneliu Cismasiu. Sciyo. Rijeka, Croatia.
- Debbarma, S. R., & Saha, S. 2012. Review of Shape Memory Alloys applications in civil structures, and analysis for its potential as reinforcement in concrete flexural members. *International Journal of Civil and Structural Engineering*. Volume 2, Número 3, pp 924-942

- DesRoches, R., & McCormick, J. 2003. Properties of large diameter shape memory alloys under cyclical loading. SPIE. Smart Structures and Materials. Volume 5057, pp 187-196.
- Dieng, L., Helbert, G., Chirani, S. A., Lecompte, T., & Pilvin, P. 2013. Use of Shape Memory Alloys damper device to mitigate vibration amplitudes of bridge cables. Engineering Structures. Volume 56, pp 1547-1556.
- Doaré, O., Sbarra, A., Touzé, C., Ould Moussa, M., & Moumni, Z. 2012. Experimental analysis of the quasi-static and dynamic torsional behaviour of shape memory alloys. International Journal of Solids and Structures. Volume 49, Número 1, pp 32-42.
- DuniP, V., Pieczyska, E. a, Tobushi, H., Staszczak, M., & SlavkoviP, R. 2014. Experimental and numerical thermo-mechanical analysis of shape memory alloy subjected to tension with various stress and strain rates. Smart Materials and Structures. Volume 23, Número 5, pp 1- 11.
- FerTec, J., Antel, I., & Rudolf, R. 2014. Stress dependent electrical resistivity of orthodontic wire from the shape memory alloy NiTi. Materials & Design. Volume 55, pp 699-706.
- Furst, S. J., Bunget, G., & Seelecke, S. 2013. Design and fabrication of a bat-inspired flapping-flight platform using shape memory alloy muscles and joints. Smart Materials and Structures. Volume 22, Número 1, pp 1-12.
- G.N.Dayananda, T. 2008. NiTi Super Elastic Shape Memory Alloys for Energy Dissipation in Smart Systems for Aerospace Applications. Tese submetida a Universidade de Mangalore em associação com o "Advanced Composites Division National Aerospace Laboratories". Bangalore-India.
- Grabe, C., & Bruhns, O. T. 2008. On the viscous and strain rate dependent behavior of polycrystalline NiTi. International Journal of Solids and Structures. Volume 45, Numeros 7-8, pp 1876-1895.

- He, Y. J., & Sun, Q. P. 2010. Rate-dependent domain spacing in a stretched NiTi strip. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 47, Numero 20, pp 2775-2783.
- He, Y. J., & Sun, Q. P. 2011. On non-monotonic rate dependence of stress hysteresis of superelastic shape memory alloy bars. *International Journal of Solids and Structures*. Volume 48, Numeros 11-12, pp 1688-1695.
- He, Y., Yin, H., Zhou, R., & Sun, Q. 2010. Ambient effect on damping peak of NiTi shape memory alloy. *Materials Letters*. Volume 64, Número 13, pp 1483-1486.
- Kaplanoglu, E. 2012. Design of Shape Memory Alloy-Based and Tendon-Driven Actuated Fingers Towards a Hybrid Anthropomorphic Prosthetic Hand. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. Volume 9, Número 77, pp 1-6.
- Khmelevskaya, I. Y., Ryklina, E. P., Prokoshkin, S. D., Markossian, G. a., Tarutta, E. P., & Iomdina, E. N. 2008. A shape memory device for the treatment of high myopia. *Materials Science and Engineering*. Volumes 481-482, pp 651-653.
- Krishnan, V.B. 2004. Design , Fabrication And Testing of a Shape Memory Alloy Based Cryogenic Thermal Conduction Switch. *Dissertação de mestrado apresentada ao Department of Mechanical, Materials and Aerospace Engineering da Universidade Central da Florida-USA*
- Lagoudas, D. C. 2008. *Shape Memory Alloys - Modeling and Engineering Application*. Edited by Lagoudas, D. C., Springer, Texas, USA.
- Leo, D. J., & Buckley, S. J. 1998. Vehicular Applications of Smart Material Systems. *Smart Structures and Materials, Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies*. Volume 3326, pp 106-116.
- Li, H., & Qian, H. 2010. Seismic Vibration Control of Structures Using Superelastic Shape Memory Alloys. *Corneliu Cismasiu Ed.In Tech*.pp 155-183. China.

- Mohamed Ali, M. S., & Takahata, K. 2010. Frequency-controlled wireless shape-memory-alloy microactuators integrated using an electroplating bonding process. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 163, Numero 1, pp 363-372.
- Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. a. 2013. A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*. Volume 56, pp 1078-1113.
- Morgan, N. . 2004. Medical shape memory alloy applications´ the market and its products. *Materials Science and Engineering: A*. Volume 378, Números 1-2, pp 16-23.
- Morin, C., Moumni, Z., & Zaki, W. 2011. Thermomechanical coupling in shape memory alloys under cyclic loadings: Experimental analysis and constitutive modeling. *International Journal of Plasticity*. Volume 27, Número 12, pp 1959-1980.
- Otsuka, K., & Wayman, C. M. 1998. *Shape Memory Materials*, Editado por K. Otsuka and C. M. Wayman, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Pan, Q., & Cho, C. 2007. The Investigation of a Shape Memory Alloy Micro-Damper for MEMS Applications. *Sensors-MDPI*. Volume 7, pp 1887-1900.
- Ramos de Oliveira, H. M. 2012. Avaliação Dinâmica Do Efeito Superelástico De Fios De Niti Com Memória De Forma. In *Proceedings of the VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012*. São Luiz, Brazil.
- Ramos de Oliveira, H. M., & Bezerra Filho, C. R. 2009. Estudos Para Modelagem Termomecânica De Atuadores De Ligas Com Memória De Forma. Trabalho de Conclusão de Curso Apresentado a Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Campina Grande-Paraíba-Brasil.
- Ramos de Oliveira, H. M., Grassi, E. N. ., & de Araújo, C. J. 2012. Smart lockwire ^{clip} de freno de liga com memória de forma para melhoria de confiabilidade em fixações aparafusadas. *Anais do VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Volume 1, pp 1-7.

- Reedlunn, B., & Shaw, J. a. 2008. Shape memory alloy cables. Behavior and Mechanics of Multifunctional and Composite Materials. Volume 6929, pp 1-11.
- Runciman, A., Xu, D., Pelton, A. R., & Ritchie, R. O. 2011. An equivalent strain/Coffin-Manson approach to multiaxial fatigue and life prediction in superelastic Nitinol medical devices. Biomaterials. Volume 32, Número 22, pp 4987-4993.
- Saigal, A., & Fonte, M. 2011. Solid, shape recovered 'Bulk_nitinol: Part II' Mechanical properties. Materials Science and Engineering: A. Volume 528, Números 16-17, pp 5551-5559.
- Shaw, J. A., & Kyriakides, S. 1995. Thermomechanical Aspects of NiTi. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. Volume 43, Número 8, pp 1243-1281.
- Speicher, M., Hodgson, D. E., DesRoches, R., & Leon, R. T. 2009. Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings. Journal of Materials Engineering and Performance. Volume 18, Números 5-6, pp 746-753.
- Torra, V., Auguet, C., Isalgue, a., Carreras, G., Terriault, P., & Lovey, F. C. 2013. Built in dampers for stayed cables in bridges via SMA. The SMARTeR-ESF project: A mesoscopic and macroscopic experimental analysis with numerical simulations. Engineering Structures. Volume 49, pp 43-57.
- Wang, Z. ., Zu, X. ., Feng, X. ., Lin, L. ., Zhu, S., You, L. ., & Wang, L. . 2003. Design of TiNi alloy two-way shape memory coil extension spring. Materials Science and Engineering: A. Volume 345, Números 1-2, pp 249-254.
- Wang, Z. G., Zu, X. T., Feng, X. D., Zhu, S., Dai, J. Y., Lin, L. B., & Wang, L. M. 2002. Study of two-way shape memory extension spring of narrow hysteresis TiNiCu shape memory alloys. Materials Letters. Volume 56, pp 284-288.
- Yang, S., Han, J., & Lee, I. 2006. Characteristics of smart composite wing with SMA actuators and optical fiber sensors. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. Volume 23, pp 177-186.

Yuse, K., & Kikushima, Y. 2005. Development and experimental consideration of SMA/CFRP actuator for vibration control. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 122, Número 1, pp 99-107.

Zhang, X., Feng, P., He, Y., Yu, T., & Sun, Q. 2010. Experimental study on rate dependence of macroscopic domain and stress hysteresis in NiTi shape memory alloy strips. *International Journal of Mechanical Sciences*. Volume 52, Número 12, pp 1660-1670.