

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

JOSÉ JOELSON DE MELO SANTIAGO

COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS
DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

CAMPINA GRANDE - PB
2018

JOSÉ JOELSON DE MELO SANTIAGO

COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DE LIGA COM
MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, área de concentração “Análise e Projeto de Sistemas Termomecânicos”, da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Carlos José de Araújo.

Co-orientador: Prof. Dr. Jackson de Brito Simões.

CAMPINA GRANDE, PB
2018

S235c

Santiago, José Joelson de Melo.

Comportamento térmico e mecânico de molas helicoidais de liga com memória de forma Ni-Ti obtidas por fundição de precisão / José Joelson de Melo Santiago. - Campina Grande-PB, 2018.

121 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2018.

"Orientação: Prof. Dr. Carlos José de Araújo, Prof. Dr. Jackson de Brito Simões".

Referências.

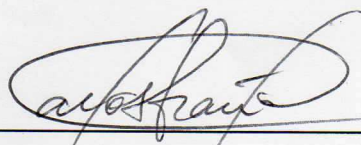
1. Molas Helicoidais. 2. Ligas de Ni-Ti. 3. Ligas com Memória de Forma. 4. Fundição de Precisão. I. Araújo, Carlos José de. II. Simões, Jackson de Brito. III. Título.

CDU 669.018.2(043)

COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE MOLAS HELICOIDAIS DA LIGA COM
MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

JOSÉ JOELSON DE MELO SANTIAGO

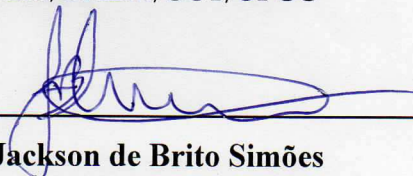
Dissertação Aprovada em 30/08/2018 pela Banca Examinadora constituída dos seguintes
membros:



Dr. Carlos José de Araújo

Orientador

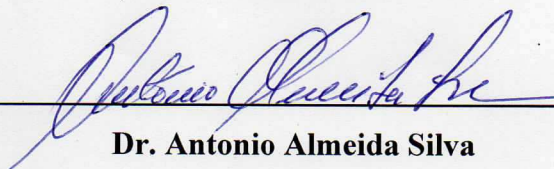
PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Jackson de Brito Simões

Orientador

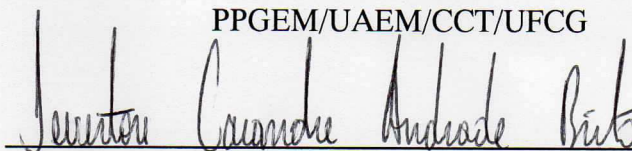
UFERSA



Dr. Antonio Almeida Silva

Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Ieverton Caiandre Andrade Brito

Examinador Externo

UFPB

Dedico esse trabalho a minha família em especial a meus pais, Josemir e Daria, a minha irmã Mahyara e minha esposa Larissa pelo apoio incondicional em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS por me permitir uma vida repleta de bênçãos, oportunidades e dificuldades que têm me tornado mais forte.

Agradeço ao Prof. Carlos José, coordenador do LaMMEA, por toda orientação e pela disponibilidade de todos os materiais e equipamentos para o desenvolvimento deste trabalho, além da confiança depositada em mim.

Agradeço ao Prof. Jackson Simões, que ultrapassou os limites da orientação passando a ser um verdadeiro amigo.

Agradeço a toda equipe do LaMMEA, em especial à PC (Paulo César), Rômulo, Antônio, Marcos, Richard, Yan, Augusto e Daniel pelo companheirismo com auxílio na realização de diversos ensaios, compartilhando conhecimentos e momentos de entretenimento.

Agradeço aos professores do PPGEM (Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica) da UFCG.

Agradeço aos meus pais, Josemir e Daria, pelo exemplo de vida e ensinamentos tão importantes desde os primeiros dias de minha vida neste mundo.

Agradeço a minha esposa Larissa, companheira de vida, pelo apoio incondicional que me dá força e me faz ser uma pessoa melhor.

Agradeço a minha Família pelo apoio que sempre tem dado, por poder contar com cada um em todos os momentos.

Agradeço também aos amigos que moraram comigo durante esse período, em especial à Andrey e a Eclys, pelo acolhimento inicial no seu lar e todos os momentos de entretenimento.

Agradeço a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

"Compreender constantemente. Trabalhar sempre. Descansar, quando se mostre necessária a pausa de refazimento. Parar nunca."

(Emmanuel – Chico Xavier)

COMPORTAMENTO TÉRMICO E MECÂNICO DE MOLAS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA Ni-Ti OBTIDAS POR FUNDIÇÃO DE PRECISÃO

RESUMO

Em muitas situações de projeto em sistemas mecânicos deseja-se rigidez e ao mesmo tempo uma certa flexibilidade. Nesses casos, as molas são elementos interessantes, por isso esses componentes foram bastante estudados. Em paralelo, visando ampliar as possibilidades, novos materiais têm se desenvolvido, a exemplo de materiais funcionais, como é o caso das ligas com memória de forma (LMF). As molas helicoidais fabricadas a partir de LMF são componentes promissores para aplicações como atuadores/sensores, pela capacidade de recuperar grandes deformações elásticas e pseudo-plásticas. Atualmente esses componentes são obtidos em sua maioria através da conformação de fios, a frio ou a quente, e tem aplicação consolidada no campo biomédico, porém no campo industrial as aplicações comerciais ainda são limitadas. Neste cenário, utilizar a fundição de precisão para este tipo de componente pode ampliar as possibilidades e aumentar as aplicações em diversos setores. Por outro lado, é de amplo interesse entender a relação entre as propriedades mecânicas e as configurações geométricas destes elementos. Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho é a caracterização térmica e mecânica de molas helicoidais de LMF Ni-Ti ($M_{LMF NiTi}$) com diferentes configurações, produzidas pelo processo de fundição de precisão, empregando a fusão por indução com injeção por centrifugação (FIC) em moldes cerâmicos. Os resultados obtidos mostraram que as molas produzidas apresentaram transformação de fase característica dos fenômenos de superelasticidade (SE). Por meio dos ensaios mecânicos constatou-se que as molas suportaram, no geral, deformações de até 70%. Os parâmetros dimensionais influenciaram o comportamento mecânico para o qual o aumento do passo e do diâmetro do fio fizeram aumentar a força aplicada para submeter as molas as mesmas deformações. Dessa forma, as molas produzidas apresentam características funcionais adequadas para potencializar aplicações industriais a partir de LMF Ni-Ti.

Palavras chaves: Molas Helicoidais. Ligas de Ni-Ti. Ligas com memória de forma. Fundição de Precisão.

THERMAL AND MECHANICAL BEHAVIOR OF Ni-Ti SHAPE MEMORY ALLOY HELICAL SPRINGS MANUFACTURED BY INVESTMENT CASTING

ABSTRACT

In many situations of design in mechanical systems one wants rigidity and at the same time a certain flexibility. In these cases, the springs are interesting elements, so these components were well studied. In parallel, in order to expand possibilities, new materials have been developed, such as functional materials, such as shape memory alloys (LMF). Helical springs made from LMF are promising components for applications such as actuators / sensors, for the ability to recover large elastic and pseudo-plastic deformations. Currently, these components are mostly obtained through wire forming, either cold or hot, and have consolidated application in the biomedical field, but in the industrial field commercial applications are still limited. In this scenario, using precision casting for this type of component can expand the possibilities and increase the applications in several sectors. On the other hand, it is of broad interest to understand the relation between the mechanical properties and the geometric configurations of these elements. In this context, the main objective of this work is the thermal and mechanical characterization of LMF Ni-Ti helical springs ($M_{LMF}NiTi$) with different configurations, produced by the investment casting process, using induction fusion with centrifugal injection (FIC) in ceramic molds. The obtained results showed that the produced springs presented phase transformation characteristic of the phenomena of superelasticity (SE). Through the mechanical tests it was found that the springs generally supported deformations of up to 70%. The dimensional parameters influenced the mechanical behavior for which the step increase, and the wire diameter increased the applied force to subject the springs to the same deformations. Thus, the springs produced have functional characteristics suitable to enhance industrial applications from LMF Ni-Ti.

Keywords: Helical Springs. Ni-Ti alloys. Shape Memory Alloy. Investment Casting

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Comparação processos de fabricação de molas LMF (a) Processo Convencional; (b) Fundição de Precisão;	20
Figura 2 - Histórico das LMF descobertas nos últimos 60 anos.	24
Figura 3 - Representação da estrutura cristalina e microestrutura de uma LMF típica... ..	25
Figura 4 - Representação esquemática da transformação de fase em ligas LMF	26
Figura 5 - Fenômeno de transformação de fase devido à variação de temperatura típica em LMF.	27
Figura 6–Curva característica de LMF em EMF no espaço tensão-deformação-temperatura.....	29
Figura 7 -Esquema ilustrativo do EMF em uma mola helicoidal.....	30
Figura 8–Curva característica de tensão-deformação de uma LMF em regime de superelasticidade.....	31
Figura 9 - Esquema ilustrativo do SE em uma mola helicoidal.....	32
Figura 10 - Curva esquemática tensão-deformação em liga Ni-Ti obtidos em diferentes temperaturas.	33
Figura 11 - Diagrama de equilíbrio da LMF binária Ni-Ti.....	34
Figura 12 - A relação entre a composição do Ni-Ti e as temperatura de transformação da austenita.....	34
Figura 13 - Esquema ilustrativo do efeito da adição de Ni (%at) no comportamento térmico em LMF Ni-Ti.....	35
Figura 14 - Curva característica tensão-deformação comparativa de materiais naturais, aço e a liga NiTi, a temperatura do corpo.	36
Figura 15 - Suporte de tornozelo específico de um paciente.....	38
Figura 16 - Dispositivo de expansão composto com tiras e molas de NiTi	38
Figura 17 - Mola helicoidal fechada de níquel-titânio usada para fechamento de espaço e retração anterior. As imagens a, b, c e d mostram 4 estágios do tratamento.	39
Figura 18 - Protótipo para acionamento do sistema de admissão de ar em motores de combustão (a) Protótipo modelado em CAD; (b) Protótipo montado para teste.....	40
Figura 19 - Dispositivo com mola LMF para aplicação em edifício sujeito a abalo sísmicos. (a) dispositivo utilizando mola helicoidal de LMF Ni-Ti; (b) Comportamento mecânico.....	41
Figura 20 - Estrutura experimental utilizada para avaliar o isolamento sísmico com molas SE: (a) Modelo base de isolamento; (b) Estrutura de aço de dois andares;1) Mesa de agitação;2) Controle deslizante; 3) Mola LMF SE; 4) Sensor de Deslocamento; 5) Acelerômetro.....	41
Figura 21 - Isolador sísmico com Molas LMF: (a) Diagrama esquemático do SFB; (b) Mola LMF em teste mecânico.	42
Figura 22 - Protótipo de mancal adaptativa com molas LMF.	42
Figura 23 - Ensaio Mecânico de Molas LMF Ni-Ti. (a) Máquina de ensaios (b) Montagem do teste. (c) Desenho da mola.....	43
Figura 24 - Sequência de fusão e injeção utilizando o processo PSPP: (a) matérias-primas, (b) tocha rotativa de plasma, (c) botão LMF, (d) resíduo de LMF no cadinho após a injeção, (e) molde metálico, (f) pastilha LMF.	45
Figura 25 - Esquema de processos de fabricação de componentes de LMF Ni-Ti.....	46

Figura 26 - Componentes mecânicos obtidos por fundição de precisão com cera perdida.	47
Figura 27 - Fabricação de Mola de tração pelo processo Shape Setting	47
Figura 28 - Principais etapas do processo de fundição de precisão por molde tipo casca cerâmica para produção de biela automotiva.....	49
Figura 29 - Curva de DSC Característica de LMF sem a presença da fase R.....	50
Figura 30 - Curva de RET. (a) Característica de LMF Ni-Ti sem a presença da fase R. (b) Característica de LMF Ni-Ti com a presença da fase R.	51
Figura 31 - Curva Tensão-Deformação característica da SE: ilustração dos módulos de cisalhamento;.....	52
Figura 32 - Classificação de Molas Helicoidais: (a) Molas Helicoidais de Compressão; (b) Molas helicoidal de extensão; (c) Molas de barra de extensão; (d) Molas de torção.; (e) Molas arruela ou de prato; (f) Molas de voluta; (g) Molas de viga; (h) Molas de potência ou motor; (i) Mola de força constante.	53
Figura 33 - Geometria da Mola helicoidal LMF	54
Figura 34 - Mola helicoidal de tração: (a) Vista frontal com forças externas atuantes; (b) Vista em corte da seção transversal.	55
Figura 35 - Seção transversal de fio sob carga torcional.....	60
Figura 36 - Diagrama de corpo livre em molas sob grandes deformações: (a) Carregamento axial em Molas LMF; (b) Diagrama de corpo livre.	61
Figura 37 - Alteração da geometria durante a deflexão.	61
Figura 38 - Áreas para o cálculo do fator de perda.....	63
Figura 39 - Fluxograma do processo metodológico utilizado na pesquisa.	66
Figura 40 - Primeira Parte – Fluxograma de Fabricação das Molas Helicoidais Ni-Ti.....	67
Figura 41 - Segunda Parte – Fluxograma de caracterização térmica e mecânica de Molas Ni-Ti.....	68
Figura 42 - Fluxograma de seleção dos parâmetros.....	69
Figura 43 - Codificação das Molas Helicoidais Produzidas	70
Figura 44 - Impressora 3D B9creator.....	72
Figura 45 - Impressão das Molas em cera: a) Molas de cera impressa; b) Molas montadas com canal de alimentação principal.	73
Figura 46 - Preparação do molde cerâmico. (a) Espatulador Digital (b)Introdução da lama cerâmica no molde metálico contendo o modelo de tela em cera; (c) Secagem do molde; (d) Molde após cura e retirada do forno.....	73
Figura 47 - Máquina Power Cast 1700 EDG: a) Visor ótico. b) Painel de controle. c) Braço de centrifugação. d) Injeção de Metal líquido. e) Molde após fundição. f) Mola após limpeza com os canais e massalote.....	75
Figura 48 - Processo de corte dos canais de alimentação. a) Corte dos canais de alimentação; b) Molas sem canais de alimentação.	75
Figura 49 - Inspeção visual no Microscópio digital.	77
Figura 50 - Avaliação dimensional das molas de cera e de Ni-Ti.....	78
Figura 51 - Calorímetro DSC da TA Instruments modelo Q20, com detalhe do interior do equipamento e da região da mola que é retirada a amostra.....	79
Figura 52 - Esquema da montagem para o ensaio de RET.....	79
Figura 53 - Montagem de ensaio estático: a) Máquina de ensaios INSTRON,5582; (b) Ensaio montado com câmara térmica; (c) Mola aquecida antes da fixação....	81

Figura 54 - Montagem ensaio dinâmico: (a) Máquina eletrodinâmica de ensaios Instron, Electropuls E10000; (b) Detalhes da montagem da mola LMF com termopar.	82
Figura 55 - As MLMFNiTi obtidas pelo processo de fundição de precisão.	83
Figura 56 - Inspeção visual da superfície das Molas de LMF Ni-Ti 84	84
Figura 57 - Curvas de análise obtidas para as Molas Ni-Ti Brutas de Fundição via: (a) RET; (b) DSC.	88
Figura 58 - Curvas de análise obtidas para as Molas Ni-Ti Tratadas Termicamente via: (a) RET; (b) DSC.	90
Figura 59 - Comportamento força-deformação MLMFNiTi, para os ciclos de tração, com diferentes passos e tratadas termicamente: (a) M_P2_D15; (b) M_P3_D15; (c) M_P4_D15; (d) M_P5_D15; (e) M_P6_D15.	93
Figura 60 - Comportamento Força - Deformação para ciclos de tração em MLMFNiTi, com diferentes passos.	94
Figura 61 - Comportamento força - deformação MLMFNiTi, para os ciclos de tração, com diferentes diâmetros de fios e tratadas termicamente: (a) M_P5_D10; (b) M_P5_D15; (c) M_P5_D20.	95
Figura 62 - Comportamento Força-Deformação para ciclos de tração em MLMFNiTi, com diferentes diâmetros de fio.	96
Figura 63 - Fator de Perda das MLMFNiTi., em função da deformação máxima sob carregamento estático. (a) Valores para molas com diferentes passos; (b) Valores para molas com diferentes diâmetros.	98
Figura 64 - Comportamento força - deformação da Mola M_SE_P2_D_15, sob frequência: (a) Frequência 0,3Hz; (b) Frequência 0,5Hz; (c) Frequência 0,7Hz.	99
Figura 65 - Fator de Perda das M_LMF NiTi., em função da frequência sob carregamento dinâmico. (a) Valores para molas com diferentes passos; (b) Valores para molas com diferentes diâmetros.	101
Figura 66 - Comportamento força - deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,3Hz.	113
Figura 67 - Comportamento força - deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,7Hz.	113
Figura 68 - Comportamento força - deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,7Hz.	114
Figura 69 - Comportamento força - deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,3Hz.	114
Figura 70 - Comportamento força - deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,5Hz.	115
Figura 71 - Comportamento força - deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,7Hz.	115
Figura 72 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,3Hz.	116
Figura 73 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,5Hz.	116
Figura 74 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,7Hz.	117
Figura 75 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,3Hz.	117
Figura 76 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,5Hz.	118
Figura 77 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,7Hz.	118
Figura 78 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,3Hz.	119
Figura 79 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,5Hz.	119
Figura 80 - Comportamento força - deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,7Hz.	120
Figura 81 - Desenho da Mola Helicoidal.	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades físicas, mecânica e de memória de forma de algumas LMF.	28
Tabela 2 - Nomenclatura das molas pelas dimensões nominais das molas modeladas em CAD.....	70
Tabela 3 -Medições dos diâmetros realizadas em projetor de perfil nas molas em cera e brutas de fundição.....	85
Tabela 4 - Medições passos realizadas em projetor de perfil nas molas em cera e brutas de fundição.....	85
Tabela 5 - Valores dos Ângulos dos passos das molas com base na equação (24)	87
Tabela 6 - Resultados do ensaio DSC para Molas Brutas de Fundição	89
Tabela 7 - Resultados do ensaio RET para Molas Brutas de Fundição	89
Tabela 8 - Resultados do ensaio DSC para Molas Tratadas Termicamente	91
Tabela 9 - Resultados do ensaio RET para Molas Tratadas Termicamente	91
Tabela 10 – Parâmetros Mecânicos das MLMFNiTi sob várias amplitudes de deformação	97
Tabela 11 - Valores de Rigidez Austenítica e Módulo de Cisalhamento.	98
Tabela 12 - Parâmetros Mecânicos das Molas Helicoidais LMF sob várias frequências	100

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

LMF - Liga com Memória de Forma

FIC - Fusão de Indução com Injeção por Centrifugação

Ni - Níquel

Ti - Titânio

SE - Superelasticidade

EMF - Efeito Memória de Forma

Cu - Cobre

Al - Alumínio

Au - Ouro

Cd - Cadmio

Zn - Zinco

In - Índio

Tl - Tálho

NQL - Naval Ordnance Laboratory

Fe - Ferro

Pt - Platina

Mn - Manganês

Si - Silício

Co - Cobalto

ESOMAT - Simpósio Europeu de Transformação Martensíticas e Ligas Memória de Forma

ICOMAT - Conferências Internacionais sobre Transformações Martensíticas

TM - Transformação Martensítica

Fase A - Austenita

Fase M - Martensita

B2 - Estrutura cristalina cúbica de corpo centrado

B19 - Estrutura cristalina tetragonal, ortorrômbica ou monoclínica

B2' - Distorção romboédrica da estrutura B2

O - Oxigênio

PSPP - Plasma Skull Push Pull

AFO - Ankle Foot Orthosis

CO₂ – Dióxido de Carbono

SFB - spring-friction bearing

SMA – Shape Memory Alloy

VIM - Fusão por Indução a Vácuo

VAR - Refusão por Arco a Vácuo

EBM - Fusão por Feixe de Elétrons

PAM - Plasma Melting

FP – Fundição de Precisão

DSC - Calorímetro Diferencial de Varredura

RET - Resistência Elétrica em Função da Temperatura

LISTA DE SÍMBOLOS

M_s - Temperatura de início da 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

R_s - Temperatura de início da transformação fase-R

R_f - Temperatura de final da transformação fase-R

M_p - Temperatura de pico da transformação martensítica

A_p - Temperatura de pico da transformação austenítica

T_s - Temperatura crítica

σ - Tensão

σ_{M_s} - Tensão crítica de início de transformação martensítica

σ_{M_f} - Tensão crítica de final de transformação martensítica

at% - Atômica

E_A - Módulo austenítico

E_M - Módulo martensítico

E_{lr} - Deformação Residual

d - Diâmetro do fio da mola

D - Diâmetro médio da mola

N_a - Número de espiras ativas

α - Ângulo de inclinação da mola

F - Força

r - raio

T - Torque

J - Momento Polar

A - Área

τ_{max} - Tensão Máxima

C - Índice de Mola

k_s - Fator de cisalhamento direto

k_w - Fator de Wahl

k_B - Fator de Bergsträsser

$(K)_A$ - Fator de correção de tensão de flexão para a curvatura no gancho da mola

C_1 - Índice 1 de curvatura do gancho da mola

C_2 - Índice 2 da curvatura do gancho da mola

μ - Coeficiente de poisson

ξ - Fração de martensita transformada

ω_n - Frequência Natural da mola em rpm

f_n - Frequência Natural da mola em Hz

W_n - Peso das espiras ativas da mola

γ - Densidade em peso do material

δ - Deflexão da mola

D_i - Diâmetro médio inicial da mola

D_f - Diâmetro médio final da mola

α_i - Ângulo de inclinação inicial da mola

α_f - Ângulo de inclinação final da mola

k_s - Rigidez secante

W_d - Energia dissipada por ciclo

ξ_{eq} - Fator de amortecimento equivalente

δ' - Amplitude de deformação sob o ciclo

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	19
2.	OBJETIVOS	22
2.1.	Objetivo Geral	22
2.2.	Objetivos Específicos	22
3.	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1.	Breve Histórico das Ligas com Memória de Forma (LMF)	23
3.2.	Aspectos Gerais das LMF	25
3.3.	Comportamento Termomecânico das LMF	28
3.3.1	Efeito Memória de Forma	29
3.3.2	Superelasticidade ou Pseudoelasticidade	30
3.4.	LMF Ni-Ti	33
3.5.	Estado da Arte em Molas Helicoidais de Ni-Ti	37
3.6.	Fabricação do Ni-Ti e seus atuadores	43
3.7.	Fabricação de Componentes em LMF por Fundição de Precisão (FP)	48
3.8.	Caracterização de LMF	50
3.9.	Molas helicoidais LMF	53
3.9.1	Definição e Classificação	53
3.9.2.	Tensões em molas helicoidais	54
3.9.3.	Deflexão de molas helicoidais	58
3.9.4.	Frequência Crítica de Molas Helicoidais	59
3.9.5.	Tensões em molas LMF para grandes deflexões	60
3.9.6.	Fator de Amortecimento e Rigidez Secante	63
3.9.7.	Módulo de Cisalhamento	64
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	65
4.1.	Metodologia	65
4.2.	Seleção dos parâmetros das Molas Helicoidais	69
4.3.	Fabricação das Molas LMF	71
4.3.1	Fabricação da LMF Ni-Ti	71
4.3.2	Fabricação do Molde Cerâmico	72
4.3.3	Fusão por Indução com Injeção por Centrifugação (FIC)	74
4.4.	Caracterização das Molas Helicoidais Ni-Ti	76
4.4.1.	Inspeção Visual e Análise Dimensional	76
4.4.2.	Caracterização Térmica	78
4.4.3.	Caracterização Mecânica	80
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	83

5.1	Fabricação das Molas LMF	83
5.2.	Inspeção Visual e Análise Dimensional.....	83
5.3	Análise Térmica	87
5.3.1.	Molas Bruta de Fundição.....	87
5.3.2	Molas Tratadas Termicamente.....	89
5.4.	Análise Mecânica	92
5.4.1.	Caracterização Estática	92
5.4.2.	Caracterização Dinâmica.....	99
6.	CONCLUSÕES.....	102
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	104
8.	REFERÊNCIAS.....	105
9.	Apêndice A- GRÁFICOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS.....	113
10.	Apêndice B- Desenho da MOla Helicoidal.....	121

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm-se procurado desenvolver sistemas multifuncionais a partir de materiais com alta performance, que proporcionem, componentes com baixo peso e providas de funções intrínsecas ativas. Dentre esses materiais estão as Ligas com Memória de Forma (LMF), os quais são materiais metálicos que podem recuperar deformações pseudo-plásticas (de 6 a 8% em tração uniaxial) quando submetidas a um processo termomecânico (AGUIAR et al., 2013). Esses metais especiais podem apresentar os fenômenos efeito memória de forma (EMF) e/ou a superelasticidade (SE) (CZECHOWICZ; LANGBEIN, 2015).

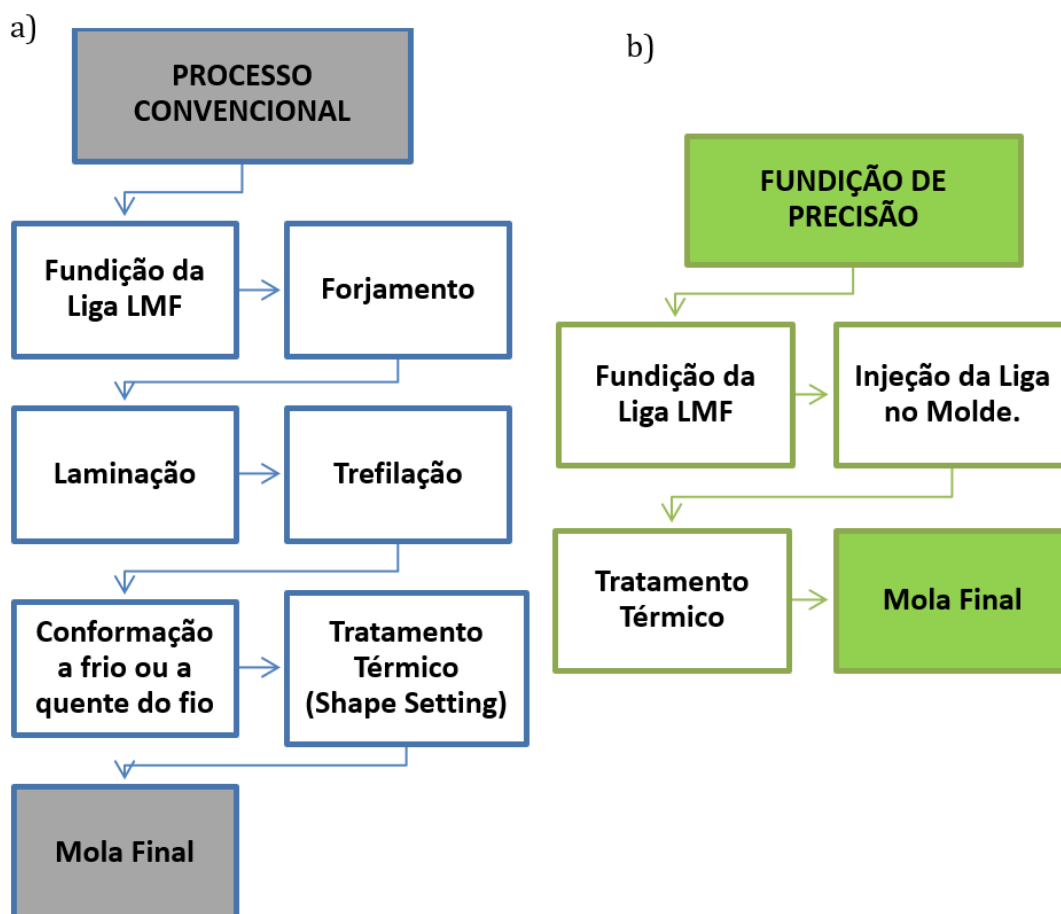
Dentre as diversas LMF, destacam-se aquelas do sistema níquel-titânio (Ni-Ti), que vêm sendo aplicadas, com bastante sucesso, principalmente nas áreas biomédica e odontológica (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Em razão de algumas particularidades, tais como a resistência a corrosão, biocompatibilidade, compatibilidade mecânica, além da incomum combinação de rigidez e ductilidade (MAHTABI; SHAMSAEI; MITCHELL, 2015). Nas áreas civil, estrutural, aeroespacial e automotiva, as aplicações comerciais são raras, por motivo das dificuldades de fabricação e alto custo envolvidos para tornar os projetos viáveis, porém numerosos estudos vêm sendo documentados, como aqueles que utilizam componentes do tipo mola produzidos com Ni-Ti (ELAHINIA, 2015). Os atuadores LMF do tipo mola são os mais utilizados, devido o deslocamento máximo e a força de recuperação superiores a atuadores lineares, além de apresentarem melhor relação peso potência como mostrado em Follador et al., (2012).

As molas LMF Ni-Ti são elementos mecânicos multifuncionais que funcionam como sensores ou atuadores, sendo estudadas em diversos sistemas mecânicos integrando as características mecânicas e a funcionalidade do material. Por isso é importante estabelecer a relação entre os parâmetros geométricos e o comportamento mecânico desses elementos como estudado por An et al. (2012), Savi et al. (2015), e Heidari et al. (2016). Para poder aplicá-las com êxito, por exemplo, no controle da vibração em equipamentos rotativos (AGUIAR; SAVI; PACHECO, 2012).

Molas helicoidais são geralmente fabricadas a partir da conformação fios a frio ou a quente. A utilização do processo de fundição de precisão (FP) para fabricação de molas helicoidais LMF é raro, apenas Stanciu et al (2009) se utilizou de tal processo para produzir e caracterizar termicamente um atuador tipo mola de LMF do sistema Cu-Al-Ni,

e Simões (2016) fabricou e caracterizou térmica e mecanicamente molas de LMF Ni-Ti. A fabricação de molas pelo processo FP têm algumas vantagens quando comparado ao processo convencional, demandando uma menor quantidade de etapas como pode-se visualizar no esquema da Figura 1. Sendo assim torna-se um processo de fabricação mais simples, menos moroso e menos oneroso.

Figura 1 – Comparação processos de fabricação de molas LMF (a) Processo Convencional; (b) Fundição de Precisão;



Fonte: Autoria Própria.

Neste contexto, o principal objetivo deste trabalho foi caracterizar térmica e mecanicamente molas helicoidais de LMF Ni-Ti ($M_{LMF}NiTi$), com características superelásticas, obtidas por fundição de precisão (FP), com diferentes configurações dimensionais, variando os parâmetros passo e diâmetro do fio. A exposição das $M_{LMF}NiTi$ a ensaios de tração estáticos e dinâmicos foi importante para avaliar a influência dos parâmetros dimensionais no comportamento mecânico. Com intuito de ampliar o

conhecimento sobre esses componentes para eliminar as barreiras que impendem o avanço de suas aplicações.

A partir dos resultados obtidos foi possível afirmar que as $M_{LMF}NiTi$ obtidas por fundição de precisão possuem um grande potencial para serem aplicados em sistemas mecânicos para redução e controle dos níveis de vibração, sendo possível garantir o caráter inovador deste trabalho, que irá servir de base para futuros estudos na área de estruturas ativas de LMF.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Projetar, fabricar e caracterizar térmica e mecanicamente molas helicoidais com diferentes configurações, mantendo o índice de mola constante e igual a 6, a partir de ligas com memória de forma Ni-Ti com propriedades funcionais de superelasticidade.

2.2. Objetivos Específicos

- Analisar a qualidade dimensional de $M_{LMF}NiTi$ obtidas por fundição por centrifugação;
- Estabelecer os limites de deformação máxima nas molas fabricadas;
- Determinar os ângulos dos passos com base nas dimensões de cada mola obtida;
- Avaliar o comportamento de propriedades como constante da mola (rigidez), módulo de cisalhamento, capacidade de dissipação de energia e capacidade de amortecimento das molas em função do passo e do diâmetro do fio;
- Avaliar a resposta mecânica das molas em função da frequência de carregamento.

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Breve Histórico das Ligas com Memória de Forma (LMF)

A descoberta da transformação martensítica termoelástica (fenômeno físico responsável pelo efeito da memória de forma em ligas metálicas) aconteceu por volta de 1890 por Adolf Martens, este foi um acontecimento importante para eventual descoberta de ligas com memória de forma (LMF) (LEXCELLENT, 2013).

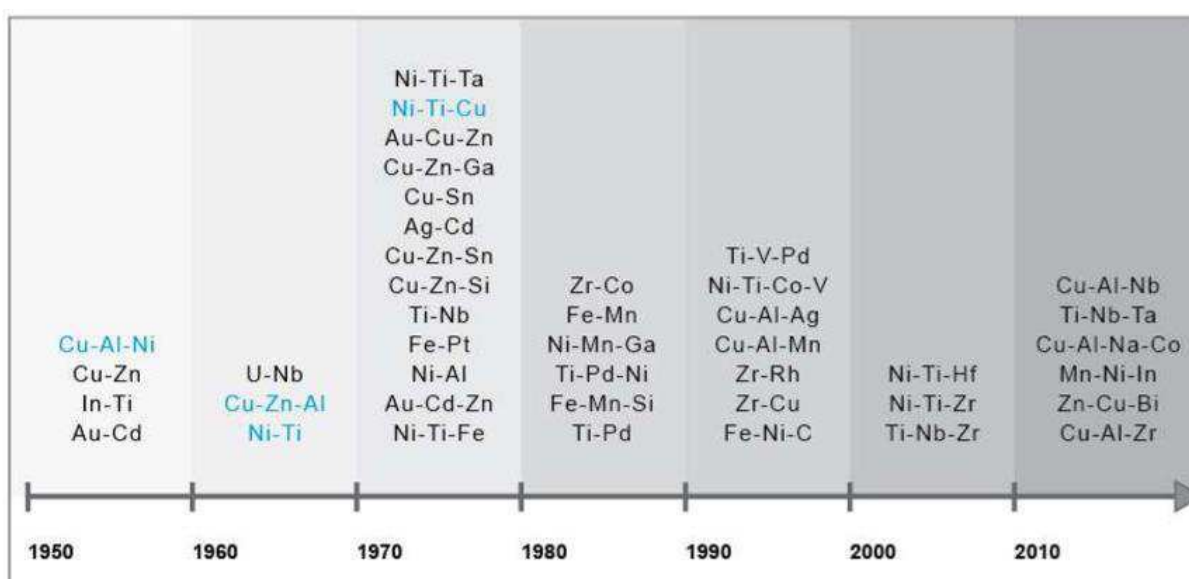
Em 1932 os estudos sobre o efeito memória de forma (EMF) iniciam com as primeiras observações do comportamento memória de forma relatadas por Arne Ölander em seu estudo do comportamento elástico em ligas de Ouro-Cadmio (Au-Cd). Em 1938 Greninger e Mooradina em seu estudo com ligas de cobre-zinco (Cu-Zn) também verificaram a formação da martensita termoelástica. Porém apenas alguns anos depois em 1951 Chang e Read identificaram e descreveram pela primeira vez as transformações de fase através das observações metalográficas e medições das resistências elétricas, também em um estudo com ligas de Au-Cd. Na sequência os efeitos pseudoelásticos foram encontrados em ligas de Índio-tálio (In-Tl) por Burkart e Read (1953) e em ligas de Cobre-Alumínio-Níquel (Cu-AL-Ni) por Rachinger (1958) (ZIOLKOWSKI, 2015).

Um avanço importante para aplicações das LMF, veio com a descoberta do EMF em ligas de Ni-Ti por Buehler, Gilfrich e Wiley (1963) no laboratório de Artilharia Naval Americana (do inglês, Naval Ordnance Laboratory, NQL), quando realizavam um estudo para encontrar um metal com um alto ponto de fusão e alta resistência ao impacto para ser aplicado no cone frontal de um míssil da Marinha Americana, curiosamente, o efeito foi descoberto pela diferença de sonoridade que uma barra de Ni-Ti faz quando está em diferentes temperaturas, sob altas temperaturas a barra ao ser jogada ao solo produziu um som semelhante a um sino e após ser resfriada e novamente jogada ao solo exibiu uma reposta acústica semelhante ao chumbo.

De fato, o interesse em LMF foi impulsionado após a descoberta do EMF em ligas Ni-Ti e intensificou-se quando Wang, Buehler e Pickart (1965) mostraram que a adição de um terceiro elemento nas ligas desse sistema, promoveu uma diminuição significativa nas temperaturas de transformação de fase (ZIOLKOWSKI, 2015), tal ocorrência resultou no ano de 1969 na primeira aplicação comercial bem sucedida das LMF, denominado CryoFit®, uma luva tubular que foi empregada em juntas hidráulicos instaladas em aeronaves Grummam F-14 da Marinha dos Estados Unidos (DUEBIG et al., 1990).

Com o desenvolvimento dos estudos foi possível constatar a presença do EMF também em ligas de ferro como nas ligas de ferro-platina (Fe₃-Pt) (WAYMAN, 1971), Ferro-Manganês-Silício (Fe-Mn-Si) (SATO et al., 1982) e Ferro-Níquel-Cobalto-Titânio (Fe-Ni-Co-Ti) (MAKI et al., 1984). Atualmente sabe-se que diversas ligas metálicas apresentam efeitos de memória de forma, mas três classes recebem atenção dominante, são elas as ligas do sistema Ni-Ti, a base de Cobre e ligas de Ferro, essas ligas têm capacidade de resposta reversível a estímulos externos de temperatura, alterando as suas propriedades físico-mecânica (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). Um histórico das descobertas do EMF nas ligas metálicas pode ser visualizado na Figura 2.

Figura 2 - Histórico das LMF descobertas nos últimos 60 anos.



Fonte: Adaptado de Simões, (2016).

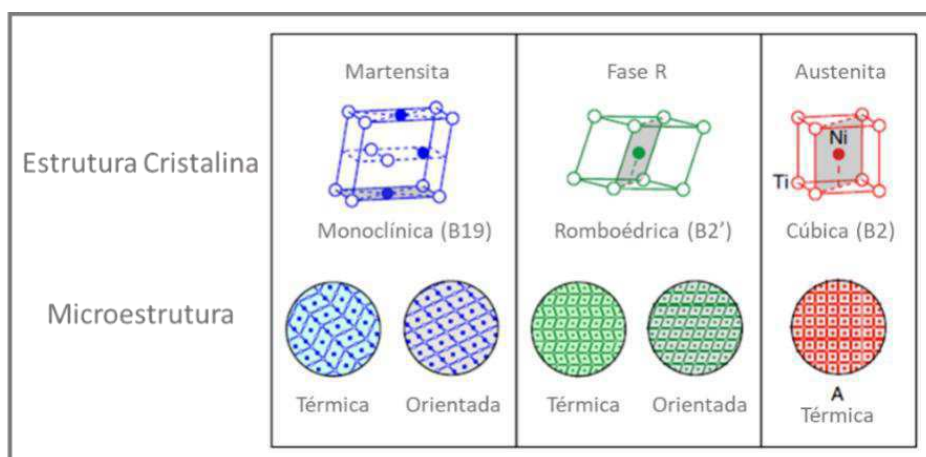
As propriedades especiais de materiais LMF estimulam o interesse em suas aplicações e as pesquisas vêm crescendo ano após ano. Até o ano de 2014, o número mundial de patentes de LMF estava estimado em mais de 20.000, conforme relatado por Jani et al. (2014). As pesquisas sobre LMF são discutidas em diversos eventos científicos. Os três principais eventos ligados as LMF são a Conferência Internacional de Memória de Forma (SMST), os Simpósios Europeus de Transformação Martensítica e Ligas de Memória de Forma (ESOMAT), e as Conferências Internacionais sobre Transformações Martensíticas (ICOMAT) (ZIOLKOWSKI, 2015).

3.2. Aspectos Gerais das LMF

A expressão “Memória de Forma” refere-se à capacidade de certos materiais em recuperar sua forma original (formato ou tamanho) ou alterar alguma de suas propriedades físicas (mecânicas, térmica ou elétrica), após grandes deformações elásticas e pseudo-plásticas, quando submetidas a um processo termomecânico (AGUIAR et al., 2013; JANI et al., 2014).

A principal característica de todas as LMF é a ocorrência de uma transformação de fase de estado sólido, conhecida como transformação martensítica (TM), que ocorre entre uma fase de alta temperatura austenita (Fase A) com estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (B2) de alta simetria e uma fase de baixa temperatura martensita (Fase M) com estrutura cristalina tetragonal, ortorrômbica ou monoclinica (B19) de baixa simetria. Algumas LMF como Ni-Ti podem formar uma fase intermediária durante a transformação entre as fases Austenita e Martensita que é uma distorção romboédrica da estrutura B2, conhecida como fase R (B2') (LAGOUDAS, 2008). A representação da estrutura cristalina e da microestrutura de cada fase é apresentada na Figura 3.

Figura 3 - Representação da estrutura cristalina e microestrutura de uma LMF típica.

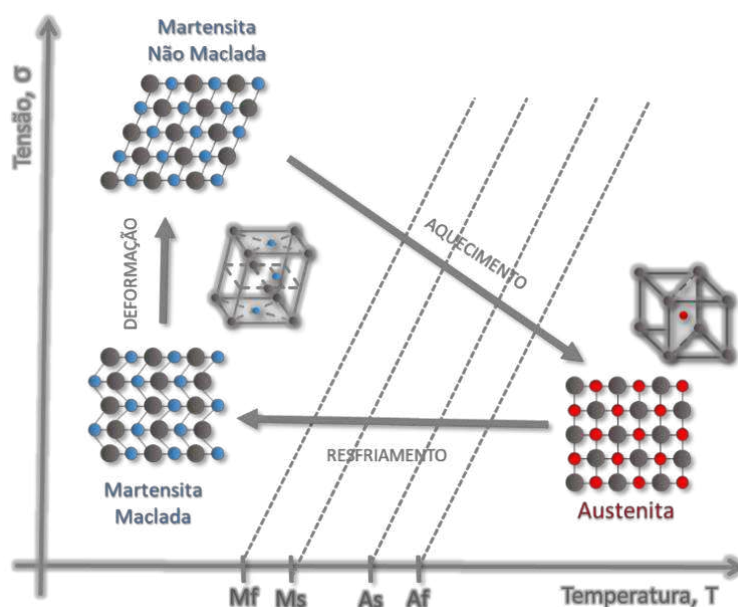


Fonte: Adaptado de Shaw; Churchill; Iadicola, (2008).

A funcionalidade das LMF surge das mudanças subjacentes microestruturais, quando submetidas a estímulos externos não mecânicos, como alterações de temperatura ou de campo magnético (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). A transformação de uma estrutura para outra não ocorre pela difusão de átomos e sim pela distorção da estrutura de cisalhamento (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

A transformação martensítica ocorre dentro de uma faixa de temperatura, por isso as LMF possuem quatro temperaturas distintas que as caracteriza na ausência de tensões: M_s , M_f , A_s e A_f . A temperatura M_f corresponde a temperatura abaixo da qual há somente presença de martensita. A temperatura A_f corresponde a temperatura, acima da qual, há apenas austenita estável. As temperaturas M_s e A_s correspondem respectivamente às temperaturas de início de formação da Fase M e Fase A (YAMAUCHI et al., 2011). Segundo Fernandes (2006), as 26 regiões de transformação de fase típicas para LMF se situam em faixas de temperatura que se estendem entre -200°C e 300°C . A Figura 4 expõe, de maneira simplificada, um processo de transformação de fase para uma LMF típica. Pode-se observar a transformação de Martensita não-maclada em Martensita Maclada abaixo da temperatura M_f pelo carregamento mecânico, e transformação de Martensita em Austenita por meio da variação de temperatura.

Figura 4 - Representação esquemática da transformação de fase em ligas LMF

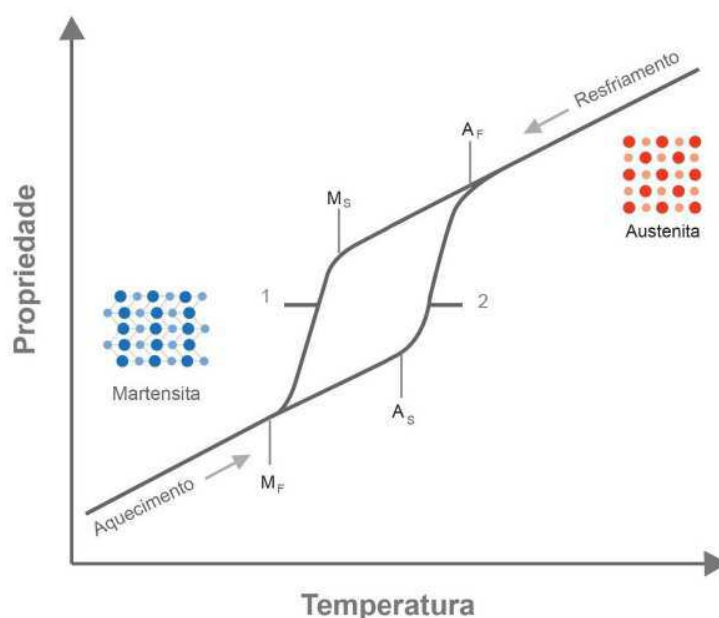


Fonte: Adaptado de Rao; Srinivasa; Reddy, (2015).

Praticamente, quase todas as propriedades físicas da Fase A e Fase M são diferentes, e assim, como nenhuma transformação passa exatamente pelos mesmos pontos, ocorrem mudanças significativas nas propriedades. A Figura 5 exemplifica o processo de transformação para uma propriedade ou parâmetro qualquer do material, observe que há uma histerese térmica (diferença entre energia liberada e absorvida durante as transformações de fase) associada a TM. As temperaturas de transformação

diferem com aquecimento e arrefecimento. Microscopicamente a histerese pode ser considerada como o atrito associado ao movimento dos contornos martensíticos (YAMAUCHI et al., 2011).

Figura 5 - Fenômeno de transformação de fase devido à variação de temperatura típica em LMF.



Fonte: Simões, (2016).

As mudanças na estrutura cristalina das LMF no estado livre de tensões, ocorrem da seguinte forma: Quando a LMF está com uma temperatura acima de A_f (onde o material é 100% austenítico) e sofre um resfriamento, converte-se em Fase M à temperatura M_s , e termina este processo à temperatura M_f . No procedimento reverso, quando a LMF está com uma temperatura abaixo de M_f . (onde o material apresenta uma estrutura 100% Martensítica) e é aquecida, transforma-se em Fase A à temperatura A_s e finaliza quando atinge a temperatura A_f . (Duerig et al., 1990).

A Tabela 1 apresenta as propriedades físicas, mecânicas e de memória de forma das LMF Ni-Ti, Cu-Zn-Al e Cu-Al-Ni. De acordo com as fontes são exemplos de ligas comercialmente utilizadas para projeto de atuadores. As propriedades apresentadas mostram a potencialidade das LMF de recuperar grandes deformações em torno de 8%. Diferente dos aços que conseguem atingir apenas 0,20% de deformação elástica em tração uniaxial, outro ponto que diferencia esses materiais dos aços é a resistência a tração na Fase M extremamente menor do que a Fase A. (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

Tabela 1 - Propriedades físicas, mecânica e de memória de forma de algumas LMF.

PROPRIEDADES	Und.	NiTi	CuZnAl	CuAlNi
Físicas				
Calor específico	J/kg°C	450 - 620	390 - 400	373 - 574
Condutividade Térmica (20°C)	W/mK	8.6 - 18	84 - 120	30 - 75
Densidade	g/cm ³	6.4 - 6.5	7.54 - 8	7.1 - 7.2
Resistividade Elétrica	10 ⁻⁶ Ωm	0.5 - 1.1	0.07 - 0.12	0.1 - 0.14
Mecânicas				
Modulo de Young's	GPa			
Martensita		28	70	80
Austenita		83	100	100
Resistência a Tração	MPa	500-900	400-700	300-600
Memória de Forma				
Deformação máxima de transformação	%	6 - 8	4 - 6	5 - 6
Coefficiente de Poisson		0.33	0.34	0.34
Histerese	°C	2 - 50	10 - 25	15 - 20
Capacidade de amortecimento	SDC - %	15	10-30	10-30
Faixa de temperatura de transformação	°C	(-200) a 200	(-200) a 150	(-200) a 200

Fonte: Adaptado de (Buehler; Wang, 1968; Duerig et al., 1990; Rao et al., 2015).

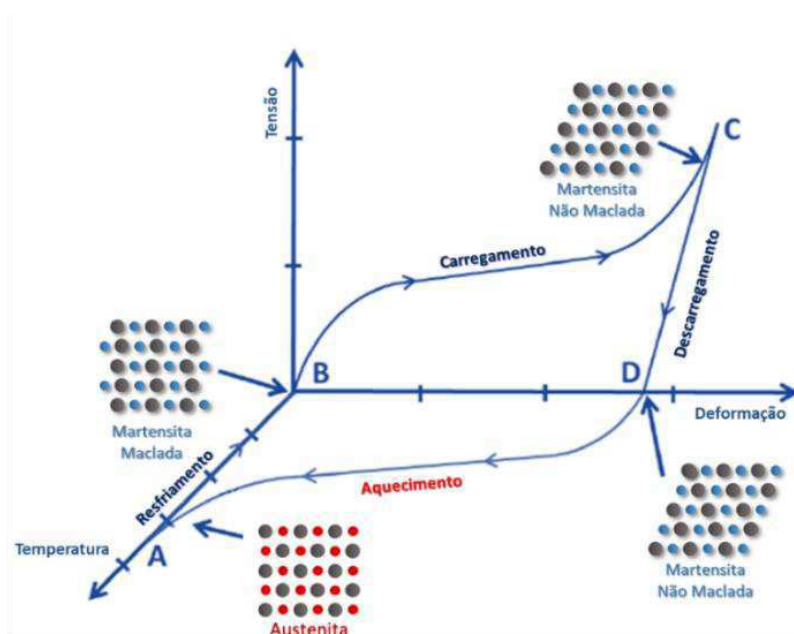
3.3 Comportamento Termomecânico das LMF

Na prática existem dois tipos de fenômenos macromecânicos: efeito de memória de forma (EMF) e superelasticidade (SE). No primeiro a transformação de fase é induzida termicamente, esta nomenclatura surgiu porque o material encontra-se inicialmente em sua Fase M, é deformado, passando de uma Martensita maclada para uma Martensita não-maclada ou reorientada e recupera sua forma inicial após o aquecimento, pela transformação em austenita. Após o resfriamento retorna a Martensita maclada inicial. Na SE a princípio o material encontra-se na sua Fase A, é deformado e transforma-se em Fase M, ao remover a carga, a Fase M converte-se em Fase A, recuperando sua forma física inicial (YAMAUCHI et al., 2011).

3.3.1 Efeito Memória de Forma

As transformações de fase características do fenômeno EMF são ilustrados na Figura 6. No ponto B a LMF está na fase Martensita maclada, então sofre carregamento provocando uma deformação, transformando-a em Martensita não-maclada (B -> C). Com a retirada da carga, a LMF mantém a forma deformada, com exceção da recuperação elástica (C -> D). Ao ser aquecida a uma determinada temperatura ($T > A_f$), a Martensita não-maclada transforma-se em Austenita recuperando sua forma inicial (D -> A). Com o resfriamento e após a liga se encontrar abaixo de uma determinada temperatura ($T < M_f$), a austenita transforma-se em Martensita não maclada (B).

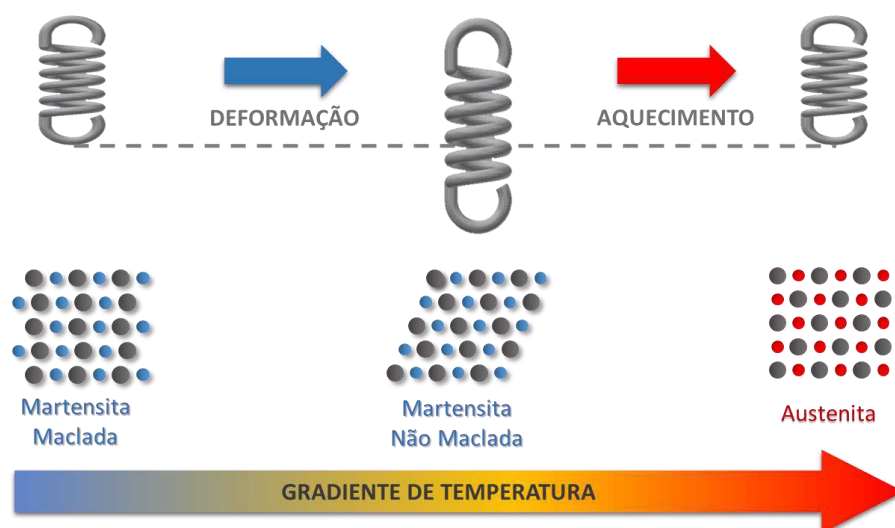
Figura 6–Curva característica de LMF em EMF no espaço tensão-deformação-temperatura.



Fonte: Adaptado de Rao; Srinivasa; Reddy, (2015).

Essa característica EMF está ilustrada na Figura 7 com auxílio de uma mola helicoidal. Uma mola que originalmente se encontra na fase martensítica ($T < M_f$), sofre um carregamento mecânico, que gera uma deformação aparentemente permanente e ao ser aquecida a uma determinada temperatura ($T > A_f$), recupera a forma anterior e a mola volta ao seu tamanho inicial.

Figura 7 -Esquema ilustrativo do EMF em uma mola helicoidal.



Fonte: Autoria Própria

3.3.2 Superelasticidade ou Pseudoelasticidade

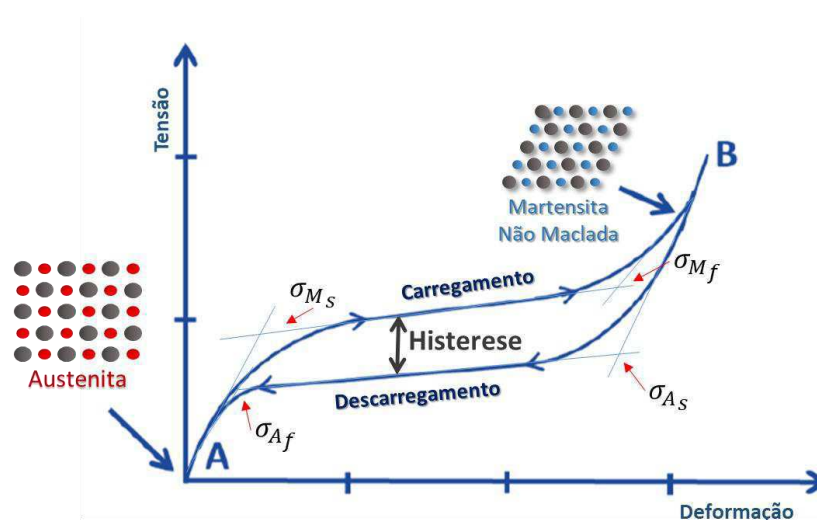
A superelasticidade, também conhecida como pseudoelasticidade é outro efeito notável exibido por LMF não encontrado em materiais metálicos convencionais. Basicamente trata-se da transformação de fase em estado sólido induzida por tensão (ZIOLKOWSKI, 2015). A Figura 8 ilustra um gráfico tensão-deformação exemplificando uma curva experimental de tal fenômeno obtida de um ensaio de tração, na qual se pode observar, as tensões críticas responsáveis pelo início e fim das transformações.

O material inicialmente na fase austenítica ($T > A_f$) é submetido a um carregamento mecânico, sua transformação de fase começa quando se atinge a tensão crítica de início de transformação martensítica (σ_{Ms}), finalizando sua transformação quando a tensão crítica de final de transformação martensítica (σ_{Mf}) 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_{As}), completando a transformação quando atinge a tensão crítica de final (σ_{Af})

Na Figura 8 também pode-se observar detalhes característicos desse gráfico. A princípio a amostra na sua Fase A, sofre um carregamento e apresenta um comportamento elástico linear, à medida que a força aumenta, a Fase A se transforma em Fase M induzida por tensão (A - B). A formação da Fase M pode ser identificada, com o aumento da complacência da resposta tensão-deformação (região de declive diminuído na curva de carga). Ao completar a transformação em Fase M Inicia-se a zona de

elasticidade desta fase, observada com retorno da região de aclave próximo ao ponto (B). Por outro lado, após a retirada da carga, a Fase M converte-se em Fase A (B - A) e a deformação é totalmente recuperada. Associado as transformações de fase no estado superelástico observa-se uma histerese mecânica como a diferença entre as curvas superior (carga) e inferior (descarga).

Figura 8–Curva característica de tensão-deformação de uma LMF em regime de superelasticidade.

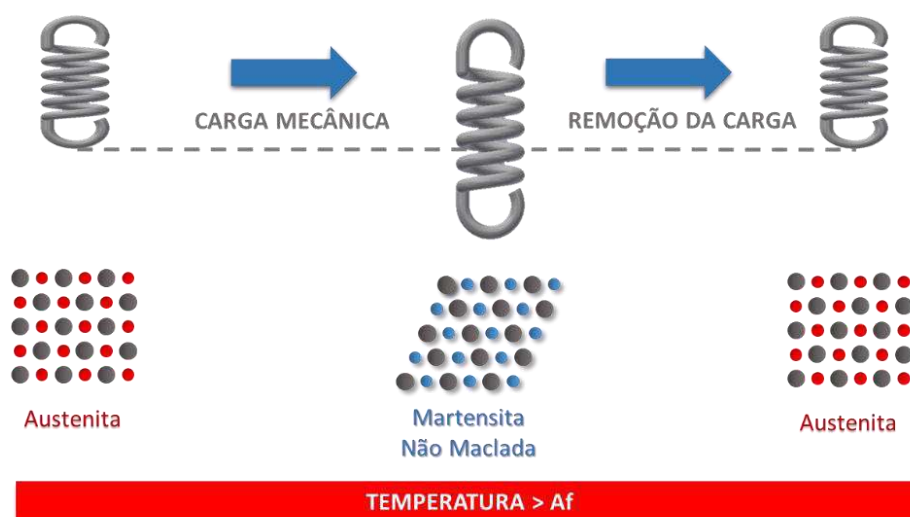


Fonte: Adaptado de Rao; Srinivasa; Reddy, (2015).

O prefixo pseudo citado anteriormente no nome do fenômeno enfatiza o fato do ciclo de carregamento e descarregamento de um material LMF, diferentemente de um material elástico linear, exibe um loop de histerese no espaço tensão-deformação. O tamanho do ciclo de histerese depende de muitos fatores, como por exemplo, a composição química e / ou tratamento termomecânico (GRASSI, 2014). Como descrito anteriormente a histerese mecânica é a diferença entre a energia recebida pelo material para se deformar e a energia liberada na recuperação da deformação, isso implica dizer que o material tem capacidade de dissipar uma parte da energia utilizada para realizar o ciclo superelástico.

O regime SE é ilustrado na Figura 9 com auxílio de uma mola helicoidal. Uma mola que originalmente se encontra na fase austenítica, sofre um carregamento mecânico em temperatura ($T > A_f$), que gera uma deformação aparentemente permanente, ao ser retirada a carga mecânica recupera a forma anterior e a mola volta ao seu tamanho inicial.

Figura 9 - Esquema ilustrativo do SE em uma mola helicoidal.

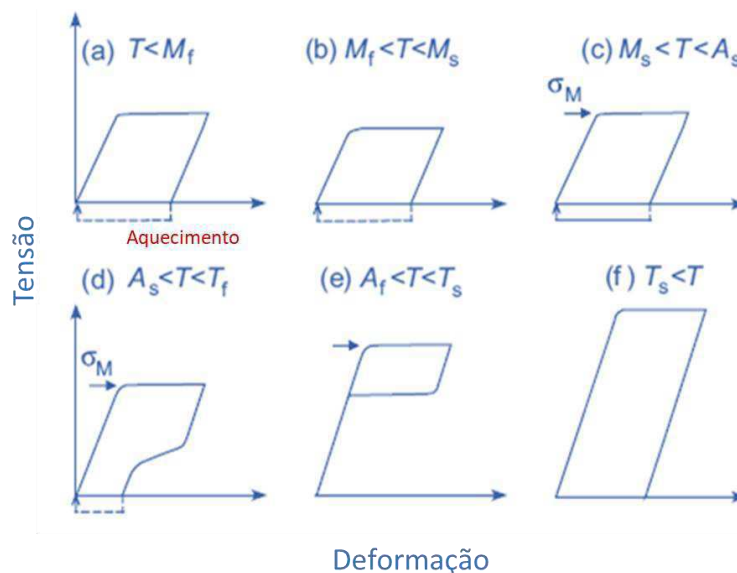


Fonte: Autoria Própria.

Os dois fenômenos encontrados em LMF, apresentam sensibilidade a temperatura, que pode influenciar diretamente no tipo de fenômeno presente, assim como, nas propriedades do material, isso se deve ao fato de a deformação estar associada à TM, diferentemente dos metais e ligas convencionais que a deformação plástica ocorre por escorregamento (MIYAZAKI; SACHDEVA, 2009)

Verifica-se na Figura 10 que o aumento dos níveis de temperatura pode alterar o comportamento do material de EMF para SE e pode influenciar nas propriedades como a rigidez. Em (a), (b) e (c) após o carregamento o material é deformado e após o descarregamento mantém uma deformação residual, pois a temperatura está abaixo de A_s . Nos gráficos (d) e (e) onde as temperaturas são respectivamente superiores a A_s e A_f . A deformação induzida se recupera parcialmente e totalmente, respectivamente. No gráfico (f) a LMF tem comportamento similar à de metais comuns pois a amostra está em uma faixa de temperatura acima da Temperatura crítica (T_s) na qual não ocorre TM e a deformação ocorre por deslizamento.

Figura 10 - Curva esquemática tensão-deformação em liga Ni-Ti obtidos em diferentes temperaturas.



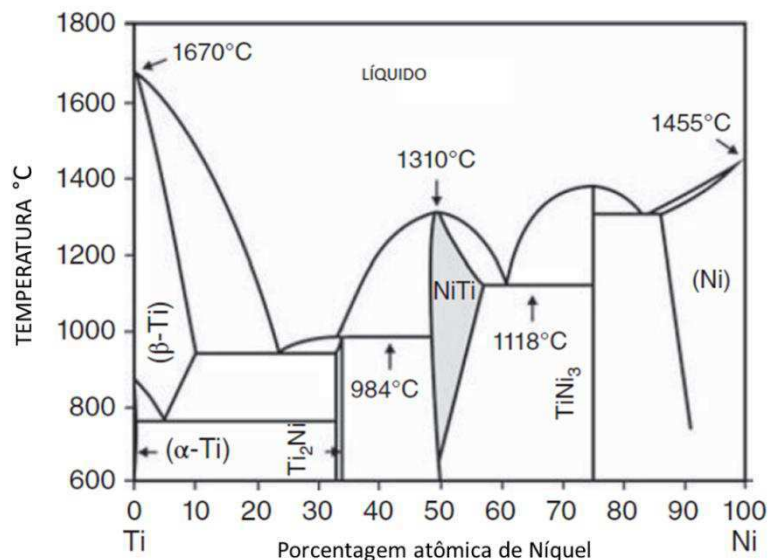
Fonte: Adaptado de Miyazaki e Sachdeva (2009).

3.4. LMF Ni-Ti

As Ligas do sistema Ni-Ti, também conhecidas por NITINOL, até 2015, representavam 90% das aplicações comerciais das LMF, devido as excelentes propriedades estruturais e funcionais, possui uma combinação incomum de resistência e ductilidade, que supera outras LMF comercializadas. Além da resistência a corrosão comparável ao aço inoxidável, promovido pelo filme superficial de dióxido de titânio (TiO_2), (WORDEN; BULLOUGH; HAYWOOD, 2003; ELAHINIA, 2015).

A Figura 11 mostra o diagrama de fase da LMF Ni-Ti. É possível observar que as composições de LMF e Ni-Ti estão em torno da composição equiatômica, ou seja, 50% de níquel e 50% de titânio (em %at). A presença do fenômeno memória de forma nessas ligas também está condicionada a essa faixa de composição, por isso é importante entender o diagrama de fase para manipular as propriedades e características dessa liga por meio da sua composição química.

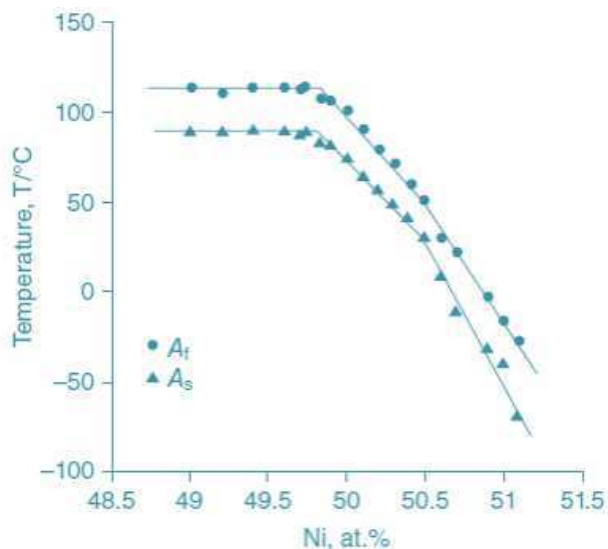
Figura 11 - Diagrama de equilíbrio da LMF binária Ni-Ti.



Fonte: Adaptado de Massalski, ASM International (1996)

O comportamento termomecânico é bastante sensível as alterações de composição da liga, e a diferença de apenas 0,1% desta composição pode alterar as temperaturas de transformação em mais de 20°C (WORDEN; BULLOUGH; HAYWOOD, 2003). Segundo Otsuka e Wayman, (1998), as ligas de Ni-Ti que possuem percentuais atômicos acima de 50,5 % de Ni, são consideradas ricas em Ni, resultado que favorece a pseudoelasticidade a temperatura ambiente, como podemos observar na Figura 12 que apresenta a relação entre a composição e a temperatura de transformação da Austenita.

Figura 12 - A relação entre a composição do Ni-Ti e as temperatura de transformação da austenita.

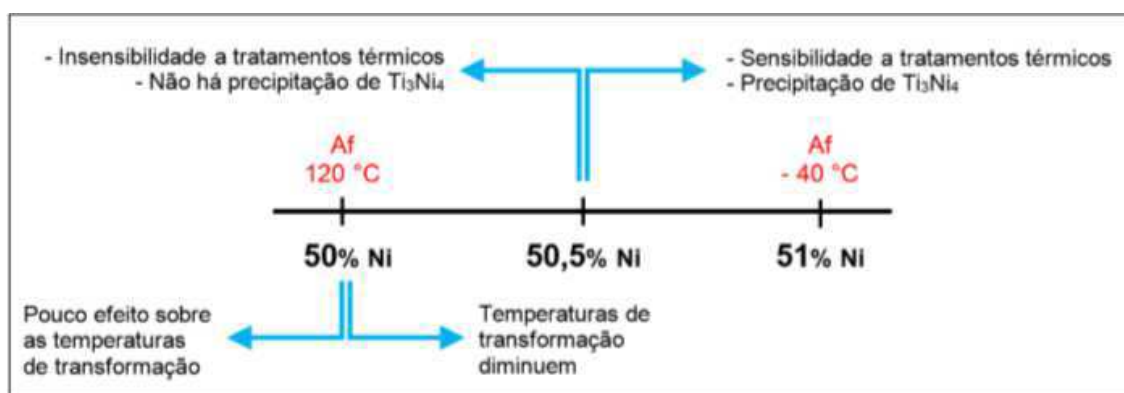


Fonte: Adaptado de Hosoda and Miyazaki (2001).

A temperatura de transformação é controlada principalmente pela concentração de Níquel, como mostrou o estudo de Ramos, (2012), onde a adição de níquel em uma liga 51%Ni-49%Ti em percentual atômico é capaz de reduzir a temperatura A_s em aproximadamente 100 °C e praticamente triplicar a tensão de indução da martensita a partir da austenita.

Outra forma de controlar a temperatura de transformação de fase é através dos tratamentos térmicos, segundo Otsuka e Wayman (1998) tratamentos térmicos podem alterar as propriedades da liga de SE para EMF, por isso a manufatura e posteriores processamentos dessas ligas devem ser rigorosamente controlados. GRASSI (2014) sintetizou os efeitos da adição de Níquel e tratamentos térmicos no comportamento de minimolas comerciais de Ni-Ti por meio do esquema ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Esquema ilustrativo do efeito da adição de Ni (%at) no comportamento térmico em LMF Ni-Ti



Fonte: Grassi (2014).

A LMF Ni-Ti está disponível comercialmente em uma ampla gama de composições e diversas formas como fios, hastes, placas, tubos e molas. Essas ligas têm aplicação consolidada nas áreas médica e odontológica (Yoneyama e Miyazaki, 2009; Yahia, 2000) e novas aplicações têm se estendido a diversas áreas industriais, devido à descoberta das suas propriedades ao longo dos anos (MAHTABI; SHAMSAEI; MITCHELL, 2015).

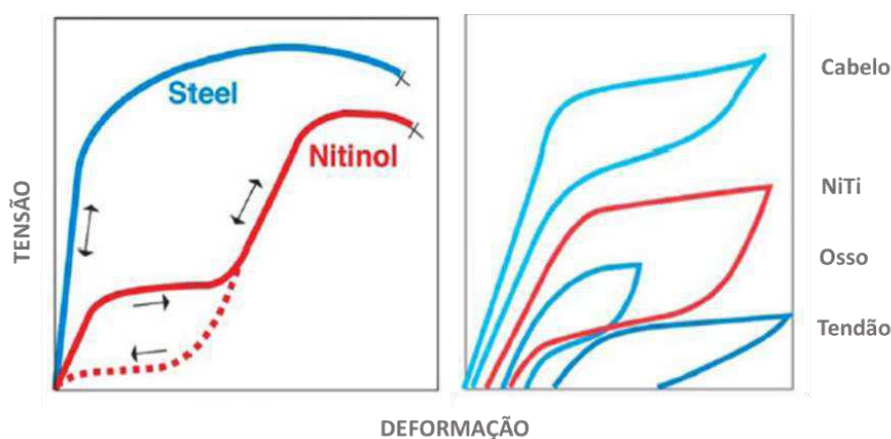
Na engenharia biomédica, a liga ampliou sua popularidade por causa da sua biocompatibilidade, que é a capacidade do material permanecer biologicamente inócuo dentro de um organismo vivo durante o seu período funcional (SHABALOVSKAYA, 1995; RYHÄNEN J, 1999), apesar do Níquel ser bastante tóxico e poder causar complicações por qualquer contato com o corpo (MACHADO; SAVI, 2003). Estudos clínicos comprovaram níveis de contaminação mínima do níquel devido ao uso da liga Ni-Ti, fato justificado pelas

ligações intermetálicas fortes entre Ni e Ti e da camada protetora de TiO_2 que evita o contato do níquel direto com o corpo (DUERIG; PELTON; STÖCKEL, 1999).

O sucesso das aplicações na área biomédica não depende apenas da biocompatibilidade e de suas propriedades funcionais de memória de forma, mas também por causa de sua resposta única tensão-deformação, que se assemelham aos de outros tecidos biológicos. O módulo de Young martensítico que é aproximadamente 28 GPa, é equiparável ao módulo de Young do Osso que é cerca de 20 GPa (DUERIG; PELTON; STÖCKEL, 1999; BISCARINI; MAZZOLAI; TUISSI, 2008; ZIOLKOWSKI, 2015).

A similaridade das propriedades mecânicas de um implante com a do osso natural, facilitam e aceleram o processo de cicatrização dos ossos quebrados, porque evita o chamado fenômeno de proteção óssea (BISCARINI; MAZZOLAI; TUISSI, 2008). A Figura 14 compara a liga Ni-Ti com outros tecidos biológicos e o aço em curvas tensão-deformação.

Figura 14 - Curva característica tensão-deformação comparativa de materiais naturais, aço e a liga NiTi, a temperatura do corpo.



Fonte: Melzer e Stoeckel (2010).

No campo industrial a boa relação massa/potência, facilidade de manutenção e boa confiabilidade, potencializa a utilização do Nitinol para controle de movimento e acionamento, oferecendo várias vantagens para miniaturização dos sistemas (ELAHINIA, 2015). Della Corte (2010) relatou que o chamado Nitinol 60, um material com 60% em peso de níquel (55% atômico), exibe excelentes propriedades tribológicas, ou seja, possui um coeficiente de atrito muito baixo no regime de lubrificação de contorno e baixa taxa de desgaste. O nitinol 60 possui resistência ao desgaste, em torno de duas a três vezes menor do que o aço 440C, também é 25% menos denso do que o aço, o que prolonga a

vida útil dos mancais, pois limita as forças centrífugas. Essas características colocam esse material como um dos principais candidatos a serem utilizados em rolamentos de alto desempenho que operam em espaçonaves.

A capacidade de trabalhar durante a transformação fase permite o uso do Ni-Ti serem aplicados como atuadores de alta força com funções sensoriais e de atuação (OTSUKA E WAYMAN, 1998). O comportamento histerético resultado da transformação de fase, possibilita a aplicação como elementos elásticos com função de amortecimento intrínseco (CZECHOWICZ; DÜLTGEN; LANGBEIN, 2013) ou para atenuação de vibração de forma passiva ou ativa, como demonstrado recentemente por Holanda et al. (2014), Enemark e Santos (2016) e Oliveira (2017).

3.5. Estado da Arte em Molas Helicoidais de Ni-Ti

Um dos principais produtos fabricados a partir do Ni-Ti são as molas helicoidais. A vantagem desse produto é sua grande capacidade de deslocamento comparado com um fio. (YAMAUCHI et al., 2011). Outras vantagens das molas quando comparadas com os fios é a capacidade de trabalhar sob tensão ou compressão e seu potencial para aumentar a transferência de calor, conseguido, por exemplo, por arrefecimento convectivo forçado em áreas compactas ou criando molas a partir de tubos (SPINELLA; DRAGONI, 2009). Assim, há necessidade de entender o desempenho termomecânico dos atuadores helicoidais LMF com o objetivo de obter diretrizes para seu projeto, fabricação e uso.

Esses componentes têm o potencial de revolucionar completamente o projeto de uma ampla variedade de dispositivos (STOECKEL, 1990). As características únicas do EMF e da SE discutidas anteriormente nas LMF Ni-Ti fez o material ser escolhido em diversos estudos e aplicações que vão desde sensoriamento e controle, amortecimento de vibrações, áreas biomédicas, automotivas e aeroespaciais (STOECKEL, 1990; LAGOUDAS, 2008; RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015).

Dentre as diversas aplicações na medicina e odontologia podemos destacar o estudo de Amerinatanzi et al. (2017) que analisaram em seu trabalho um caso específico de aplicação ortopédica e comparou o desempenho de uma mola superelástica de Ni-Ti e uma mola de aço inoxidável aplicado em um suporte articulado para tornozelo tipo AFO que vêm do inglês Ankle Foot Orthosis (Figura 15). No trabalho foram utilizadas molas

superelásticas devido seu comportamento não linear dentro da dobradiça com intuito de recriar a rigidez normal da articulação de tornozelo.

Figura 15 - Suporte de tornozelo específico de um paciente.

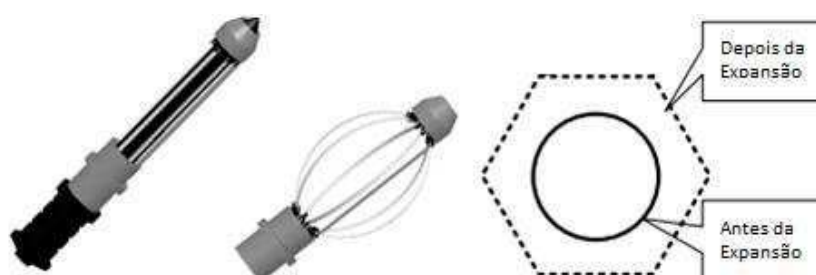


Fonte: Amerinatanzi et al. (2017).

No trabalho de Liu et al. (2011) um dispositivo composto por tiras e molas de Ni-Ti (Figura 16), foi proposto como alternativa para solucionar problemas gerados nas cirurgias endoscópicas transanal, na qual é necessária a expansão da cavidade, porém os dispositivos até então propostos utilizavam a insuflação com dióxido de carbono (CO_2) ou expansão mecânica, que respectivamente tem risco de contaminação para cavidade peritoneal e de perfuração da parede retal.

O dispositivo consiste em duas partes, uma parte é acionada por molas sob EMF e outra parte com as tiras SE, Quando a mola é aquecida a uma determinada temperatura, comprime e gera uma tensão de recuperação para dobrar as seis tiras e abrir a parede retal. Antes de retirar o dispositivo, o aquecimento é cortado, após o resfriamento, a mola retoma sua fase inicial martensítica e as tiras conseguem retornar a sua forma original deformando as molas.

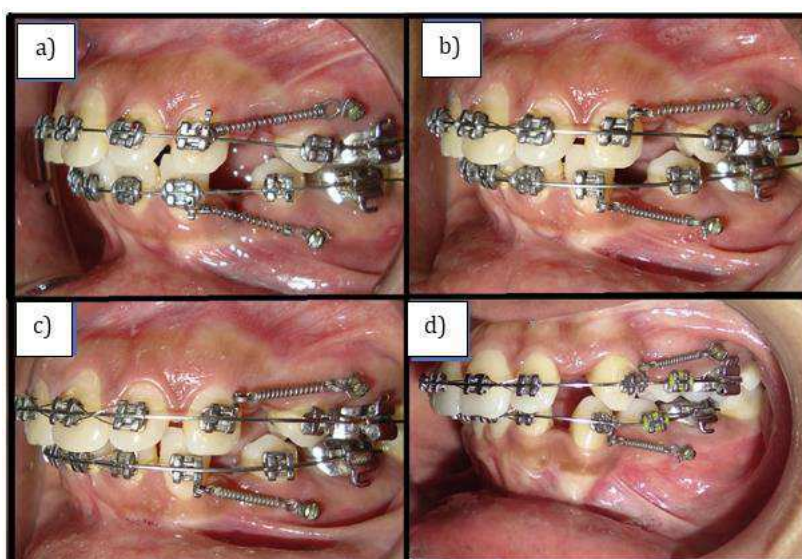
Figura 16 - Dispositivo de expansão composto com tiras e molas de NiTi



Fonte: Liu et al. (2011)

No campo odontológico as molas Ni-Ti são utilizadas em muitas aplicações, geralmente é empregada para fechamento de espaço e movimentação dentária pela sua capacidade de fornecer forças constantes, (SPINELLA; DRAGONI; STORTIERO, 2010). O diâmetro do fio da mola é selecionado de acordo com a força necessária (THOMPSON, 2000). Khanna et al. (2014) avaliou em um estudo clínico a retração dos dentes canino, após a colocação de molas e implantes de Ni-Ti, conforme apresentado na Figura 17.

Figura 17 - Mola helicoidal fechada de níquel-titânio usada para fechamento de espaço e retração anterior. As imagens a, b, c e d mostram 4 estágios do tratamento.

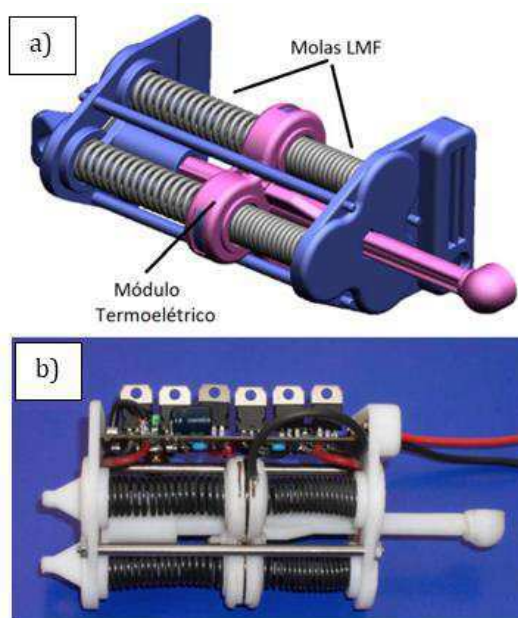


Fonte: Adaptado de Khanna et al. (2014)

Os atuadores de mola são componentes essenciais nos veículos, pois são usados para controle de temperatura, ventilação de frenagem, controle do motor e gerenciamento de combustível, transmissão e suspensão, para melhorar a segurança e confiabilidade e aumentar o conforto do motorista. No entanto, os atuadores existentes são pesados e onerosos (STOECKEL, 1990). Substituir os atuadores comuns por atuadores de molas de Ni-Ti, seria uma boa alternativa, pois as molas LMF possuem maior força de recuperação e deslocamento (FOLLADOR et al., 2012). Uma aplicação automotiva que explora o comportamento EMF com objetivo de sensor e atuador é a mola de Ni-Ti projetada pela empresa Furukawa Techno Material para a transmissão variável contínua (câmbio CVT) do carro Mercedes-Benz Classe A e Classe B. O atuador funciona como um sensor, monitora a temperatura e aciona uma válvula a temperatura específica, que altera a direção do fluxo de óleo. (LAGOUDAS, 2008).

Em um outro trabalho, Bellini, Colli e Dragoni (2009) apresentaram um protótipo de um sistema inovador para o acionamento do coletor de admissão de ar em motores de combustão interna. O protótipo pode ser visto na Figura 18, basicamente ele é constituído de dois conjuntos de molas Ni-Ti que são usadas para gerar força de atuação e o módulo termoelétrico com função de controle de corrente.

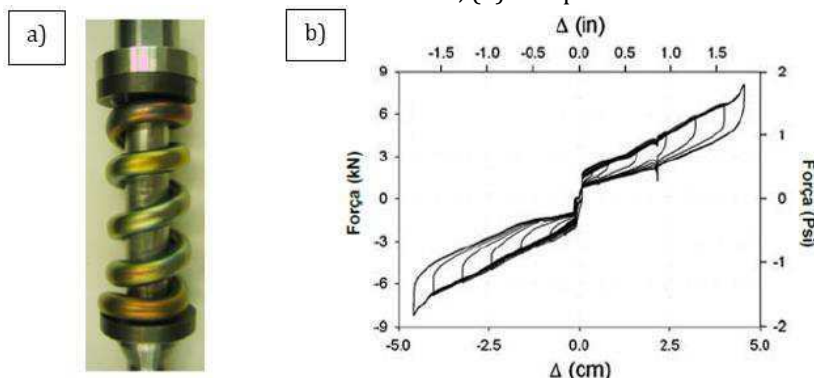
Figura 18 – Protótipo para acionamento do sistema de admissão de ar em motores de combustão (a) Protótipo modelado em CAD; (b) Protótipo montado para teste.



Fonte: Adaptado Bellini, Colli e Dragoni (2009).

Nos últimos 20 anos, estudos analíticos, experimentais e aplicações de construção mostraram a eficácia do uso das LMF no isolamento sísmico de edifícios, pontes e estruturas industriais. Neste contexto, diversos estudos com molas LMF vem sendo realizados como elementos amortecedores em pontes, prédios e sistemas de resistência sísmica devido a sua excelente capacidade de dissipar energia e de centralização. Speicher et al, (2009) desenvolveram dispositivos com molas helicoidais de Ni-Ti com comportamento superelástico para promover a centralização de um edifício. Na Figura 19 (a) é possível observar o dispositivo com a mola e na Figura 19 (b) mostra o comportamento mecânico que comprova a capacidade de amortecimento do dispositivo.

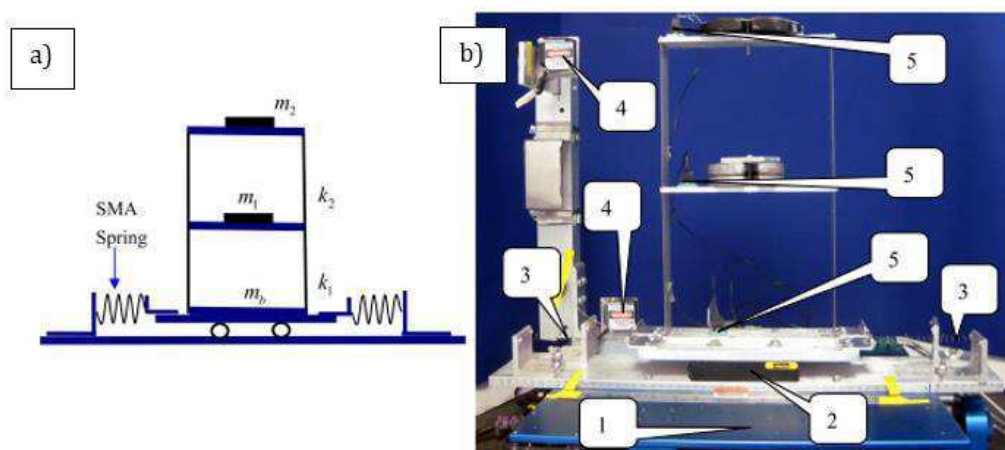
Figura 19 – Dispositivo com mola LMF para aplicação em edifício sujeito a abalo sísmicos. (a) dispositivo utilizando mola helicoidal de LMF Ni-Ti; (b) Comportamento mecânico.



Fonte: Adaptado de Speicher et al, (2009).

Huang *et al.* (2014) desenvolveram e analisaram um sistema de isolamento com base passiva, composto principalmente de molas superelásticas. A estrutura experimental é composta de dois andares conforme mostrado na Figura 20, os resultados experimental e numérico indicam que o sistema de isolamento pode suprimir sensivelmente as vibrações estruturais, e tem resultados de amortecimento superiores quando comparados aos obtidos com molas de aço.

Figura 20 - Estrutura experimental utilizada para avaliar o isolamento sísmico com molas SE: (a) Modelo base de isolamento; (b) Estrutura de aço de dois andares; 1) Mesa de agitação; 2) Controle deslizante; 3) Mola LMF SE; 4) Sensor de Deslocamento; 5) Acelerômetro

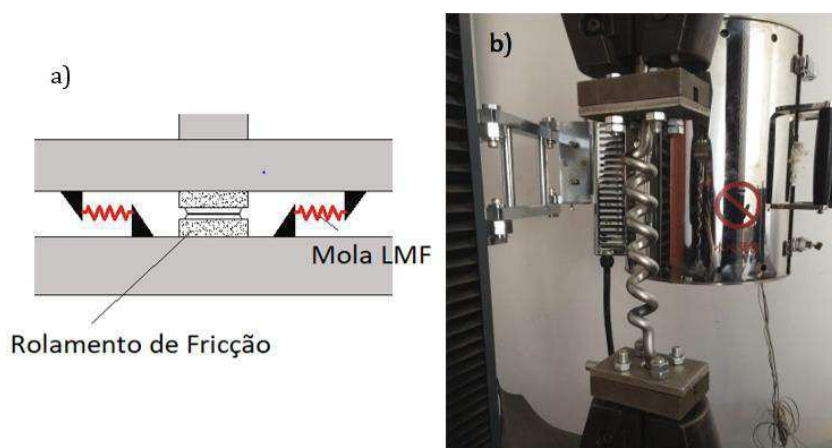


Fonte: Adaptado Huang *et al.* (2014)

Em um outro trabalho, numérico experimental Zhuang *et al.* (2016) avaliaram o desempenho histerético de um novo tipo de isolador também para proteção sísmica, composto por molas LMF e um rolamento de atrito ao qual denominaram SFB sigla do inglês *SMA spring-friction-bearing*. A montagem do dispositivo e os ensaios mecânicos

podem ser visualizados nas Figura 21(a) e Figura 201(b). Os resultados demonstraram que o SFB possui excelente capacidade de dissipação de energia e moderada capacidade de recentramento da estrutura.

Figura 21 – Isolador sísmico com Molas LMF: (a) Diagrama esquemático do SFB; (b) Mola LMF em teste mecânico.



Fonte: - Adaptado Zhuang et al. (2016)

Em função do amortecimento intrínseco, as LMF também podem ser usadas como elementos elásticos em aplicações industriais em máquinas diversas, como Czechowicz e Langbein (2015) que fabricou válvulas termomecânicas e Oliveira (2017) que fabricou um mancal protótipo adaptativo empregando molas de Ni-Ti (Figura 22), com intuito de diminuir a vibração do sistema com a mudança de rigidez em função da temperatura.

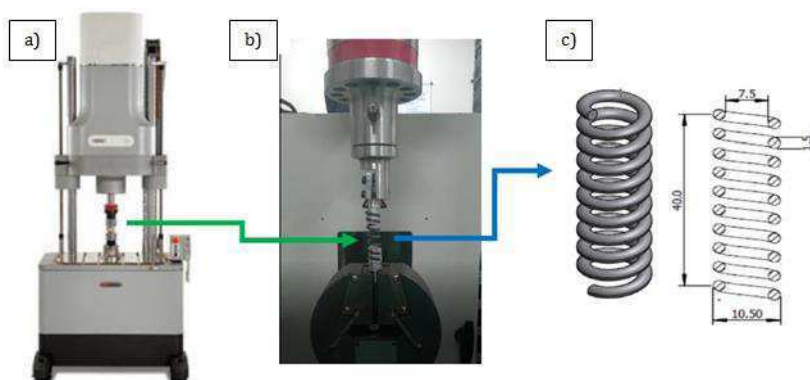
Figura 22 – Protótipo de mancal adaptativa com molas LMF.



Fonte: Oliveira (2017).

Simões (2016) e Santiago et al (2017) avaliaram o comportamento térmico e mecânico de molas helicoidais Ni-Ti obtidas por fundição de precisão, os resultados mostraram que as molas suportaram deformações reversíveis da ordem de 80%. Na Figura 23 pode-se observar a montagem dos ensaios experimentais realizados nas pesquisas.

Figura 23 - Ensaio Mecânico de Molas LMF Ni-Ti. (a) Máquina de ensaios (b) Montagem do teste. (c) Desenho da mola.



Fonte: Santiago et al (2017).

Dentro desse contexto, fica evidente o grande potencial em fabricar esses componentes. Com isso espera-se conseguir parâmetros equivalentes entre as molas fabricadas por fundição de precisão e molas fabricadas por conformação de fios comerciais, incluindo a capacidade de recuperar a sua forma inicial quando submetida a deformações no estado superelástico, além de um melhor entendimento sobre a relação geométrica e propriedades mecânicas em molas obtidas por esse processo.

3.6. Fabricação do Ni-Ti e seus atuadores.

Quando se trabalha com ligas LMF, para obter as propriedades funcionais desejadas, é essencial conhecer e compreender o processo de fabricação envolvido na sua produção. As Ligas Ni-Ti comercialmente disponíveis são fabricadas com diferentes composições e propriedades, conforme especificado pelo fabricante, mas essas propriedades podem variar com base na técnica de fabricação utilizada e apenas uma pequena parte desses processos são publicados.

A fabricação do nitinol segue os mesmos procedimentos de fabricação de ligas de titânio. Como o titânio forma facilmente óxidos, carbonetos e nitretos, um processo de

fusão a vácuo é essencial para garantir uma boa homogeneidade da liga. As principais técnicas utilizadas na obtenção de LMF são a fundição e a metalurgia do pó (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015).

As técnicas de fundição são as mais aplicadas para a produção em larga escala, onde geralmente são realizados trabalhos posteriores de conformação mecânica e processos de usinagem, a metalurgia do pó por sua vez é utilizada para produção em pequena escala, principalmente para aplicações biomédica, pois as características de porosidade advindas desse processo são ideais para essas aplicações (ELAHINIA et al., 2012). Os processos mais comuns de fundição da LMF Ni-Ti são: Fusão por Indução a Vácuo (VIM), Refusão por Arco a Vácuo (VAR), Fusão por Feixe de Elétrons (EBM), fusão por arco de plasma (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015) e fusão a plasma (Plasma Melting PAM) (OTSUKA & WAYMAN, 1998).

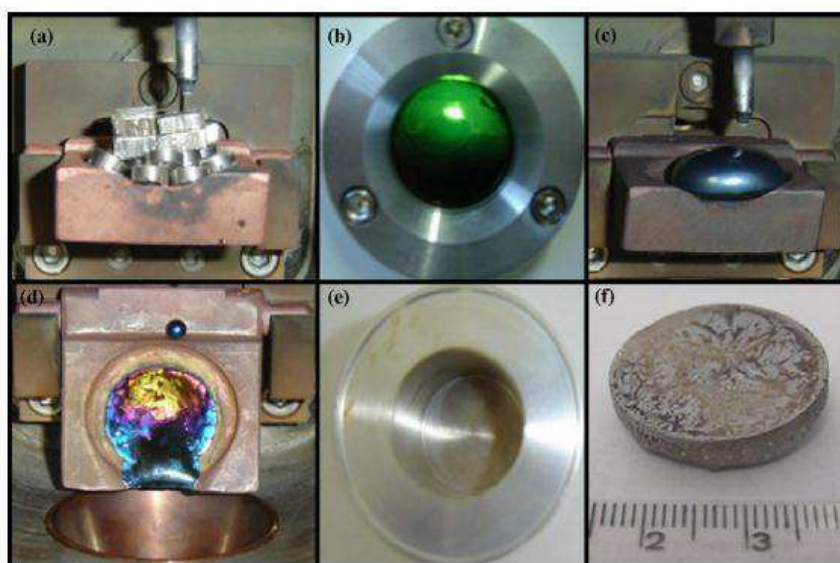
No processo VIM, os materiais Ni e Ti de alta pureza são colocados em um cadinho de grafite para fusão simultânea sob vácuo ou atmosfera de gás inerte. Correntes elétricas produzidas por uma bobina de indução são usadas para fundir os elementos Ni e Ti que puros tem as temperaturas de fusão de 1455°C e 1670°C, respectivamente (FRENZEL et al., 2004), felizmente o ponto de fusão da liga estequiométrica Ni-Ti é 1310°C, que fica abaixo de 1450°C considerada uma temperatura impraticável pelos níveis de carbono que o níquel absorveria durante o processo. No método VAR utiliza-se um eletrodo consumível ou não consumível composto de Ni e Ti puro e o aquece usando arco de argônio para formar um botão ou lingote cilíndrico (ELAHINIA et al., 2012).

O método de fundição EBM usa feixe de elétrons para fundir os elementos em um cadinho de cobre resfriado a água sob condições de alto vácuo. O Processo é conhecido desde a década de 1950 para refinar metais refratários, porém seu uso para produzir Ni-Ti não era comum até Otubo et al (2003) validar sua aplicabilidade. Devido às altas condições de operação, é difícil controlar a composição nominal do Ni-Ti e, assim, as temperaturas de TM são afetadas

O método de fusão por arco de plasma (PAM) usa um feixe de elétrons de baixa velocidade que é descarregado a partir de um cátodo plasma. De acordo com Otsuka e Wayman (1998), a irradiação de elétrons a partir do cátodo de plasma é mais suave do que os outros processos. Portanto, a técnica de PAM resulta em baixa perda dos elementos de liga e apresenta composição no lingote uniforme, apesar do uso de molde resfriado com água.

Além das técnicas de fabricação acima citadas, De Araújo et al. (2009) validou a fabricação de LMF utilizando o processo de fusão e conformação chamado de Plasma Skull Push- Pull (PSPP). Nesse processo a LMF Ni-Ti é fundida num cadinho de cobre e depois é injetada em molde metálico. Os autores, declaram que a LMF é produzida com extrema rapidez e boa homogeneidade, após cinco ciclos de fusão e refusão. Ao final dos ciclos, o metal líquido é injetado em um molde, criando um padrão semelhante a um botão, utilizado para fabricação de pequenos produtos semiacabados, como pastilhas, tubos, barras, entre outros. A Figura 24 apresenta a sequência do processo PSPP.

Figura 24–Sequência de fusão e injeção utilizando o processo PSPP: (a) matérias-primas, (b) tocha rotativa de plasma, (c) botão LMF, (d) resíduo de LMF no cadinho após a injeção, (e) molde metálico, (f) pastilha LMF.



Fonte: De Araújo et al. (2009).

Após a fabricação da Liga Ni-Ti em formatos robustos (barras, lingotes, tarugos, etc.), é preciso utilizar outras técnicas de processamento para transformá-las em geometrias mais finas (fios, chapas, barras menores, etc.) que posteriormente, darão origem a atuadores. Uma dessas técnicas é o forjamento (FERNANDES, 2013). A Figura 25 ilustra uma sequência geral da técnica de obtenção de componentes de LMF.

Figura 25 - Esquema de processos de fabricação de componentes de LMF Ni-Ti.

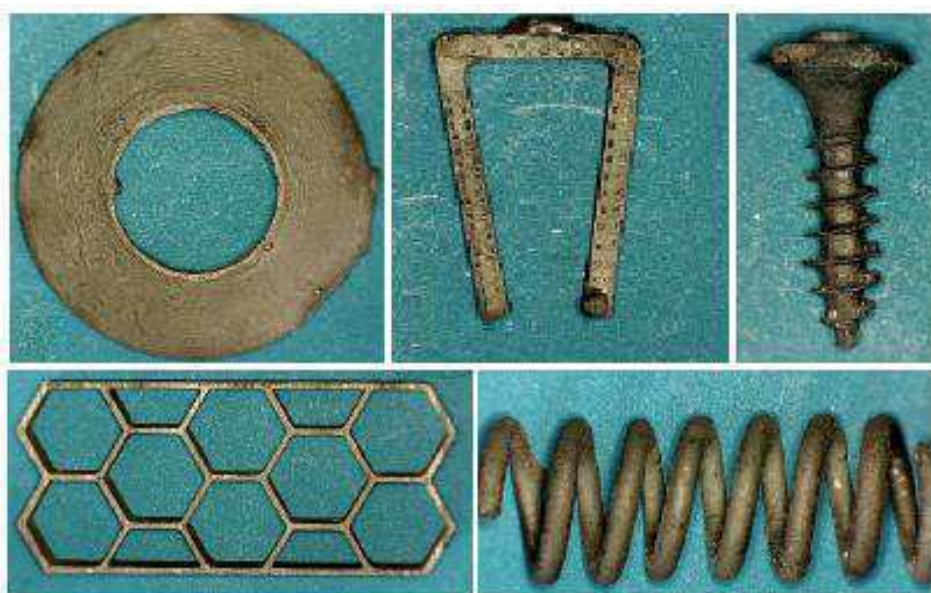


Fonte: Adaptado de Yamauchi et al (2011).

Contrariando essa ótica, De Araújo et al, (2009) fabricou atuadores de pouca complexidade geométrica pelo processo PSPP e PEREIRA et al, (2011) utilizando o mesmo método fabricou arruelas Belleville de LMF. Recentemente Simões (2016) combinou o processo PSPP com a técnica de fundição por cera perdida para produzir componentes mecânicos LMF (mola belleville, grampo ortopédico, telas, estrutura celular, mola helicoidal e parafuso) injetando o metal fundido em moldes cerâmicos.

Simões (2016) também utilizou processo de fundição por meio de uma fusão por indução com uma moldagem por centrifugação (FIC), no qual o metal fundido é injetado de forma centrífuga em moldes de revestimento cerâmico. Os componentes obtidos pelos processos citados anteriormente são apresentados na Figura 26.

Figura 26 - Componentes mecânicos obtidos por fundição de precisão com cera perdida.

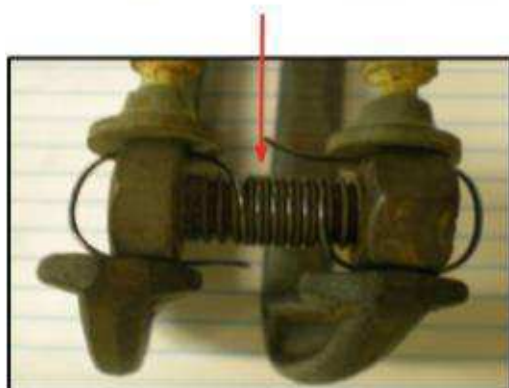


Fonte: Adaptado de Simões (2016)

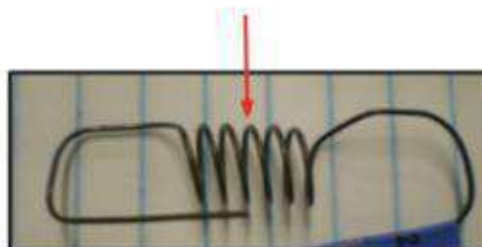
Atualmente a fabricação de atuadores tipo mola a são em sua maioria é realizada por um processo denominado *Shape Setting*, na qual um fio de material LMF é conformado em um gabarito típico (mandril) e submetido a tratamento térmico para manter a forma imposta conforme pode-se visualizar na Figura 27. O tratamento térmico também tem função de causar a transformação das temperaturas de fase, possibilitando assim a obtenção de molas superelásticas a partir de fios inicialmente martensíticos, ou vice versa.

Figura 27 - Fabricação de Mola de tração pelo processo Shape Setting

Fixação do fio no gabarito



Mola de tração



Fonte: Rao et al., (2015)

3.7 Fabricação de Componentes em LMF por Fundição de Precisão (FP).

Conforme citado na seção anterior Simões (2016) utilizou-se da técnica FP para fabricar microcomponentes mecânicos de LMF. Essa técnica de fabricação ampliou a possibilidade de produzir componentes mecânicos a partir de LMF, que seriam impossíveis ou inviáveis de serem obtidos por outros métodos de fabricação.

A FP, também conhecida por cera perdida, é um dos processos de fabricação mais antigos, praticado por mais de 5000 anos, e trata-se de um método de modelagem de metais líquidos para produzir objetos sólidos. A técnica em si tem enormes vantagens na produção de componentes de qualidade e os principais benefícios são a precisão, versatilidade e integridade. Como resultado, o processo é um dos mais econômicos e versáteis para fabricação de componentes metálicos (JONES; YUAN, 2003). A FP possui várias etapas e algumas delas são manuais para preparar o modelo de cera e o revestimento cerâmico (PATTNAIK et al., 2012).

As principais etapas do processo de fundição por cera perdida que utilizam moldes em casca são mostradas na Figura 28. Basicamente a FP inicia-se pela elaboração de um padrão de cera ou de outros materiais poliméricos que é fabricado com a geometria da peça final desejada e dimensões ligeiramente superiores para compensar as perdas que serão citadas mais a frente (a) e (b), então esse modelo é revestido com partículas cerâmicas formando um molde (c). Logo após o conjunto modelo e molde são aquecidos para que a cera seja removida e então cria-se um molde oco que será utilizado para injeção de metal fundido (d) e (e). Após a injeção do metal e solidificação do mesmo, o revestimento cerâmico é removido e então as peças são destacadas para acabamento (f) e (g). O acabamento e inspeção são necessárias para garantir a qualidade superficial e dimensional das peças fabricadas (h) e (i).

Para atingir uma boa qualidade superficial e dimensional é necessário controlar diversos fatores, de acordo com Shen et al (2002), alguns desses fatores são: parâmetros de injeção, tempo de resfriamento, pressão de injeção, temperatura de fusão, velocidade de injeção, tempo de injeção, tempo de preenchimento e temperatura do molde. Singh et al. (2006) constatou que o desvio dimensional padrão aumentava à medida que a temperatura da injeção aumentava, e diminuiu à medida que a temperatura da matriz aumentava e a temperatura da injeção diminuiu.

Figura 28 - Principais etapas do processo de fundição de precisão por molde tipo casca cerâmica para produção de biela automotiva



Fonte: Simões (2016).

Outro fator determinante para qualidade dimensional é modelo em cera que deve conter tolerâncias dimensionais para compensar sua própria expansão volumétrica e a contração da solidificação do material fundido no molde cerâmico (PATTNAIK et al., 2012). Por isso a importância de selecionar uma cerâmica adequada e atentar para qualidade na construção do molde cerâmico, Jones et al. (2003) destacaram que o molde cerâmico deve possuir uma boa resistência térmica e mecânica, alta estabilidade química, boa condutividade térmica e boa permeabilidade.

Após a injeção do metal fundido nos moldes e término da solidificação, a etapa de remoção do revestimento cerâmico requer cuidados especiais para evitar que o produto

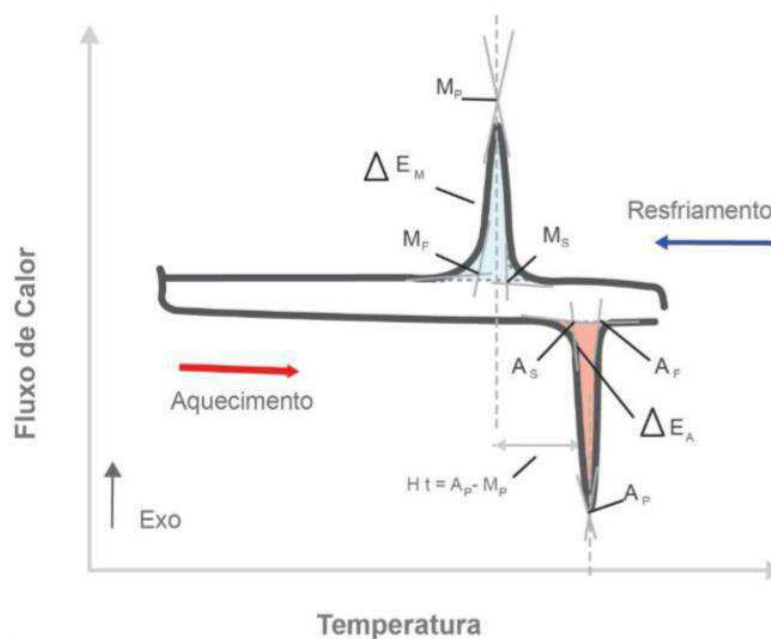
seja danificado, com a remoção do revestimento, as peças passam por processos secundários, como usinagem e tratamentos térmicos, para melhorar a qualidade superficial e as propriedades mecânicas.

3.8 Caracterização de LMF

Conforme exposto em outras seções as transformações de fase em LMF ocorrem ao longo de uma faixa de temperatura e para determinar essas temperaturas duas técnicas se destacam a Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) e a medição de Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET) (Otsuka; Wayman, 1998).

A caracterização via DSC determina as temperaturas de mudança de fase por meio do calor latente da transformação e o calor específico de cada fase, através da medição do fluxo de calor fornecido a uma amostra de LMF, para manter constante a taxa de aquecimento ou resfriamento. (LAGOUDAS, 2008). A Figura 29 ilustra um padrão ideal obtido em DSC com as tangentes traçadas nos pontos de aquecimento e resfriamento para determinar as quatro temperaturas de transformação características de uma LMF.

Figura 29 – Curva de DSC Característica de LMF sem a presença da fase R.

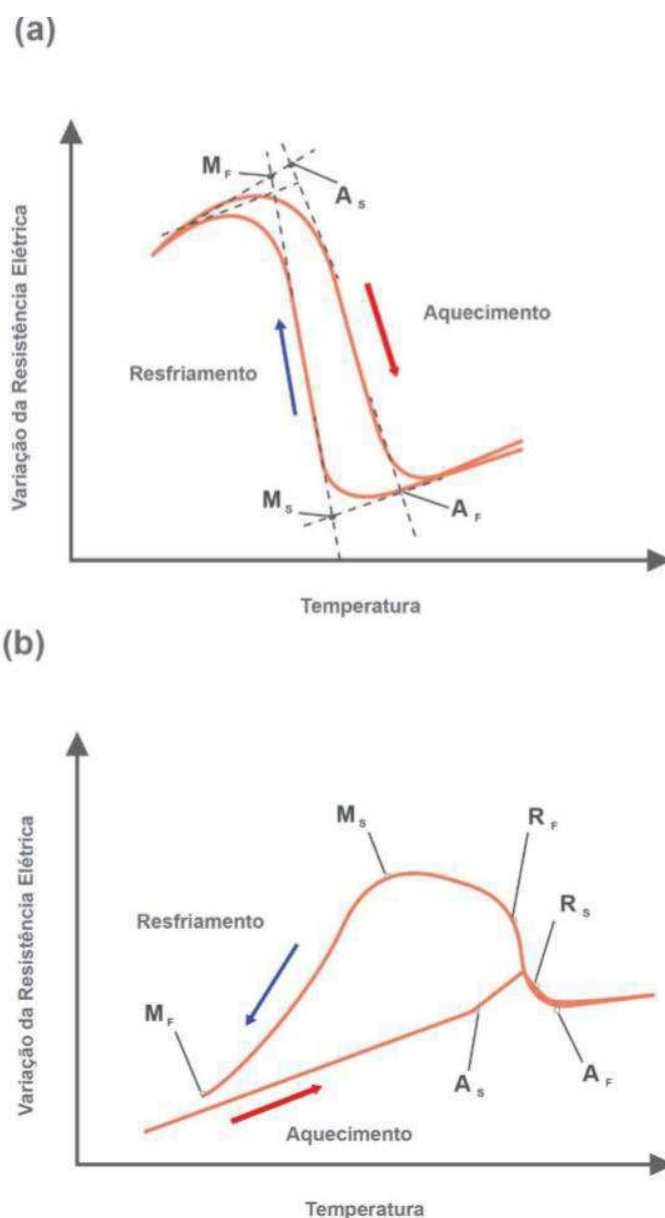


Fonte: Simões (2016).

Outra técnica de caracterização térmica é a medição da resistência elétrica em função da temperatura (RET). Basicamente, trata-se de uma técnica não destrutiva na

qual a peça é imersa em um ambiente termoregulável e submetida a uma corrente elétrica constante de baixa intensidade para causar uma diferença de potencial entre dois pontos, com a finalidade de mensurar a queda de tensão elétrica (ddp) que ocorre durante as transformações de fase nos ciclos de aquecimento e resfriamento (OTSUKA; WAYMAN, 1998). A Figura 30 ilustra um padrão ideal obtido em de uma curva de RET com as tangentes traçadas nos pontos de aquecimento e resfriamento para determinar as temperaturas de transformação características.

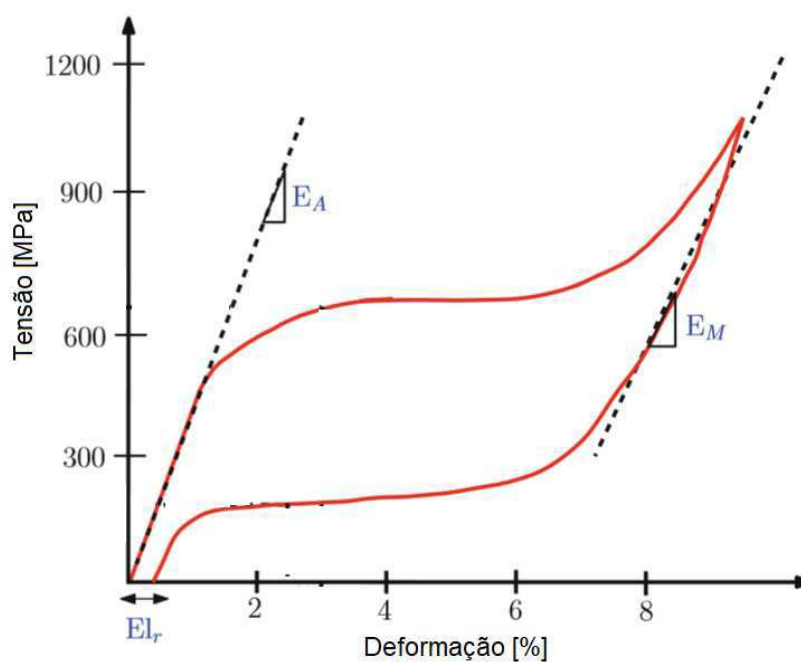
Figura 30 - Curva de RET. (a) Característica de LMF Ni-Ti sem a presença da fase R. (b) Característica de LMF Ni-Ti com a presença da fase R.



Fonte: Adaptado de Simões (2016).

Para LMF também é importante avaliar o comportamento mecânico, pela determinação das tensões de transformação. A norma ASTM f2516-07 discute uma metodologia padrão de teste de tensão em materiais superelásticos Ni-Ti e explica as principais características de tais efeitos. Essas tensões são determinadas através de testes de tração/compressão realizados em máquinas universais de ensaios em temperaturas constantes (RAO; SRINIVASA; REDDY, 2015). A Figura 31 ilustra uma curva típica de LMF superelástica, com apresentação dos módulos austenítico e martensítico E_A e E_M , e a deformação residual E_{I_r} .

Figura 31 - Curva Tensão-Deformação característica da SE: ilustração dos módulos de cisalhamento;



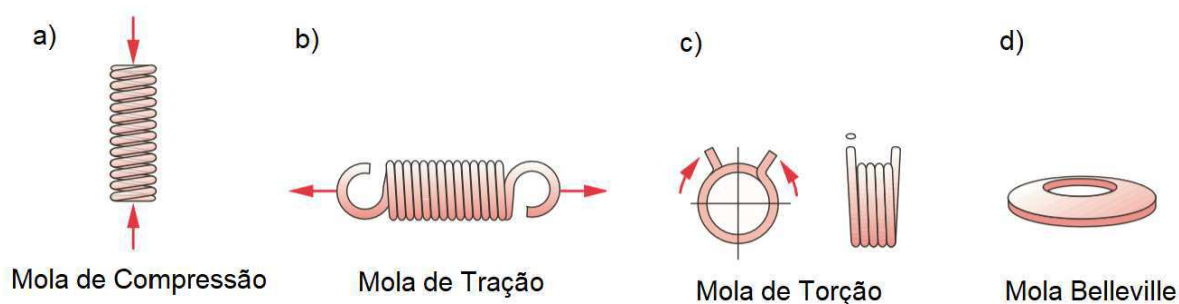
Fonte: Adaptado de Rao; Srinivasa; Reddy, (2015).

3.9. Molas helicoidais LMF

3.9.1 Definição e Classificação

As molas são elementos elásticos que são projetadas com propósito de exercer força de tração ou compressão, um torque, ou absorver energia, que geralmente é armazenada e liberada posteriormente. As molas podem ser classificadas de diferentes maneiras, um exemplo é baseado na aplicação da carga conforme citado anteriormente e em geral as classifica como molas de tração, molas de compressão, molas de torção e molas de formas encomendadas, outro exemplo é baseado na configuração física e em geral as classifica como molas de fio, molas planas e molas especiais (JUVINALL; MARSHEK, 2012; NORTON, 2013; BUDYNAS; NISBETT, 2015). A Figura 32 apresenta os principais tipos de molas.

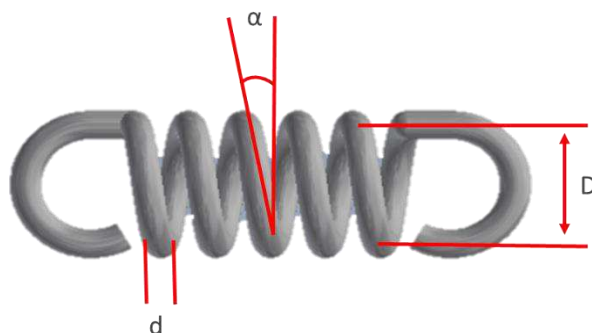
Figura 32 - Classificação de Molas Helicoidais: (a) Mola helicoidal de Compressão; (b) Molas helicoidal de tração; (c) Molas de Torção; (d) Molas Belleville.



Fonte: Adaptado Norton (2013).

Para aplicação de molas helicoidais LMF como atuadores/sensores é importante determinar duas características: força máxima e deflexão máxima, para isso, quatro parâmetros devem ser considerados: o diâmetro do fio (d), diâmetro médio da mola (D), número de espiras ativas (N_a) e o ângulo de inclinação (ou ângulo do passo) (α) (AN et al., 2012). Os parâmetros acima podem ser identificados na Figura 33.

Figura 33 – Geometria da Mola helicoidal LMF



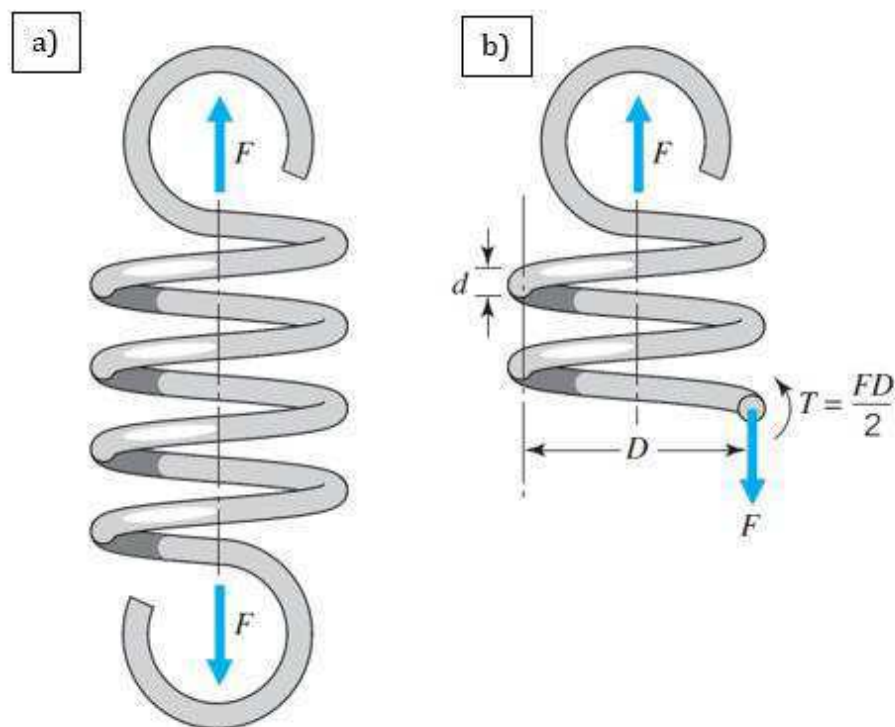
Fonte - Autoria Própria.

Em diversos casos o dimensionamento de molas helicoidais LMF emprega o modelo convencional para dimensionamento de molas de aço, no entanto, alteram o módulo de cisalhamento conforme a fase presente (OTSUKA; WAYMAN, 1998). Vários pesquisadores usaram essa abordagem para projetar atuadores de molas helicoidais LMF. Seok et al. (2013) aplicaram essa abordagem para um robô que exibe locomoção peristáltico baseado nos movimentos circulares e longitudinais de grupos musculares. Holschuh, Obropta e Newman (2015) empregaram o modelo convencional em molas helicoidais LMF de compressão para desenvolver tecidos inteligentes com funções terapêuticas. Oliveira (2017) utilizou tais equações para projetar molas helicoidais EMF que foram inseridas em um mancal adaptativo.

3.9.2. Tensões em molas helicoidais

A Figura 34 (a) mostra uma mola helicoidal de fio redondo submetida a tração com carregamento axial F . Ao isolar a seção transversal do fio conforme mostrado na Figura 34 (b), observa-se que a Força axial F gera uma força de cisalhamento direto F e um momento torsional T obtido pela equação (1). (BUDYNAS; NISBETT, 2015).

Figura 34 - Mola helicoidal de tração: (a) Vista frontal com forças externas atuantes; (b) Vista em corte da seção transversal.



Fonte: Adaptado Juvinall e Marshek (2012).

As tensões no corpo da mola de tração são tratadas de maneira análoga as molas de compressão, portanto as equações para qualquer seção do corpo da mola, temos.

$$\mathbf{T} = \frac{\mathbf{FD}}{2} \quad (1)$$

A tensão máxima de cisalhamento no fio pode ser calculada pela superposição da tensão de cisalhamento direta e a tensão de cisalhamento de torção.

$$\tau_{max} = \frac{Tr}{J} + \frac{F}{A} \quad (2)$$

Onde:

r = raio do fio

J = Momento polar

A = área da seção transversal do fio.

$$\tau_{max} = \tau$$

Pode-se calcular a tensão de cisalhamento em uma mola helicoidal a partir dos parâmetros de força, diâmetro do fio e diâmetro médio da mola pela seguinte equação.

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} + \frac{4F}{\pi d^2} \quad (3)$$

O índice de mola (C) pode ser utilizado substituindo o diâmetro da mola ou diâmetro do fio.

$$C = \frac{D}{d} \quad (4)$$

Recomenda-se que o índice C esteja entre o intervalo 4 e 12. Molas com $C < 4$ têm fabricação difícil e molas com $C > 12$ tem tendência a flambagem (NORTON, 2013). Pode-se substituir a equação 4 do índice de mola na equação 3.

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} \left(1 + \frac{0,5}{C} \right) \quad (5)$$

Agora temos a equação de cisalhamento direto em função de um fator de cisalhamento direto k_s .

$$k_s = \left(1 + \frac{0,5}{C} \right) \quad (6)$$

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} k_s \quad (7)$$

Como o fio da mola sofre o efeito da curvatura, sabendo que vigas curvas têm concentração de tensão na superfície interna de curvatura. Embora a mola não seja carregada como uma viga, o mesmo raciocínio se aplica, sendo assim, Wahl e Bergsträsser definiram fatores de concentração de tensões devido à curvatura k_w e k_B , respectivamente (BUDYNAS; NISBETT, 2015).

$$k_w = \frac{4C - 1}{4C - 4} + \frac{0,615}{C} \quad (8)$$

$$k_B = \frac{4C + 2}{4C - 3} \quad (9)$$

Uma vez que os fatores incluem ambos os efeitos (efeito da curvatura e efeito do cisalhamento direto) e diferem em apenas 1%. Podemos reescrever a equação 7 em função dos dois efeitos com um único fator.

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} k_B \quad (10)$$

O projeto de uma mola de tração requer uma extremidade de gancho ou suporte para aplicação da carga, por isso a flexão e torção gerado no gancho devem ser considerados na análise dessas molas, portanto a tensão de tração máxima no olhal devido à flexão e carga axial, é dado por:

$$\sigma_A = F \left[(K)_A \frac{16D}{\pi d^3} + \frac{4}{\pi d^2} \right] \quad (11)$$

Onde, $(K)_A$ é um fator de correção de tensão de flexão para a curvatura do gancho, dado por:

$$(K)_A = \frac{4C_1^2 - C_1 - 1}{4C_1(C_1 - 1)} \quad (12)$$

$$C_1 = \frac{2r_1}{d} \quad (13)$$

Considerando a curvatura do gancho reescrevemos a equação 10, e tensão máxima de torção no ponto B em função do fator de correção para curvatura $(K)_B$ é dada por:

$$\tau = \frac{8FD}{\pi d^3} (K)_B \quad (14)$$

O fator de correção da tensão para curvatura $(K)_B$, é:

$$(K)_B = \frac{4C_2 - 1}{4C_2 - 4} \quad (15)$$

$$C_2 = \frac{2r_2}{d} \quad (16)$$

3.9.3. Deflexão de molas helicoidais

Geralmente molas de tração no seu funcionamento são submetidas a uma pré-carga F_i , por isso a deflexão para essas molas é calculada a partir da mesma equação utilizada no caso de molas helicoidais à compressão, coma inclusão de uma pré-carga. Pode-se calcular a rigidez da mola helicoidal a partir da equação 17.

$$k = \frac{F - F_i}{\delta} \quad (17)$$

Assumindo que a energia total de deformação para uma mola helicoidal é composta por uma componente torcional e uma componente de cisalhamento, utilizando-se o teorema de Castigliano são obtidas as relações deflexão-força (BUDYNAS; NISBETT, 2015). Então a deflexão de uma mola helicoidal de tração com fio redondo é:

$$\delta = \frac{8(F - F_i) D^3 N_a}{d^4 G} \quad (18)$$

Aplicando o fator k_B , e substituindo a equação 18 na equação 17, também pode-se calcular a rigidez da mola pela equação 19 abaixo.

$$k = \frac{d^4 G}{8D^3 N_a k_B} \quad (19)$$

O valor do módulo de cisalhamento (G) pode ser calculado a partir do módulo de elasticidade do material (E). Como o módulo de elasticidade das molas LMF apresenta valores distintos em função da fração de martensita transformada, se estabelece a relação mostrada na equação (20).

$$G = \frac{E_A + (E_M - E_A)\xi}{2(1 + \mu)} \quad (20)$$

A variável μ representa o coeficiente de Poisson do material, que no caso do Ni-Ti conforme tabela 1, $\mu = 0,33$. Os termos E_M e E_A representam os módulos de elasticidade do material nos estados austenítico e martensítico, respectivamente. O parâmetro adimensional (ξ) representa a fração de martensita transformada.

3.9.4. Frequência Crítica de Molas Helicoidais

Quando as molas helicoidais são usadas em aplicações que requerem um movimento dinâmico é necessário estar ciente que a frequência da força aplicada pode gerar uma frequência vibratória natural próxima frequência natural da mola, criar uma ressonância, resultando em tensões prejudiciais. Para determinar as frequências harmônicas naturais entre dois suportes planos e paralelos em radianos por segundo temos a expressão 21.

$$\omega_n = \pi \sqrt{\frac{kg}{W}} \quad (21)$$

Onde: k = constante da mola

W_n = peso das espiras ativas da mola

g = aceleração da gravidade

Para frequência natural em Hz temos:

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \omega_n \quad (22)$$

O peso das espiras ativas pode ser encontrado a partir de:

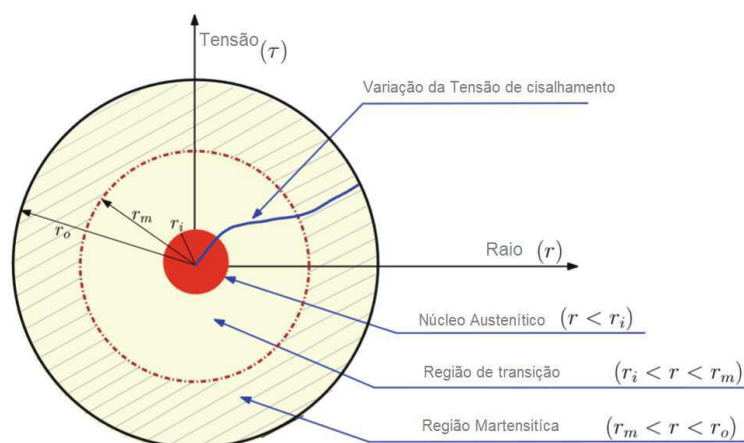
$$W_n = \frac{d^2 \pi^2 D N_a \gamma}{4} \quad (23)$$

Em que: γ = densidade em peso do material

3.9.5. Tensões em molas LMF para grandes deflexões.

Sabe-se quando a mola está submetida as forças axiais o fio da mola está sob carga torsional, gradualmente a deformação do material se movimenta do diâmetro externo para o eixo central do fio. A distribuição das tensões de cisalhamento é altamente não linear ao longo da seção transversal do fio. Isto implica na formação de diferentes zonas de transformação ao longo da seção transversal do fio. Um caso típico de um fio/mola parcialmente transformado pode ser visto na Figura 35. Três zonas livres são identificadas: uma zona central austenítica não transformada, uma região de transição que está passando por transformação de fase de austenita para martensita, outra camada externa martensítica completamente transformada.

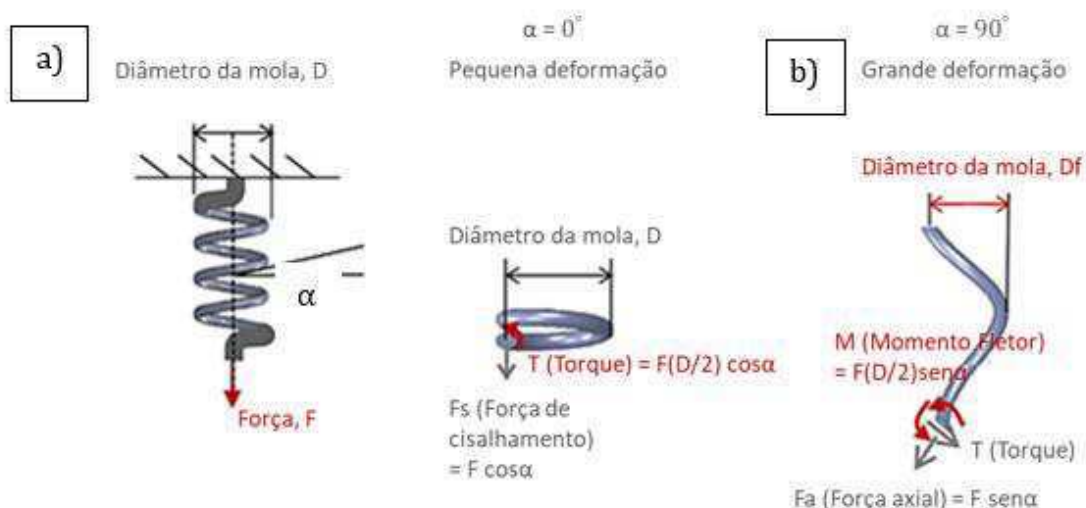
Figura 35 – Seção transversal de fio sob carga torcional



Fonte: Rao e Srinivasa (2014)

Um projeto típico de molas helicoidais de aço é limitado a região elástica, o que significa uma deformação de cisalhamento de 1%, e as equações das tensões seguem esse requisito. No entanto, o material de uma mola helicoidal LMF pode ser deformada em até 6%, e ainda assim recupera sua forma original. Nesse cenário para uma grande deflexão que causa as zonas de transformação no fio da mola acima citadas deve-se considerar o carregamento axial sob grandes deformações. A Figura 36 mostra um diagrama de corpo livre de uma mola helicoidal LMF sob carregamento axial sob grandes deformações (AN et al., 2012).

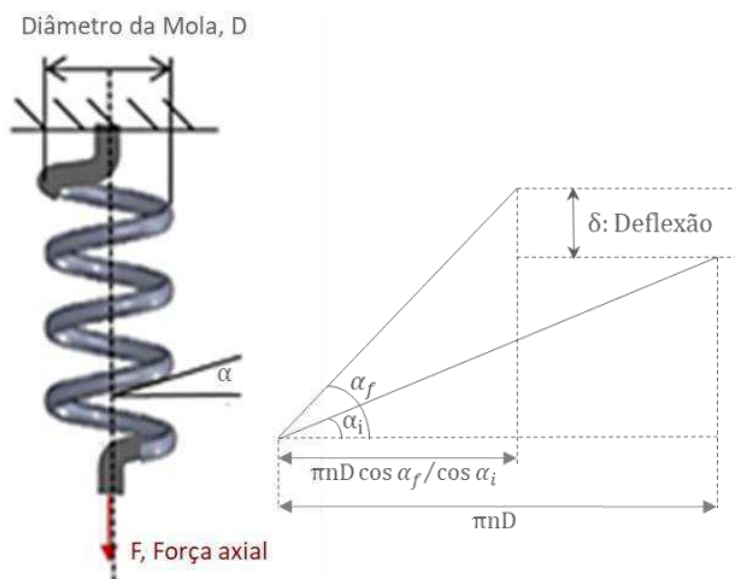
Figura 36 – Diagrama de corpo livre em molas sob grandes deformações: (a) Carregamento axial em Molas LMF; (b) Diagrama de corpo livre.



Fonte: Adaptado de AN et al., (2012)

Para uma grande deflexão, assume-se que o torque, o momento fletor, o ângulo de inclinação da mola e a redução do diâmetro sejam diferentes de zero. A força de cisalhamento, força axial e efeito de curvatura da mola são ignorados, pois são pequenos comparados aos momentos de torção e flexão para os índices de mola entre 4 e 12 (AN et al., 2012). A Figura 37 mostra a alteração do ângulo da mola em função da deflexão.

Figura 37 - Alteração da geometria durante a deflexão.



Fonte: Adaptado de AN et al., (2012)

O ângulo do passo para uma espira pode ser extraído da relação entre passo e diâmetro médio da mola mostrado na Figura 33. De acordo com a literatura molas helicoidais com ângulo maior do que 12° tendem a atingirem as tensões de ruptura prematuramente (JUVINALL; MARSHEK, 2012).

$$\tan\alpha = \frac{P}{\pi D} \quad (24)$$

A relação entre a força, deflexão, redução do diâmetro da mola é expressa conforme a equação 25.

$$\delta = \frac{8FD_f^3 N_a}{d^4 \cos \alpha_f} \left(\frac{\cos^2 \alpha_f}{G} + \frac{\sin^2 \alpha_f}{E} \right) \quad (25)$$

$$D_f = D_i (\cos \alpha_f / \cos \alpha_i) \quad (26)$$

Onde i e f designam a geometria inicial e final da mola após a deformação. Considera-se que o material é isotrópico, pode-se substituir E por $2(1+\mu)G$. Reescreve-se a equação 25 em função da equação 26, temos uma equação que relaciona força e ângulo do passo, que pode ser utilizada

$$F = \frac{\pi d^4}{8N_a D_i^3} G \frac{\cos^2 \alpha_i (\sin \alpha_f - \sin \alpha_i)}{\cos^2 \alpha_f \left(\cos^2 \alpha_f + \frac{\sin^2 \alpha_f}{(1 + \mu)} \right)} \quad (27)$$

A tensão de cisalhamento para grandes deflexões é calculada com a suposição de que toda a força aplicada é convertida no momento do torque.

$$\tau = \frac{T(d/2)}{J} = \frac{F(D/2)(d/2)}{(\pi d^4/32)} = \frac{8FD}{\pi d^3} = \frac{8FC}{\pi d^2} \quad (28)$$

3.9.6. Fator de Amortecimento e Rigidez Secante.

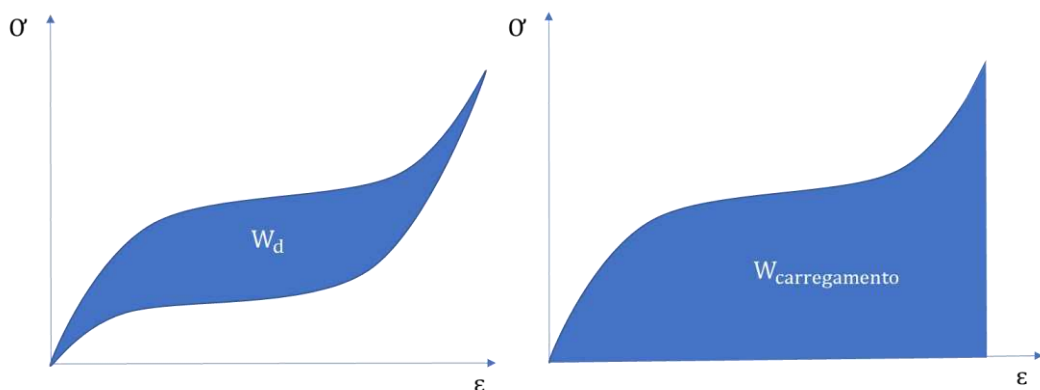
Para investigar a dependência do desempenho das molas sob frequência de carregamento, alguns parâmetros mecânicos significativos foram extraídos. como rigidez secante (k_s), energia dissipada por ciclo (W_d) e fator de perda (η).

Com o gráfico força-deformação obtemos a rigidez secante da diferença entre a força máxima e força mínima pela diferença entre a deformação máxima e deformação mínima, durante cada ciclo de carga-descarga.

$$k_s = \frac{F_{max} - F_{min}}{D_{max} - D_{min}} \quad (29)$$

De acordo com a literatura publicada (NESPOLI et al., 2017), o fator de perda é o índice mais adequado para descrever a capacidade de amortecimento de materiais e foi inicialmente proposto como uma medida do amortecimento intrínseco dos materiais viscoelásticos. Neste contexto, define-se como a razão entre as partes real e imaginária do módulo completo elásticos ou rigidez complexa. Alternativamente, uma definição em termos de conceitos de energia pode ser usada. Com as áreas das curvas apresentadas na Figura 38.

Figura 38 - Áreas para o cálculo do fator de perda.



Fonte: Adaptado de Nespoli et al., 2017

$$\eta = \frac{W_d}{2\pi W_{carregamento}} \quad (30)$$

Onde:

$W_{carregamento}$ é a energia armazenada durante o carregamento.

W_d é a energia armazenada por ciclo.

Para termos a energia em joule por gramas utilizamos o volume das espiras ativas pelo peso específico ($6,45 \text{ g/cm}^3$) do nitinol (MIYAZAKI et al., 1996)

$$Volume = C_e \cdot A_0 \quad (31)$$

Onde, C_e : Comprimento do fio da mola esticado.

A_0 : Área da seção transversal do fio da mola

$$C_e = 3,2 D N_a + L_0 \quad (32)$$

Onde, L_0 : Comprimento livre da mola.

3.9.7. Módulo de Cisalhamento.

Utilizando os resultados obtidos da rigidez austenítica K_a , foram calculados os valores de módulo de cisalhamento G . Com a equação 18, pois considera-se que o ângulo do passo da mola não varia para pequenas deformações.

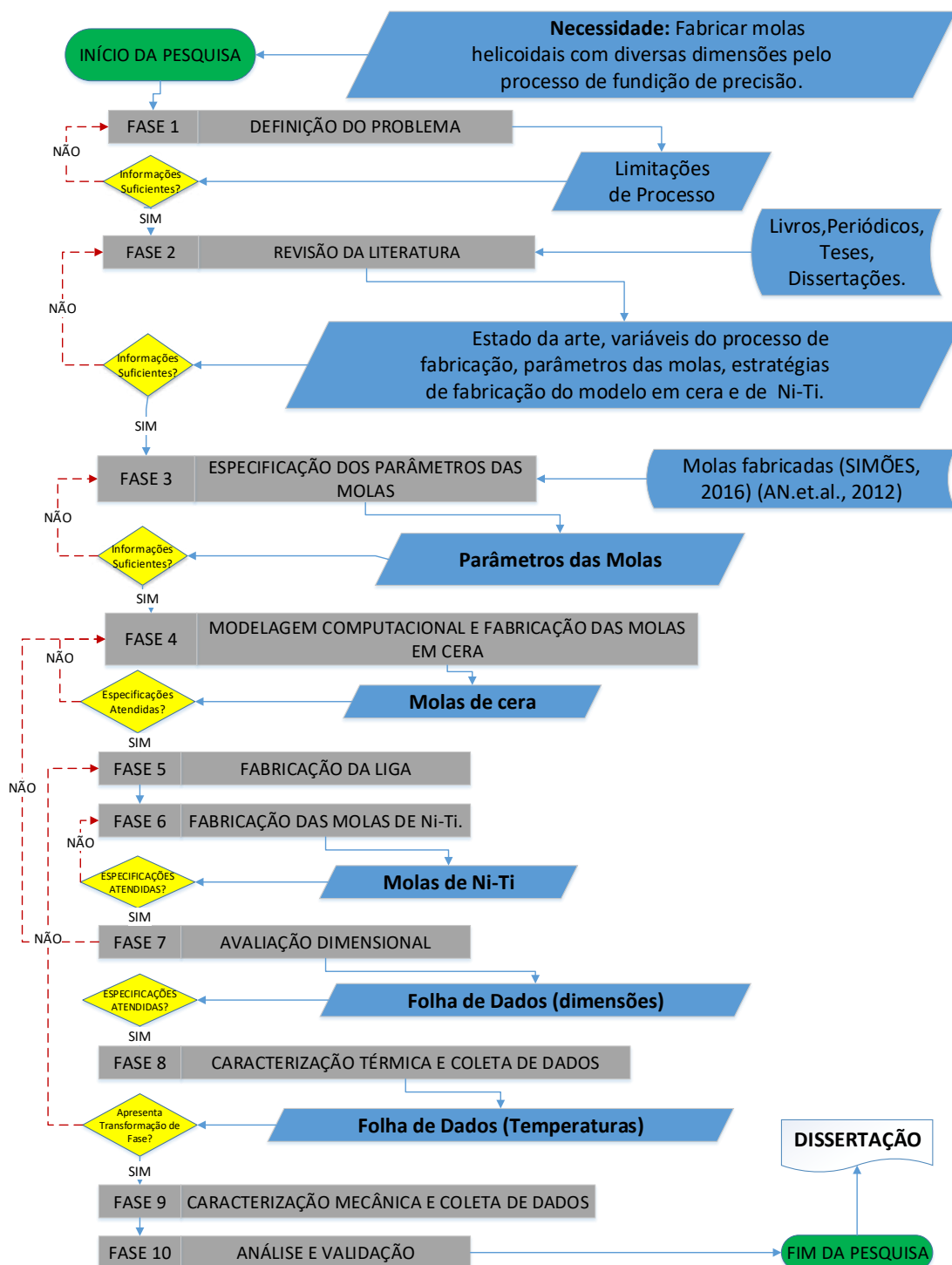
4. MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades desenvolvidas neste trabalho foram inteiramente realizadas nas instalações do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA), vinculado a Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) da UFCG.

4.1. Metodologia

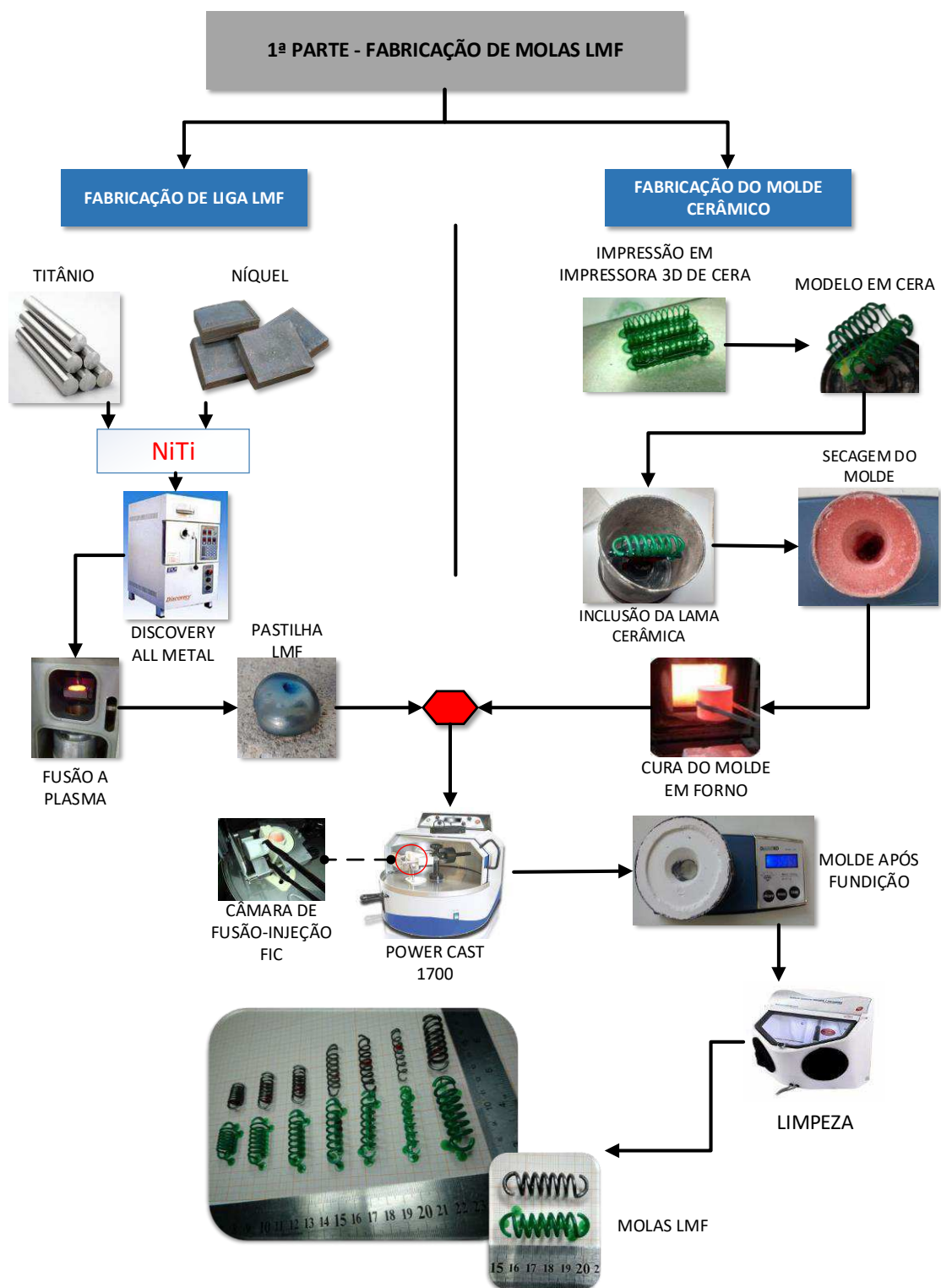
A metodologia adotada nesta pesquisa está apresentada em digrama na Figura 39. Para melhor entendimento algumas fases da metodologia foram agrupadas em duas partes e apresentadas através de imagens. A primeira parte consiste na fabricação das molas helicoidais de LMF Ni-Ti ($M_{LMF}NiTi$) por meio do processo de fundição de precisão. O fluxograma está ilustrado na Figura 40. A segunda parte consiste na caracterização térmica e mecânica das $M_{LMF}NiTi$, sendo realizados diversos ensaios com o objetivo de analisar o comportamento de cada $M_{LMF}NiTi$, com sua respectiva geometria. O fluxograma dessa parte está ilustrado na Figura 41.

Figura 39 – Fluxograma do processo metodológico utilizado na pesquisa.



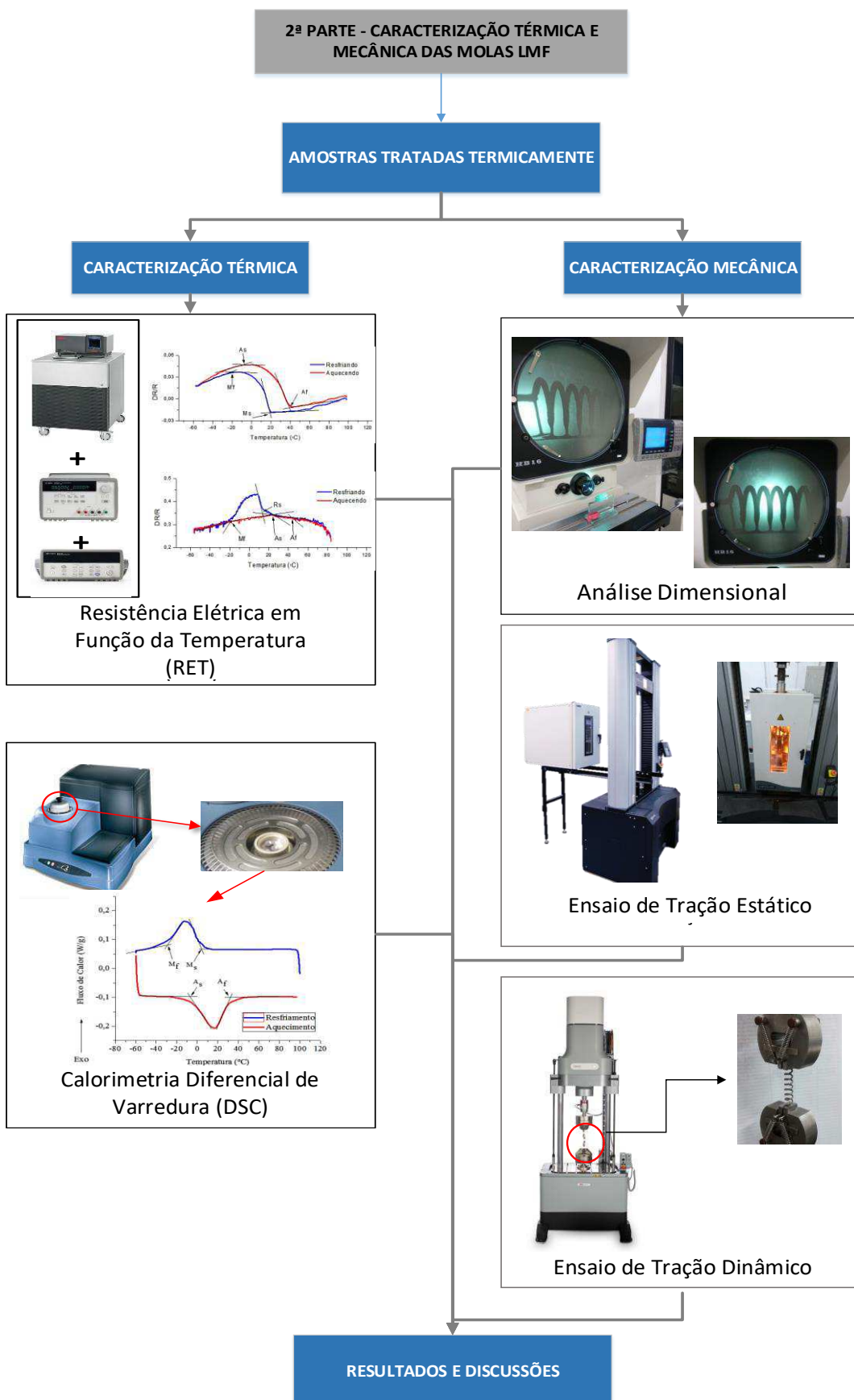
Fonte - Autoria Própria

Figura 40 – Primeira Parte – Fluxograma de Fabricação das Molas Helicoidais Ni-Ti.



Fonte - Autoria Própria

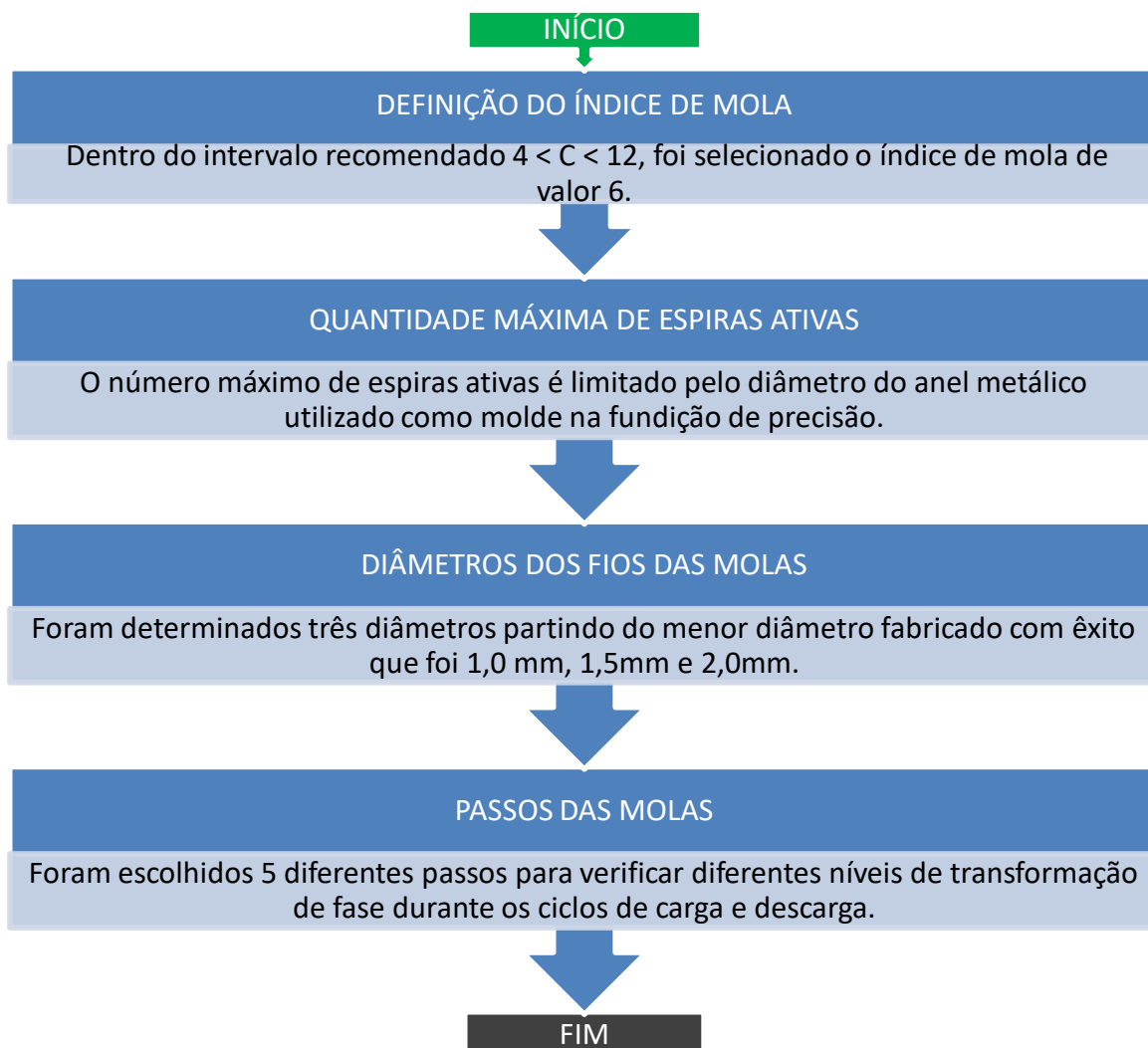
Figura 41 – Segunda Parte – Fluxograma de caracterização térmica e mecânica de Molas Ni-Ti



4.2. Seleção dos parâmetros das Molas Helicoidais

Previamente à fabricação das molas, com base na revisão da literatura selecionou-se os parâmetros das $M_{LMF}NiTi$, sinteticamente os critérios adotados estão apresentados no fluxograma da Figura 42.

Figura 42 - Fluxograma de seleção dos parâmetros.

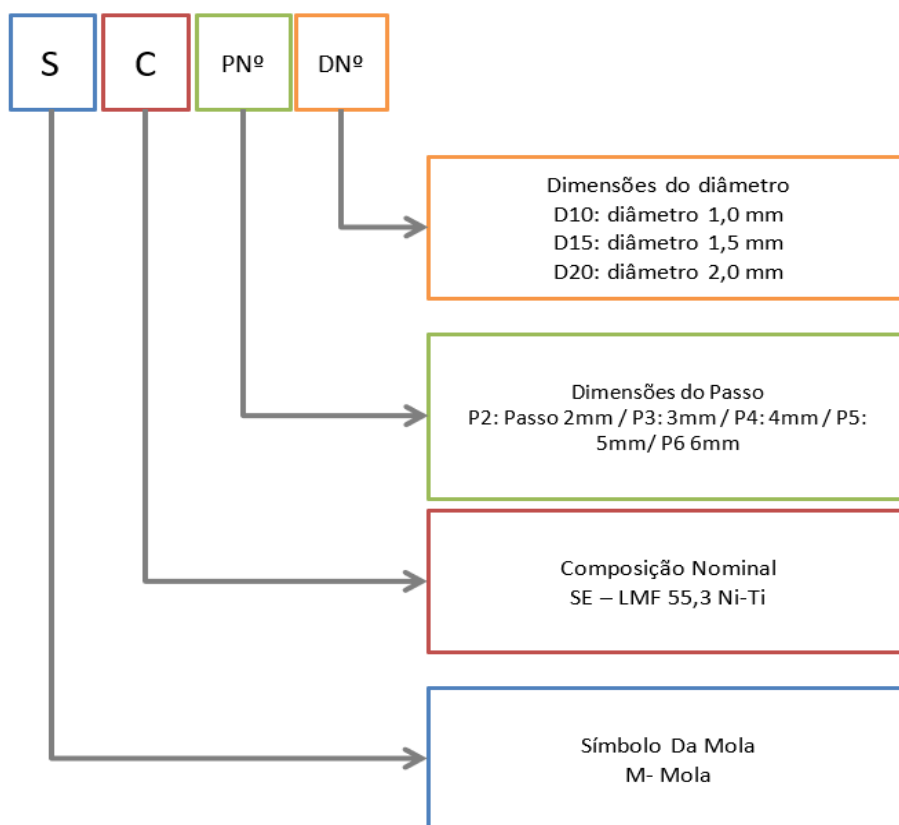


Fonte - Autoria Própria

Inicialmente foi selecionado o índice de mola com valor 6, que está dentro intervalo recomendado, $4 < C < 12$, abaixo de 4 as molas são difíceis de serem fabricadas e acima de 12 tendem a flambagem. O número de espiras ativas foi escolhido com base no diâmetro do anel metálico do molde da FP, por isso selecionou-se 8 espiras ativas. Os diâmetros do fio, foram determinados com base em fabricações prévias, nas quais mostraram que seria possível fabricar com êxito molas com diâmetro de fio mínimo igual a 1,0mm, sendo

assim, selecionou-se os diâmetros 1,0mm, 1,5mm e 2,0mm. Por fim selecionou-se 5 valores de passos 2mm, 3mm, 4mm, 5mm e 6mm para verificar diferentes níveis de deformação nos ensaios mecânicos. Na Figura 43 é apresentada a codificação estabelecida para a designação das molas helicoidais produzidas.

Figura 43 - Codificação das Molas Helicoidais Produzidas



Fonte: Autoria Própria

Todas as codificações das molas com o dimensional nominal de passo e diâmetro do fio da mola são apresentadas na tabela 2 abaixo

Tabela 2–Nomenclatura das molas pelas dimensões nominais das molas modeladas em CAD.

Código	Passo [mm]	Diâmetro do Fio[mm]
M_SE_P2_D15	2	1,5
M_SE_P3_D15	3	1,5
M_SE_P4_D15	4	1,5
M_SE_P5_D15	5	1,5
M_SE_P6_D15	6	1,5
M_SE_P5_D10	5	1,0
M_SE_P5_D20	5	2,0

Fonte: Autoria Própria.

4.3. Fabricação das Molas LMF

O processo de fabricação das $M_{LMF}NiTi$ por fundição de precisão, pode ser dividido em três etapas: A primeira etapa consiste na fabricação do material (liga Ni-Ti) que será detalhada na seção 5.3.1. A segunda etapa compreende o processo de confecção do molde cerâmico que será detalhada na seção 5.3.2. A terceira etapa que compreende a injeção das $M_{LMF}NiTi$. A obtenção das $M_{LMF}NiTi$ foi realizada por meio do processo de fusão por indução com uma moldagem por centrifugação (FIC) seguido de processos de limpeza e corte. O procedimento de fundição completo está descrito na seção 5.3.3.

Os modelos em cera das molas foram fixados de forma única (uma mola em cada haste) e aos pares (duas molas em cada haste) em uma haste horizontal também de cera formando assim a árvore de fundição. Árvores são utilizadas para produção dos contramoldes. Foram fabricadas 28 molas, sendo 4 molas de cada configuração.

4.3.1 Fabricação da LMF Ni-Ti

Neste trabalho, selecionou-se uma LMF clássica do sistema Ni-Ti, com composição nominal de 50,2Ni-49,8Ti (at%) que equivale a aproximadamente 55,3% Ni e 44,7% Ti em peso. Essa composição foi selecionada para que o comportamento de superelasticidade possa ser observado em temperaturas próximas à temperatura ambiente.

Considerando o volume dos modelos em cera e a massa específica da LMF Ni-Ti utilizada. Sabendo que as molas peso entre 5g e 10g. Aplicou-se uma quantidade de aproximadamente 30g para cada injeção em moldes com apenas uma mola e de 35g para cada injeção em moldes com duas molas. Esses valores se mostraram satisfatórios para alcançar o total preenchimento da cavidade do molde cerâmico, além de compensar possíveis perdas em decorrência da fundição por centrifugação.

As cargas de Ni e Ti utilizadas para fabricação da pastilha Ni-Ti foram pesadas em uma balança de precisão, modelo AL 200C do fabricante Marte, com uma sensibilidade de 0,001g e fundidas com quatro ciclos de fusão e refusão à plasma, utilizando o processo PSPP, por meio do equipamento de modelo Discovery All Metals, da marca EDG Equipamentos e Controles. Este processo foi validado para fabricação de LMF por De Araújo et al. (2009), conforme explicado anteriormente na seção 4.6. Ao final do processo obteve-se pastilhas de aproximadamente 15g e 20g de LMF Ni-Ti.

4.3.2 Fabricação do Molde Cerâmico

A fabricação do molde cerâmico é realizada em três etapas: impressão do modelo 3D em cera com a geometria que se deseja a peça final e dimensões ligeiramente superiores, montagem do modelo em cera com seus canais de alimentação e preparação do composto cerâmico. Após ser levado ao forno, a cera é retirada e obtêm-se uma cavidade para posterior injeção do metal fundido.

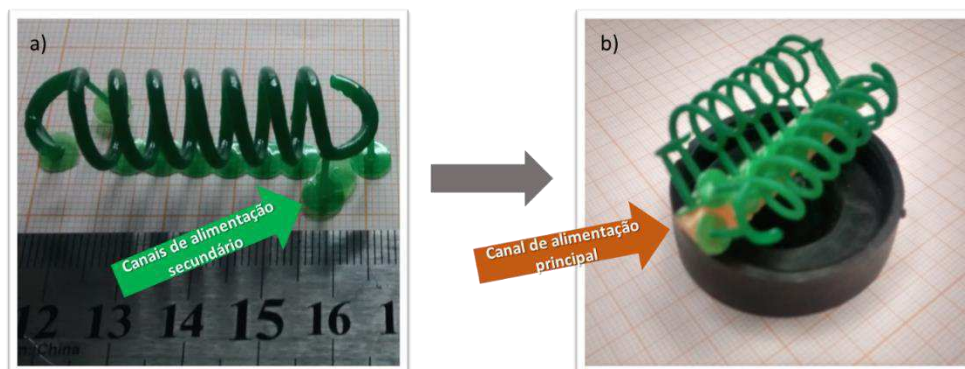
A fabricação dos modelos em cera, foi realizada em uma impressora 3D de cera modelo B9 creator v1.2, da marca B9 Creations apresentada na Figura 44. As $M_{LMF}NiTi$ foram impressas com os canais de alimentação secundários, os canais de alimentação principais e massalotes foram confeccionados manualmente. Na Figura 45 pode-se, as molas impressas e a montagem do modelo final.

Figura 44 - Impressora 3D B9creator



Fonte: B9 Creations.

Figura 45 – Impressão das Molas em cera: a) Molas de cera impressas; b) Molas montadas com canal de alimentação principal.

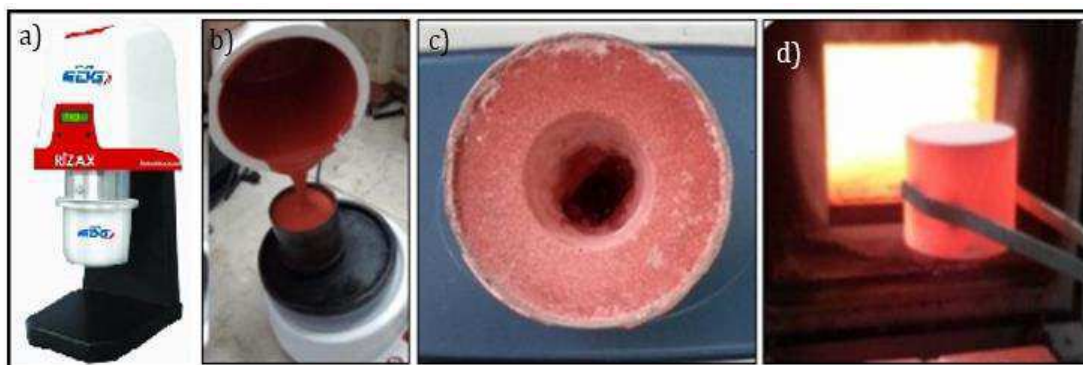


Fonte - Autoria Própria

A obtenção dos moldes cerâmicos a partir dos modelos em cera, foi realizada com revestimento cerâmico Micro Fine 1700 da marca Talmax, que possui alta resistência devido sua composição à base de quartzo e feldspato. Antes do preparo do revestimento, o modelo em cera foi unguído com uma substância redutora de tensão superficial, com o objetivo de diminuir a probabilidade de originar defeitos superficiais causados pelo revestimento.

A preparação do composto cerâmico consiste na homogeneização do líquido de cura e da água destilada com o revestimento em pó (na proporção 18 ml de líquido + 5 ml de água para cada 90g do pó). Esses elementos são primeiramente misturados manualmente por um tempo de 10s. Em seguida, a mistura foi levada a uma máquina de espatulação a vácuo, modelo Rizax, da marca EDG por tempo de 40 a 60s (Figura 46 a).

Figura 46 - Preparação do molde cerâmico. (a) Espatulador Digital (b) Introdução da lama cerâmica no molde metálico contendo o modelo de tela em cera; (c) Secagem do molde; (d) Molde após cura e retirada do forno.



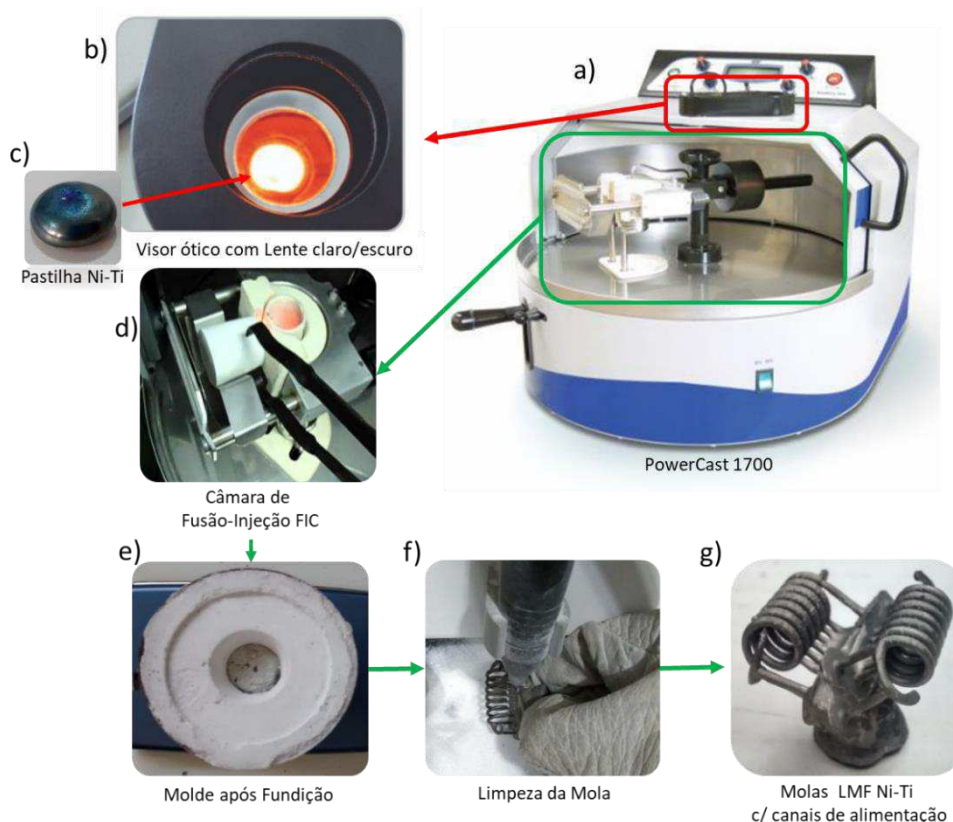
Fonte: Autoria própria.

Após a espatulação a lama cerâmica foi vazada no anel de metal de maneira a recobrir todo o modelo de cera. Durante este processo o anel é posicionado em um equipamento vibratório que promove a erupção das bolhas provenientes do processo de preparação que poderiam resultar em falhas na peça final (Figura 46 b). Finalizado essa etapa o molde foi posto para secagem por 45 minutos ao ar ambiente (Figura 46 c). Posteriormente o molde foi levado ao forno para sinterização do revestimento cerâmico e evaporação da cera. O material foi aquecido da temperatura ambiente até 950°C, a uma taxa de aquecimento de 30°C/min, e permaneceu na temperatura máxima durante 20 minutos (Figura 46 d).

4.3.3 Fusão por Indução com Injeção por Centrifugação (FIC)

O processo de fundição final e injeção centrífuga, foi realizado no equipamento Power CAST 1700 da marca EDG Equipamentos e Controles (Figura 47 a). Nesse processo, a pastilha de LMF de Ni-Ti é colocada em um cadinho cerâmico, submetido a um fluxo de gás argônio de proteção e fundida por indução eletromagnética (Figura 47 b). O cadinho é suportado por um braço de centrifugação na câmara de fusão, que durante a injeção rotaciona para promover o escoamento do metal fundido para dentro da cavidade do molde (Figura 47 d). A temperatura do molde cerâmico no momento da injeção, foi de aproximadamente 800 °C (monitorada por pistola térmica). Após a injeção o revestimento cerâmico foi removido pelo processo de jateamento de alumina em pó (Figura 47 f).

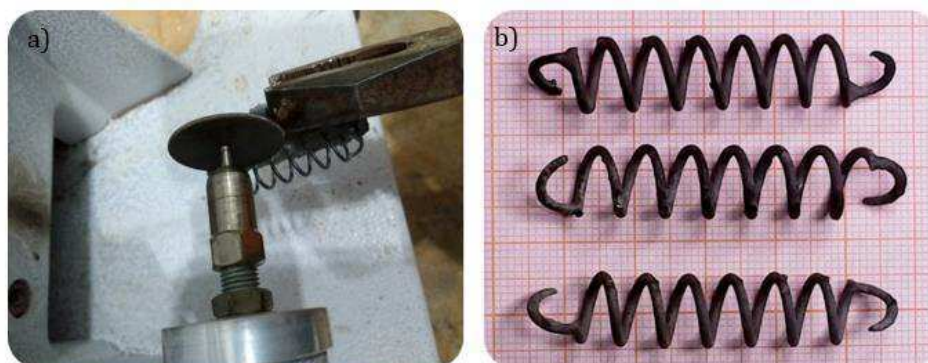
Figura 47 - Máquina Power Cast 1700 EDG: a) Visor óptico. b) Painel de controle. c) Braço de centrifugação. d) Injeção de Metal líquido. e) Molde após fundição. f) Mola após limpeza com os canais e massalote.



Fonte: Autoria Própria.

Após a obtenção da $M_{LMF}NiTi$, ainda bruta de fundição, foi realizada a etapa de remoção da mola de seus canais de alimentação, utilizando a máquina de corte modelo VH 20.000 RPM de marca Polimax, como observado na Figura 48.

Figura 48 - Processo de corte dos canais de alimentação. a) Corte dos canais de alimentação; b) Molas sem canais de alimentação.



Fonte: Autoria própria.

Todos as $M_{LMF}NiTi$ foram tratadas termicamente com o mesmo tratamento utilizado por Montenegro (2016), homogeneização (850 °C durante 30 minutos), seguido de um tratamento de envelhecimento (500 °C durante 2 horas), ambos com resfriamento ao ar. Esse tratamento foi empregado visando aliviar as tensões de solidificação para reduzir a fragilidade e melhorar a tenacidade e a resistência ao impacto. Além de estabilizar as temperaturas de transformações que sofrem ligeira diminuição conforme observado por Montenegro (2016) e Simões (2016).

4.4. Caracterização das Molas Helicoidais Ni-Ti

As $M_{LMF}NiTi$, foram analisadas brutas de fundição e tratadas termicamente nas Análises Térmicas. Nos ensaios mecânicos de força-deformação (a diferentes níveis de deformação) as $M_{LMF}NiTi$ foram analisadas tratadas termicamente, por apresentarem as melhores respostas mecânicas conforme os resultados obtidos por (SIMÕES, 2016). As molas obtidas foram analisadas por:

1. Inspeção Visual e Análise Dimensional;
2. Análise Térmica: Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC) e Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET);
3. Ensaios Mecânicos de Tração: Quase-estático e Dinâmico;

O propósito desses ensaios foi analisar e quantificar a influência da geometria nas propriedades mecânicas das molas fabricadas, mais precisamente a influência dos passos e diâmetros do fio das $M_{LMF}NiTi$.

4.4.1. Inspeção Visual e Análise Dimensional

As $M_{LMF}NiTi$ foram inspecionadas visualmente através de um mini microscópio digital portátil da marca Bluetek modelo MC500, com capacidade de aumento de 500x, afim de determinar a aceitabilidade dos componentes fabricados e identificar discontinuidades superficiais. Esse microscópio funciona com auxílio de um computador com o software fornecido pelo fabricante como pode ser visto na Figura 49.

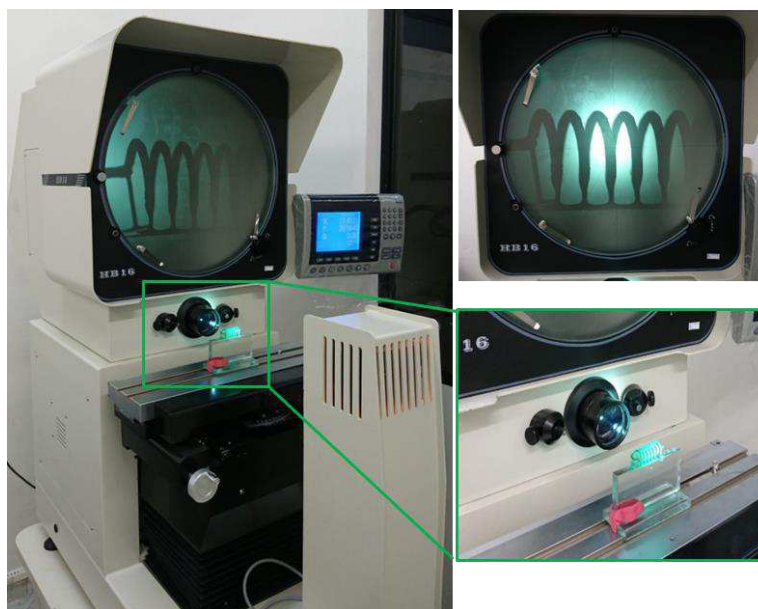
Figura 49- Inspeção visual no Microscópio digital.



Fonte: Autoria Própria.

Após a inspeção visual, todas as molas em cera e de Ni-Ti foram levadas para análises dimensionais em um equipamento denominado Projetor de Perfil, modelo HB16, da marca Huatec Group Corporation com erro de ampliação menor/igual a 0,08%. As molas foram projetadas com aumento de 50 vezes, afim de avaliar comparativamente as dimensões dos modelos em cera e as molas LMF Ni-Ti. Na Figura 50 é mostrada a montagem utilizada para essa análise. Para cada mola, foram realizadas 30 medições dos passos e 30 dos diâmetros do fio, em diversas posições das amostras. A análise dimensional permitiu avaliar o grau de qualidade dos produtos obtidos, certificar que as molas injetadas apresentam dimensões aceitáveis e estimar a variação entre as molas de cera e Ni-Ti.

Figura 50 - Avaliação dimensional das molas de cera e de Ni-Ti.



Fonte: Autoria Própria.

4.4.2. Caracterização Térmica.

A determinação das temperaturas de transformação de fase das LMF Ni-Ti fundidas foram realizadas através de duas técnicas: Calorímetro Diferencial de Varredura (DSC) e Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET).

4.4.2.1 Calorimetria Diferencial de Varredura (DSC)

No primeiro método utiliza-se um equipamento DSC modelo Q20, da marca TA Instruments. Os ensaios foram executados segundo a norma ASTM F2004-05 usando uma taxa de 10 °C/min durante o aquecimento e resfriamento, com intervalo de temperatura de 100 °C a -60 °C. As amostras do material para realizar o DSC foram retiradas das extremidades próximas aos canais de alimentação, pois de acordo com os resultados de Simões et al. (2015), mesmo em diferentes regiões dos componentes Ni-Ti, as temperaturas de transformação não foram influenciadas. Na Figura 51 apresenta-se o equipamento utilizado e a região de onde são retiradas as amostras para o ensaio de calorimetria.

Figura 51 - Calorímetro DSC da TA Instruments modelo Q20, com detalhe do interior do equipamento e da região da mola que é retirada a amostra.

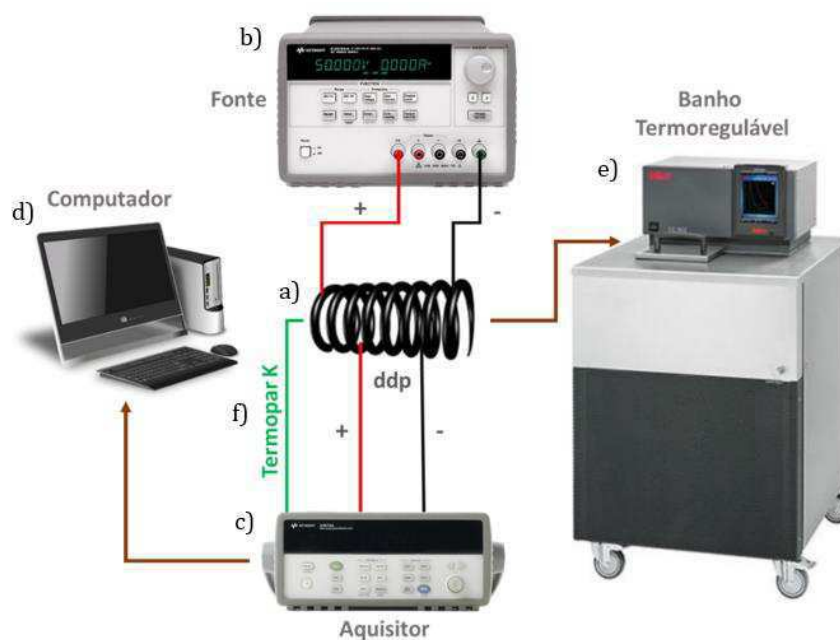


Fonte: Autoria Própria

4.4.2.2. Resistência Elétrica em Função da Temperatura (RET)

A técnica de RET consiste da avaliação da resistividade elétrica, por meio das medidas de variação de tensão elétrica no material durante resfriamento e aquecimento, sob uma corrente elétrica constante de baixa intensidade (conhecida) de forma a provocar uma diferença de potencial entre dois pontos (ddp). A Figura 52 permite entender a esquematização do ensaio com uma mola LMF.

Figura 52 - Esquema da montagem para o ensaio de RET.



Fonte: Autoria própria.

Nesses ensaios foram ensaiadas as próprias $M_{LMF}NiTi$ (Figura 52. a). Para determinar as temperaturas de transformação, cada mola foi instrumentada com quatro terminais micro soldados de maneira equidistantes. Pelos terminais mais externos se faz passar uma corrente contínua de baixa intensidade utilizando uma fonte de corrente contínua de 200W, modelo E3633A, da marca Agilent (Figura 52 b). A passagem dessa corrente gera uma variação da tensão elétrica (ddp) nos dois terminais mais internos, que é continuamente monitorada em função da temperatura. A fonte foi ligada nas extremidades do canal de alimentação e a diferença de potencial foi medida nos outros dois eletrodos internos, através de um aquisitor de dados, modelo 34970, da marca Agilent (Figura 52. c), que envia o sinal medido para um computador. A variação de temperatura da mola durante o ensaio, foi realizado por banho termoregulável modelo CC-902, da marca Hubber (Figura 52. e), na faixa de temperatura de 100°C a -60°C, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de 5°C/min. Os valores de temperatura foram medidos utilizando um termopar do tipo K com diâmetro de 100 μm (Figura 52. f).

Para os resultados de RET, a variação percentual de resistência elétrica, são calculados pela relação entre o valor de resistência elétrica na temperatura de 100°C (R_{Ref}) e um valor de resistência elétrica instantânea (R_i). A partir desses valores, é possível obter a relação $(\Delta R / R_{ref}) * 100$, em que $\Delta R = R_i - R_{ref}$.

4.4.3. Caracterização Mecânica.

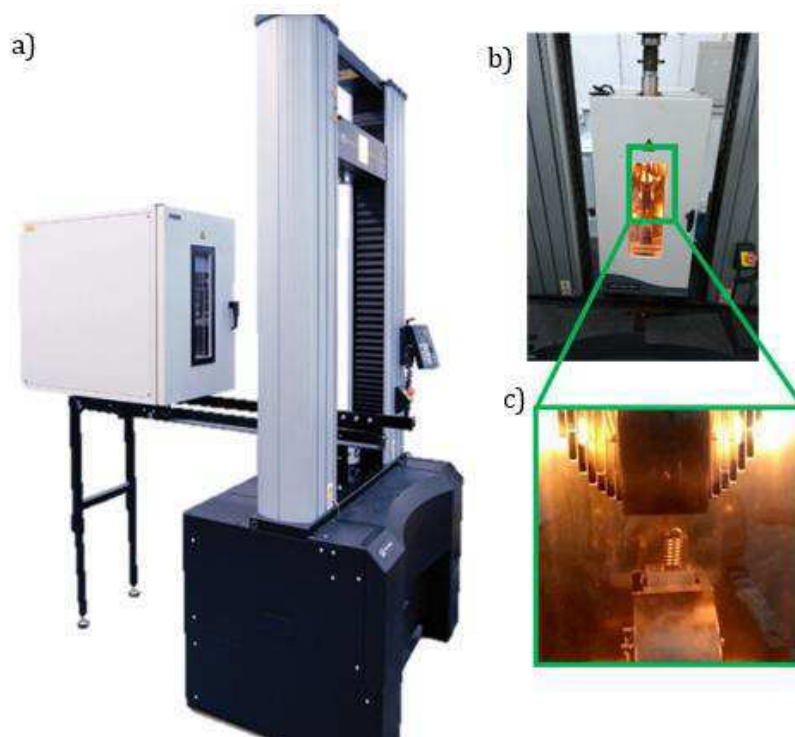
4.4.3.1. Ensaio de tração Estático

Os ensaios mecânicos de tração foram realizados a temperatura ambiente de (25 \pm 2 °C), em máquinas de ensaios universais eletromecânicos. Os ensaios estáticos foram realizados na máquina da marca Instron®, modelo 5582, equipada com célula de carga de 30 kN e os ensaios e dinâmicos foram realizados na máquina da marca Instron®, modelo Electropuls E10000, equipada com célula de carga de 1,0 kN, e resolução de 0,10N. O objetivo destes ensaios foi avaliar o comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ em carregamento estático e dinâmico. Para esses ensaios foram utilizados os comprimentos úteis das molas que corresponde ao comprimento das espiras ativas.

Nos ensaios estáticos antes da fixação das $M_{LMF}NiTi$, elas foram aquecidas a uma temperatura um pouco superior a temperatura de transformação austenítica (A_f)

utilizando a câmara térmica como mostra a Figura 53, afim de recuperar alguma possível deformação residual e garantir que as molas estivessem no seu estado SE.

Figura 53 – Montagem de ensaio estático: a) Máquina de ensaios INSTRON,5582; (b) Ensaio montado com câmara térmica; (c) Mola aquecida antes da fixação.



Fonte: Autoria própria.

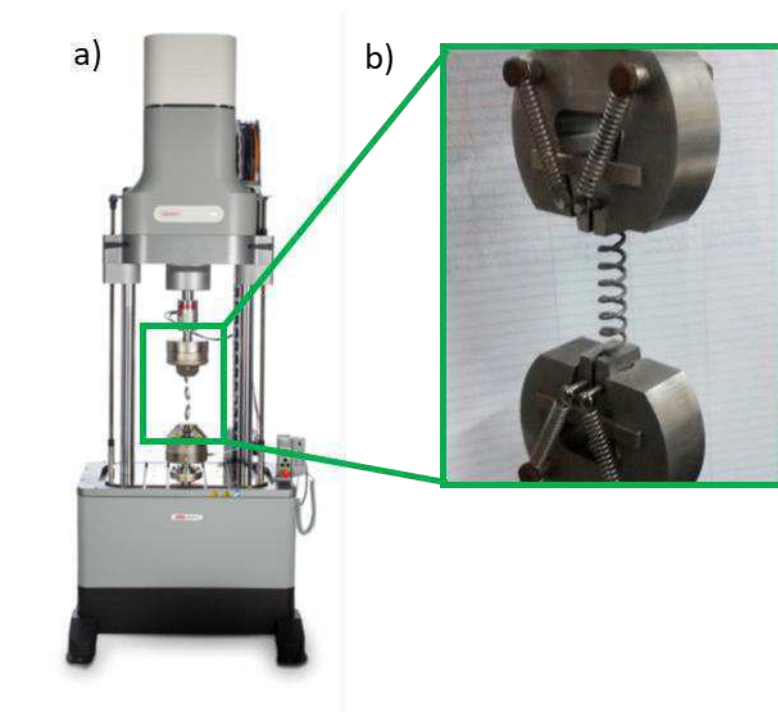
Nesses ensaios as $M_{LMF}NiTi$ foram fixadas na máquina utilizando uma garra do tipo jacaré e foram submetidas a ciclos de deformação de 10% até 70% em relação ao comprimento útil, deixando em cada ciclo de descarregamento uma força residual de 2N. A velocidade de carregamento e descarregamento utilizada foi de 1% / min.

4.4.3.2. Ensaio de tração Estático

Nos ensaios dinâmicos antes da fixação das $M_{LMF}NiTi$, elas foram aquecidas a uma temperatura um pouco superior a temperatura austenítica (A_f) utilizando um soprador térmico e posteriormente foram fixados na máquina utilizando uma garra plana. Esses testes foram executados sob três frequências distintas (0,3Hz, 0,5Hz e 0,7Hz) durante 128 ciclos, com deformação constante de 10% a 70% em relação ao comprimento útil. Durante os testes a temperatura ambiente e a temperatura das molas foram monitoradas através

de um aquisitor de dados modelo MX804B Quatum X, da marca HBM, com auxílio de um termopar tipo K. A Figura 54 ilustra a montagem do ensaio.

Figura 54 – Montagem ensaio dinâmico: (a) Máquina eletrodinâmica de ensaios Instron, Electropuls E10000; (b) Detalhes da montagem da mola LMF com termopar.



Fonte: Autoria própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Fabricação das Molas LMF

A metodologia adotada para fabricação das $M_{LMF}NiTi$ utilizando o processo de fundição de precisão com injeção por centrifugação (FIC), proporcionou a obtenção de 28 $M_{LMF}NiTi$, reproduzindo inclusive as diferentes configurações dimensionais, com bastante sucesso. Na Figura 55 é possível visualizar as diferentes configurações geométricas produzidas, brutas de fundição após a completa remoção do revestimento cerâmico.

Figura 55 - As $M_{LMF}NiTi$ obtidas pelo processo de fundição de precisão.



Fonte: Autoria própria.

5.2. Inspeção Visual e Análise Dimensional

Para avaliar os defeitos de fundição nas $M_{LMF}NiTi$ foram realizadas Inspeções Visuais e Análise Dimensional no Projetor de Perfil. Na figura 56 são apresentadas as imagens das inspeções superficiais. Os resultados mostraram que há presença de discontinuidades superficiais como por exemplo bolhas, rugosidade superficial e rebarbas.

Figura 56 - Inspeção visual da superfície das Molas de LMF Ni-Ti



Fonte: Autoria própria.

O aspecto fosco que é observado na superfície das molas pode ter origem de uma reação superficial que ocorre na interface metal/molde durante a solidificação (SIMÕES, 2016). O principal desafio da metalurgia com ligas de titânio é a alta reatividade com quase todos os materiais cerâmicos refratários. Normalmente, uma reação corrosiva que produz uma superfície dura e quebradiça enriquecida com oxigênio que prejudica a qualidade superficial, bem como as propriedades das peças fundidas (FREITAG et al. 2018).

A presença de bolhas, surge devido ao ar preso na interface modelo/molde, durante o processo de obtenção do molde. O surgimento dessas bolhas ocorre no contato da lama refratária com o modelo, devido a uma alta tensão superficial entre esses materiais. Há utilização de fluidos adequados pode diminuir ou eliminar esse inconveniente. Um dos fatores que aumenta a incidência de bolhas é a complexidade da geometria. As rebarbas foram geradas por micro trincas no material cerâmico gerados pelas tensões superficiais durante a sinterização do molde no forno. Essas descontinuidades foram retiradas por meio de um processo de esmerilhamento.

Para avaliar o grau de precisão inerente ao processo de fabricação, foi realizada a medição e a correspondente comparação entre o modelo em cera e as $M_{LMF}NiTi$, conforme

mostrado de forma resumida nas Tabelas 3 e Tabela 4. Foram realizadas 30 medições de cada parâmetro: passo e diâmetro do fio, dessa forma é possível estimar a variação dimensional entre o modelo em cera e o produto fundido.

Tabela 3 - Medições dos diâmetros realizadas em projetor de perfil nas molas em cera e brutas de fundição.

Diâmetro do fio [mm]			
Código	Mola Final	Mola De Cera Impressa	Variação Dimensional
M_SE_P2_D15	1,52 ± 0,09	1,55±0,09	1,7%
M_SE_P3_D15	1,48 ± 0,09	1,49±0,09	1,5%
M_SE_P4_D15	1,49 ± 0,09	1,51±0,09	1,3%
M_SE_P5_D15	1,51± 0,09	1,53±0,09	1,3%
M_SE_P6_D15	1,49 ± 0,09	1,50±0,09	1,2%
M_SE_P5_D10	1,10 ± 0,03	1,12±0,08	1,7%
M_SE_P5_D20	2,07 ± 0,10	2,09±0,10	1,2%

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 4 - Medições passos realizadas em projetor de perfil nas molas em cera e brutas de fundição.

Passo [mm]			
Código	Mola Final	Mola De Cera	Variação Dimensional
M_SE_P2_D15	2,25± 0,06	2,19 ± 0,10	2,7%
M_SE_P3_D15	3,34± 0,13	3,39 ± 0,13	1,5%
M_SE_P4_D15	3,91± 0,09	3,99 ± 0,14	2,0%
M_SE_P5_D15	5,16± 0,18	5,11± 0,16	1,0%
M_SE_P6_D15	6,18± 0,19	6,21± 0,18	0,5%
M_SE_P5_D10	5,25± 0,09	5,13± 0,16	2,3%
M_SE_P5_D20	5,18± 0,06	5,11± 0,16	1,4%

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos resultados resumidos na Tabela 3, fica evidente as variações dimensionais nas $M_{LMF}NiTi$. O material apresentou uma redução dimensional máxima de 1,7% em relação ao modelo em cera para o diâmetro do fio. A hipótese é que essa redução pode estar relacionada a diversos fatores, como as variações dimensionais da cera

durante o processo de sinterização do revestimento cerâmico, além da contração do metal solidificado e a expansão do revestimento cerâmico que não foi suficiente para compensar a redução dimensional do metal fundido. Em relação ao passo a variação dimensional também é influenciada pela redução do diâmetro, por isso a variação do passo chega em alguns casos para algumas molas os níveis são superiores aos dos diâmetros, chegando a variações de até 2,7%, como pode ser visto na Tabela 4. As variações estão em níveis aceitáveis e não comprometeram o resultado geométrico final desejado.

Conforme relatado por Julien (2002) e Leal et al. (2006) a contração do metal nas fundições por cera perdida é complexa devido à combinação de efeitos de expansão térmica dos revestimentos e uma compensação dimensional da cavidade do molde. Para corrigir tais efeitos é necessário investigar a contração e possíveis distorções que afetam o produto fundido. No estudo com peças de titânio, Freitag et al. (2018) mostraram que a qualidade das peças fundidas depende não apenas da reação do molde e material fundido, mas também da precisão dimensional e da qualidade superficial do molde. Elshahawy (2015) avaliou a precisão superficial de amostras de titânio fundido em revestimentos cerâmicos e ficou evidente uma menor precisão com relação à outras ligas.

A variação dimensional também foi identificada em outras pesquisas de fabricação de componentes LMF que utilizaram a técnica de fundição de precisão com injeção centrífuga, comparativamente as reduções dimensionais encontradas nesta pesquisa foram inferiores aos encontrados no trabalho de Montenegro (2016) com telas de LMF de Ni-Ti na qual as contrações ficaram entre 5 e 16%. No trabalho de Simões (2016) as molas LMF obtidas, apresentaram níveis de contração em torno de 10%.

Após o tratamento térmico, as molas não apresentaram variações dimensionais em comparação ao seu estado bruto de fundição, conforme esperado.

Utilizando as equações (31) e equação (24) pode-se calcular respectivamente o volume das espiras ativas das molas e o ângulo do passo inicial, este por sua vez é um dos parâmetros que influencia nas tensões em molas que são submetidas a grandes deformações de acordo com An et al. (2012). Na Tabela 5 são apresentados os valores diâmetro médio inicial, ângulo do passo inicial e Volume das espiras ativas.

Com base nos resultados obtidos por An et al. (2012) é esperado que durante os ensaios mecânicos as molas sofram níveis de transformação de fase diferentes, para cada deformação, por terem diferentes ângulos de passo.

Tabela 5 - Valores dos Ângulos dos passos das molas com base na equação (24)

Código	Diâmetro Médio Inicial [mm]	Ângulo do passo Inicial [graus]	Volume da mola [mm ³]
M_SE_P2_D15	9,06±0,13	4,7	369,7
M_SE_P3_D15	9,11±0,14	7,1	347,3
M_SE_P4_D15	8,98± 0,15	8,1	352,1
M_SE_P5_D15	8,88± 0,14	10,5	349,2
M_SE_P6_D15	8,97± 0,18	12,6	349,9
M_SE_P5_D10	6,47± 0,16	14,3	138,2
M_SE_P5_D20	11,74±0,15	8,0	887,5

Fonte: Autoria Própria.

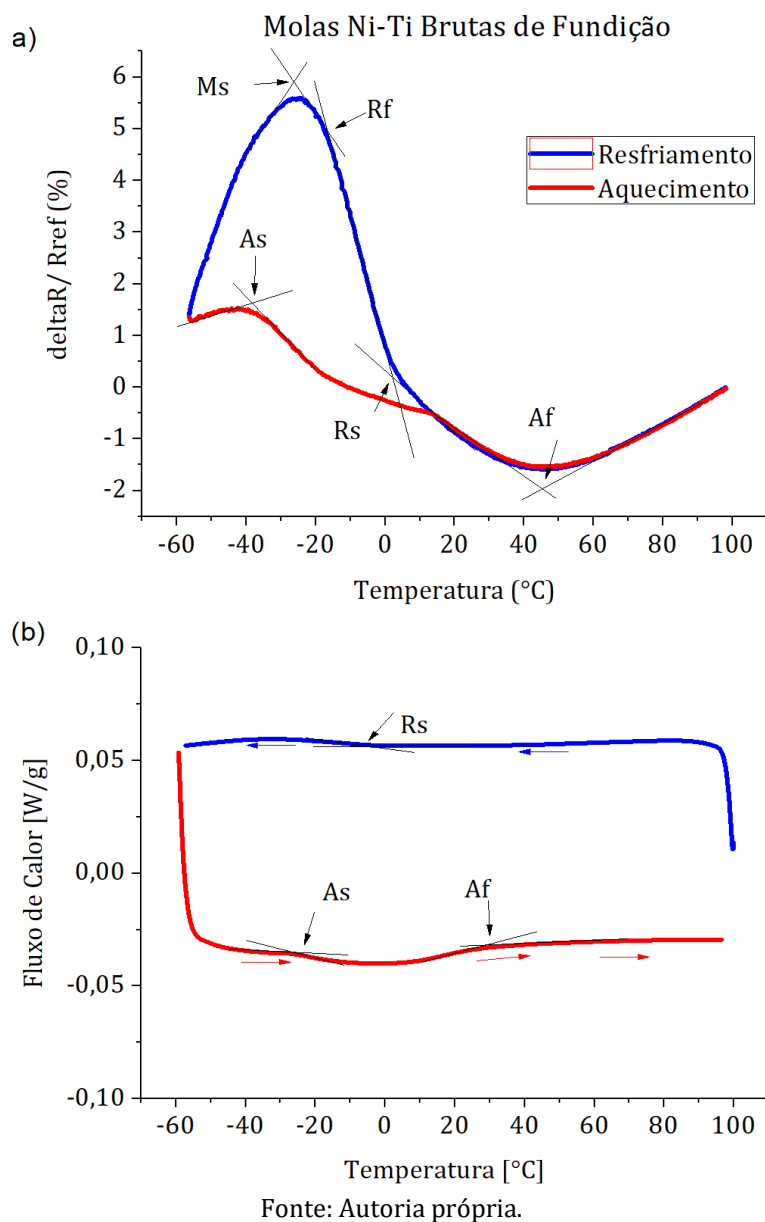
5.3 Análise Térmica

Com as $M_{LMF}NiTi$ obtidas, foi realizada a caracterização térmica nos estados bruto de fundição e tratado termicamente. As análises foram feitas através das curvas geradas nos ensaios de DSC e RET.

5.3.1. Molas Bruta de Fundição

A determinação das temperaturas de transformação foi realizada pelo método de tangentes aplicadas aos picos de transformação. Na Figura 57 são mostrados os termogramas de DSC e RET das molas Ni-Ti brutas de fundição.

Figura 57 - Curvas de análise obtidas para as Molas Ni-Ti Brutas de Fundição via: (a) RET; (b) DSC.



A partir da análise da Figura 57, verifica-se que na condição bruta de fundição, as molas Ni-Ti apresentaram transformação de fase característico de LMF. Pelo gráfico RET da Figura 57 (a), observa-se uma curva característica da presença de fase intermediária conhecida por fase-R. A presença dessa fase em LMF de Ni-Ti, em geral é mais evidente nos ensaios de RET, pois os ensaios de DSC geralmente revelam apenas dois picos de transformação durante o resfriamento.

As Tabela 6 e Tabela 7 resumem os resultados obtidos via DSC e RET para as $M_{LMF}NiTi$ brutas de fundição.

Tabela 6 - Resultados do ensaio DSC para Molas Brutas de Fundição

DSC	Aquecimento			Resfriamento		
	Código	As (°C)	Af (°C)	Rs(°C)	Rf(°C)	Ms(°C)
M_SE_P2_D15	-26,4	37,9	2,7	-	-	-
M_SE_P3_D15	-25,6	22,6	-5,4	-	-	-
M_SE_P4_D15	-28,9	28,8	-3,5	-	-	-
M_SE_P5_D15	-26,9	24,0	-5,4	-	-	-
M_SE_P6_D15	-14,2	12,1	-10,1	-	-	-
M_SE_P5_D10	-25,3	21,8	-11,5	-	-	-
M_SE_P5_D20	-26,4	28,7	-5,1	-	-	-

Fonte: Autoria própria

Tabela 7 - Resultados do ensaio RET para Molas Brutas de Fundição

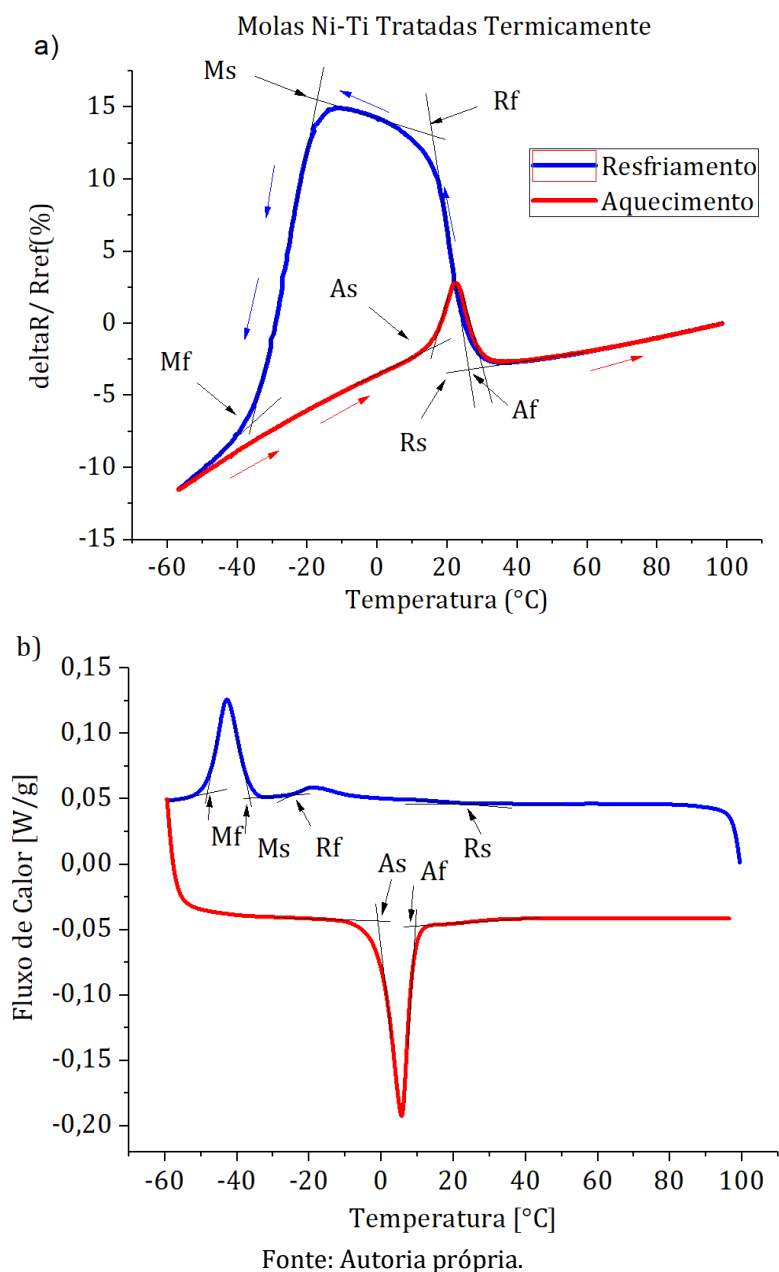
RET	Aquecimento			Resfriamento		
	Código	As (°C)	Af (°C)	Rs(°C)	Rf(°C)	Ms(°C)
M_SE_P2_D15	-35,6	41,7	17,5	-11,6	-31,0	-
M_SE_P3_D15	-19,0	42,2	1,9	-13,4	-25,7	-
M_SE_P4_D15	-17,1	46,3	-	-	-22,1	-
M_SE_P5_D15	-19,5	49,2	1,1	-13,8	-28,6	-
M_SE_P6_D15	-38,3	49,0	-1,8	-18,2	-32,2	-
M_SE_P5_D10	1,3	49,4	-	-	-25,4	-
M_SE_P5_D20	-38,6	45,5	2,2	-16,4	-26,0	-

Fonte: Autoria própria.

5.3.2 Molas Tratadas Termicamente

Após o tratamento térmico das $M_{LMF}NiTi$ realizou-se os ensaios de caracterização térmicas e se determinou as temperaturas de transformação pelas duas técnicas citadas anteriormente. Na Figura 58 são mostradas as curvas características dos resultados obtidos para $M_{LMF}NiTi$.

Figura 58 - Curvas de análise obtidas para as Molas Ni-Ti Tratadas Termicamente via: (a) RET; (b) DSC.



Constatou-se pelas análises das curvas que as $M_{LMF}NiTi$ possuem transformação de fase, brutas ou tratadas termicamente, porém o aspecto quantitativo dos picos fica mais definido e aumenta as entalpias de transformação, após o tratamento térmico, possivelmente pela atenuação do encruamento originado da fundição. Com base nos termogramas apresentados na Figura 58 conclui-se que o tratamento térmico realizado promoveu uma redução nas temperaturas de transformação de fase das $M_{LMF}NiTi$.

Especificamente no caso do DSC de molas brutas o range de temperatura no resfriamento (-60°C) não é suficiente para completar a transformação de fase do material,

que ocorre em duas etapas, envolvendo um primeiro pico de formação da fase R, seguido de um segundo pico da martensita propriamente dita, não completado por falta de capacidade de resfriamento do equipamento.

As Tabela 8 e Tabela 9. resume todos os resultados obtidos via DSC e RET para as $M_{LMF}NiTi$ tratadas termicamente.

Tabela 8 - Resultados do ensaio DSC para Molas Tratadas Termicamente

DSC	Aquecimento			Resfriamento		
Código	As (°C)	Af (°C)	Rs(°C)	Rf(°C)	Ms(°C)	Mf(°C)
M_SE_P2_D15	-6,3	13,2	23,9	-11,5	-35,2	-51,6
M_SE_P5_D15	-4,7	9,6	-15,4	-33,2	-37,5	-53,8
M_SE_P6_D15	-4,9	7,3	-6,3	-24,7	-42,8	-
M_SE_P5_D20	-1,1	9,5	-6,3	-24,6	-36,6	-48,3

Fonte: Autoria própria

Tabela 9 - Resultados do ensaio RET para Molas Tratadas Termicamente

RET	Aquecimento			Resfriamento		
Código	As (°C)	Af (°C)	Rs(°C)	Rf(°C)	Ms(°C)	Mf(°C)
M_SE_P2_D15	16,3	30,3	26,6	15,1	-17,7	-34,4
M_SE_P3_D15	13,3	25,1	22,4	12,9	-23,9	-35,2
M_SE_P4_D15	4,9	23,7	12,9	4,3	-15,5	-21,9
M_SE_P5_D15	15,1	25,9	23,6	12,3	-19,3	-54,9
M_SE_P6_D15	-1,5	11,1	7,3	-4,3	-35,7	-46,7
M_SE_P5_D10	17,9	30,6	27,7	18,7	-18,0	-30,3
M_SE_P5_D20	3,2	21,0	18,9	5,3	-43,6	-

Fonte: Autoria própria

Morin, Guénin e De Araújo (2000) discutiram que as tensões internas tendem a aumentar as temperaturas de transformação em LMF Ni-Ti, sendo estas reduzidas pelo tratamento de homogeneização. Esse comportamento foi observado nas molas tratadas termicamente, que sofreram uma redução dos valores de A_f , o qual pode estar relacionado ao alívio de tensões.

O alívio de tensões: ocorre principalmente quando um material previamente submetido a processamentos mecânicos se encontra com uma microestrutura cristalina

com alta densidade de defeitos. A exposição deste material a uma temperatura relativamente elevada fornece uma força motriz térmica que será capaz de provocar a reorganização atômica e a eliminação parcial ou total destes defeitos (JIANG et al., 2013).

5.4. Análise Mecânica

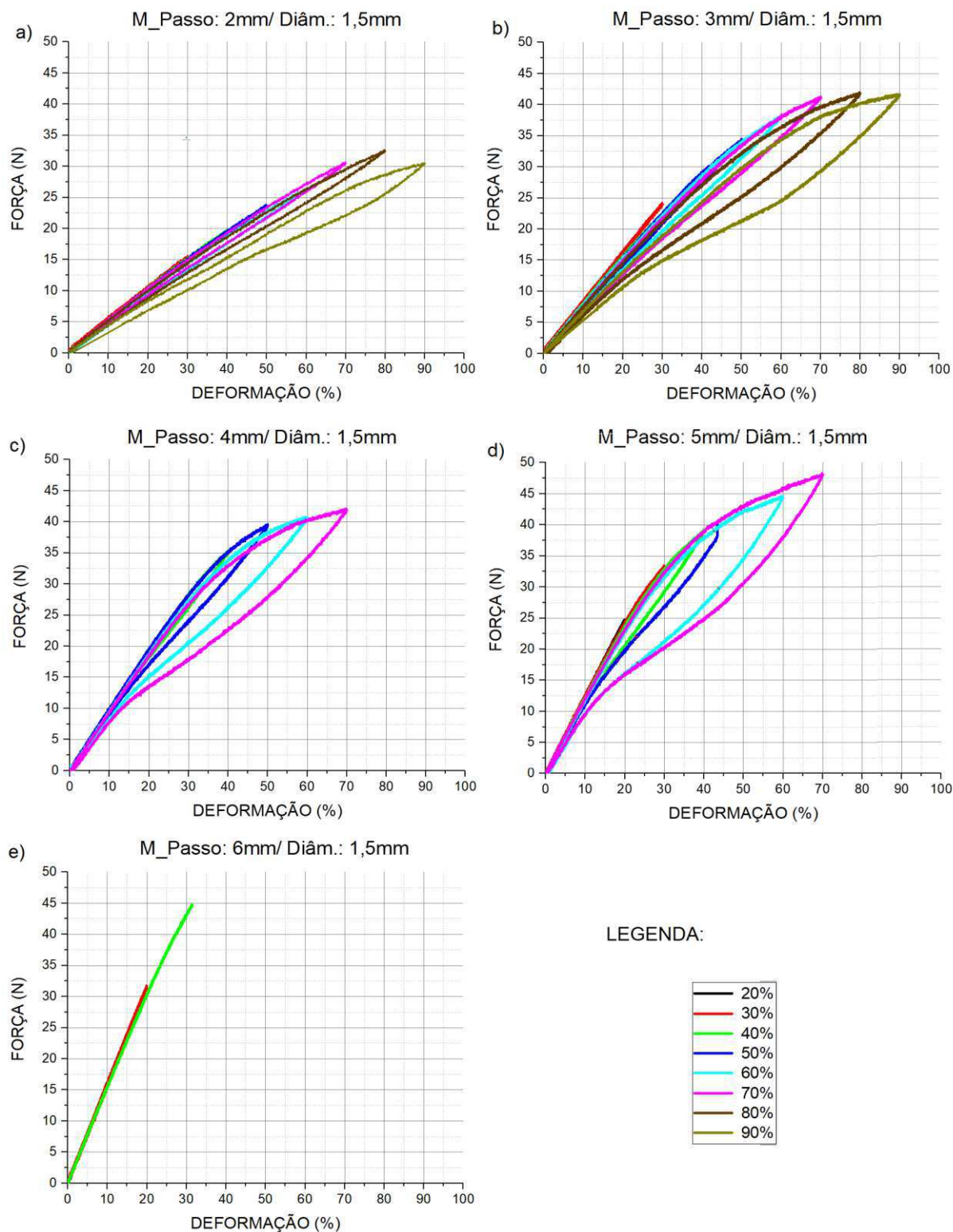
Para comprovar a presença das transformações de fase e avaliar o comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ pseudoelásticas, foram realizados ensaios mecânicos em condições estática e dinâmica. A análise do comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ a partir das curvas força x deformação foram discutidas de forma qualitativa em função dos parâmetros dimensionais selecionados.

5.4.1. Caracterização Estática

A Figura 59 mostra um conjunto de curvas de força-deformação das $M_{LMF}NiTi$, demonstrando como as variações de passo afetaram qualitativamente seu comportamento. As $M_{LMF}NiTi$ apresentaram curvas características de SE recuperando praticamente toda a deformação imposta (deformação residual de apenas 1%).

Na Figura 59(a). a 59(e) o comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ é mostrado em função do passo. Foi observado que o aumento do passo provocou um aumento da força gerada para atingir o mesmo nível de deformação linear. Outro ponto observado é que o aumento do passo promoveu um aumento da energia dissipada por ciclo, fato que pode ser comprovado com os valores apresentados na Tabela 10.

Figura 59 - Comportamento força-deformação $M_{LMF}NiTi$, para os ciclos de tração, com diferentes passos e tratadas termicamente: (a) M_P2_D15; (b) M_P3_D15; (c) M_P4_D15; (d) M_P5_D15; (e) M_P6_D15.



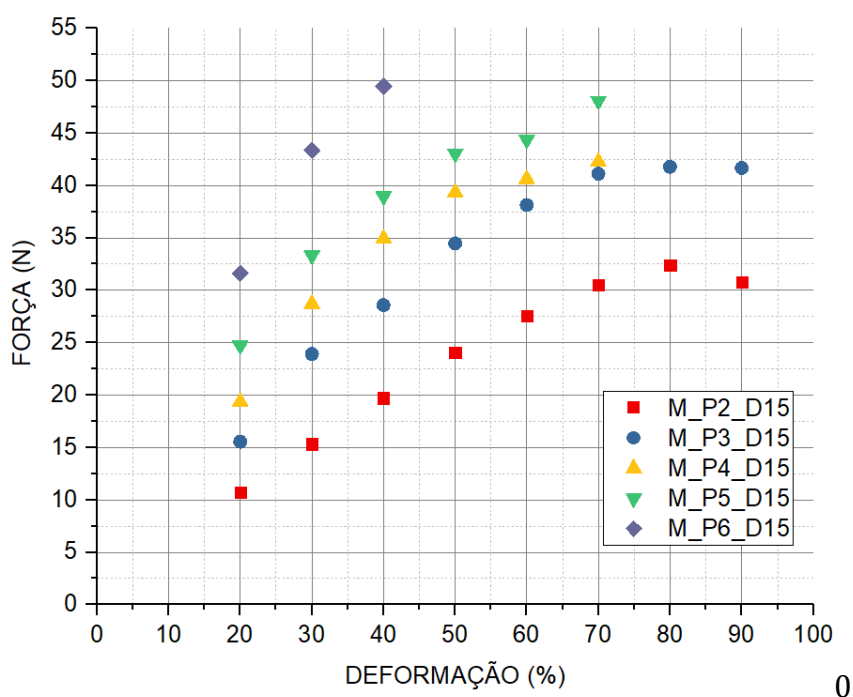
Fonte: Autoria própria

As $M_{LMF}NiTi$ de passo 2,0mm e 3,0mm suportaram ciclos de até 90% de deformação linear sem rompimento, produzindo nesta deformação forças da ordem de

31N e 42N, respectivamente. As molas com passo 4,0mm e 5,0mm suportaram ciclos de até 70% de deformação linear sem rompimento, produzindo nesta deformação forças da ordem de 42N e 48N, respectivamente. Por fim as Molas de passo 6,0 mm suportaram deformações de apenas 30%, rompendo durante o carregamento de 40%, gerando forças em torno de 45N. Com isso verificamos que o acréscimo de apenas 1,0mm nos valores de do passo pode promover o aumento das forças necessárias para produzir a mesma deformação entre 6 a 30%.

Esse comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ está relacionado influência do ângulo do passo ou ângulo de hélice, com base nos resultados obtidos por An et al. (2012) durante os ensaios mecânicos as molas, por terem ângulos de passo diferentes, sofreram comparativamente níveis de transformação de fase diferentes. As molas com valores de ângulo de passo próximos ou superiores a 12° atingem as tensões de ruptura previamente Juvinal e Marshek (2012). Nos resultados apresentados mostram que as molas de passo 6mm com ângulo de $12,59^\circ$ romperam ainda na zona elástica. A Figura 60 permite comparar os níveis de força máxima atingidas para todas as deformações para cada um dos 5 tipos de mola.

Figura 60 - Comportamento Força - Deformação para ciclos de tração em $M_{LMF}NiTi$, com diferentes passos.

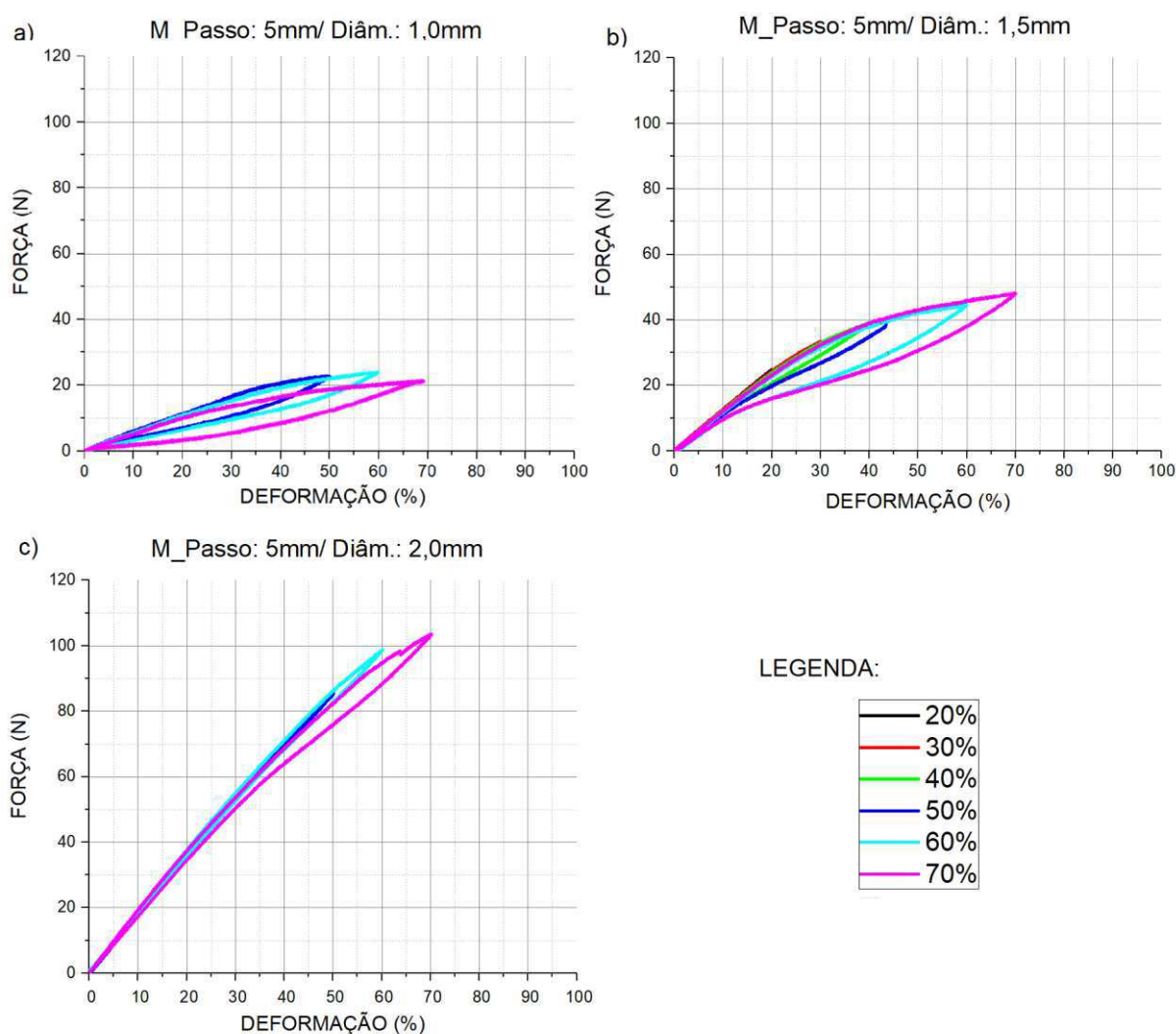


Fonte: Autoria própria

Os ensaios de força-deformação também foram realizados nas $M_{LMF}NiTi$ com diferentes diâmetros de fio. A Figura 61 mostra um conjunto de curvas de força-deformação das $M_{LMF}NiTi$, demonstrando como as variações de diâmetro do fio afetaram qualitativamente seu comportamento. As molas apresentaram uma curva característica de SE recuperando praticamente toda a deformação imposta (deformação residual de apenas 1%).

Na Figura 61(a). a 61(c) o comportamento mecânico das $M_{LMF}NiTi$ é mostrado em função do diâmetro de fio. Foi observado que o aumento do diâmetro do fio provocou um aumento da força gerada para atingir o mesmo nível de deformação linear.

Figura 61 - Comportamento força – deformação $M_{LMF}NiTi$, para os ciclos de tração, com diferentes diâmetros de fios e tratadas termicamente: (a) M_{P5_D10} ; (b) M_{P5_D15} ; (c) M_{P5_D20} .

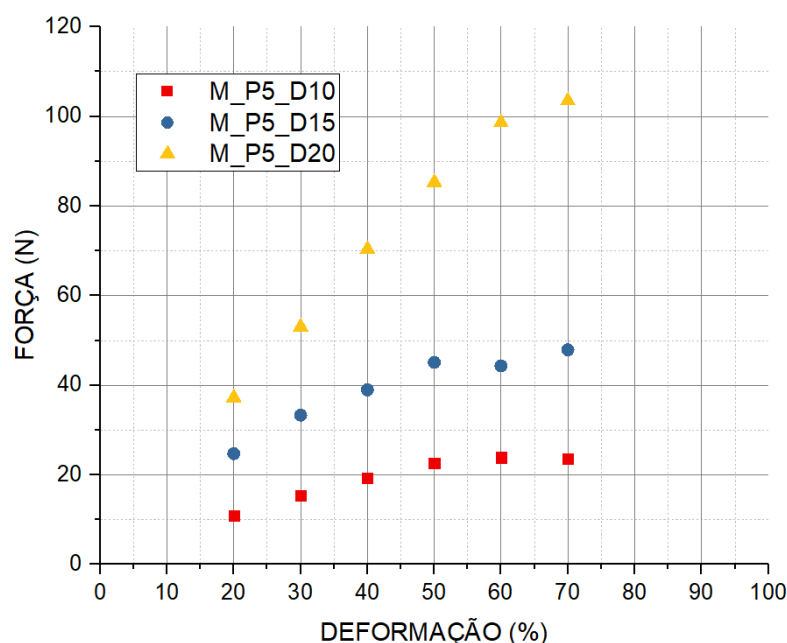


Fonte: Autoria própria

As $M_{LMF}NiTi$ com diâmetro de fio de 1,0mm, 1,5mm e 2,0mm suportaram ciclos de até 70% de deformação linear sem rompimento, produzindo nesta deformação forças da ordem de 24N, 48N e 103N, respectivamente. Com isso verificamos que o acréscimo de apenas 0,5mm nos valores de diâmetro do fio pode dobrar os valores das forças necessárias para produzir a mesma deformação. Da mesma forma os ângulos de passo foram determinantes nos níveis de transformação de fase apresentadas. Enquanto as molas $M_{SE_P5_D10}$ e $M_{SE_P5_D15}$ com ângulo de passo de $14,3^\circ$ e $10,5^\circ$ respectivamente, estão próximas de completar a transformação de fase a mola de $M_{SE_P5_D20}$ com ângulo de passo $8,0^\circ$ está no início da transformação de fase.

A Figura 62 permite comparar os níveis de força necessária para produzir a mesma deformação. máxima atingidas em todas as deformações para cada um dos 3 tipos de mola.

Figura 62 - Comportamento Força-Deformação para ciclos de tração em $M_{LMF}NiTi$, com diferentes diâmetros de fio.



Fonte: Autoria própria.

A energia dissipada em cada ciclo termomecânico, obtida pelo cálculo da área interna do ciclo de força-deslocamento, reflete a histerese mecânica do material com memória de forma. A Tabela 10 mostra os resultados de energia dissipada por ciclo (W_d), rigidez secante e fator de perda em função da deformação.

Tabela 10 – Parâmetros Mecânicos das $M_{LMF}NiTi$ sob várias amplitudes de deformação

Componente	Def. máx. [%]	Energia dissipada por ciclo [MJ/m^3]	Rigidez Secante $\times 10^3$ (N/m)	Fator De Perda (η)
M_SE_P2_D15	50	0,08	3,30	0,006
	60	0,19	2,99	0,009
	70	0,29	2,78	0,016
M_SE_P3_D15	50	0,34	3,24	0,010
	60	0,71	2,76	0,015
	70	1,19	2,45	0,019
M_SE_P4_D15	50	0,85	3,18	0,018
	60	1,78	2,78	0,028
	70	2,92	2,44	0,036
M_SE_P5_D15	50	1,81	2,73	0,023
	60	3,64	2,27	0,037
	70	5,41	2,06	0,041
M_SE_P5_D10	50	4,68	1,29	0,044
	60	6,19	1,12	0,045
	70	6,93	0,86	0,049
M_SE_P5_D20	50	0,21	5,54	0,004
	60	0,40	5,25	0,006
	70	0,92	4,77	0,012

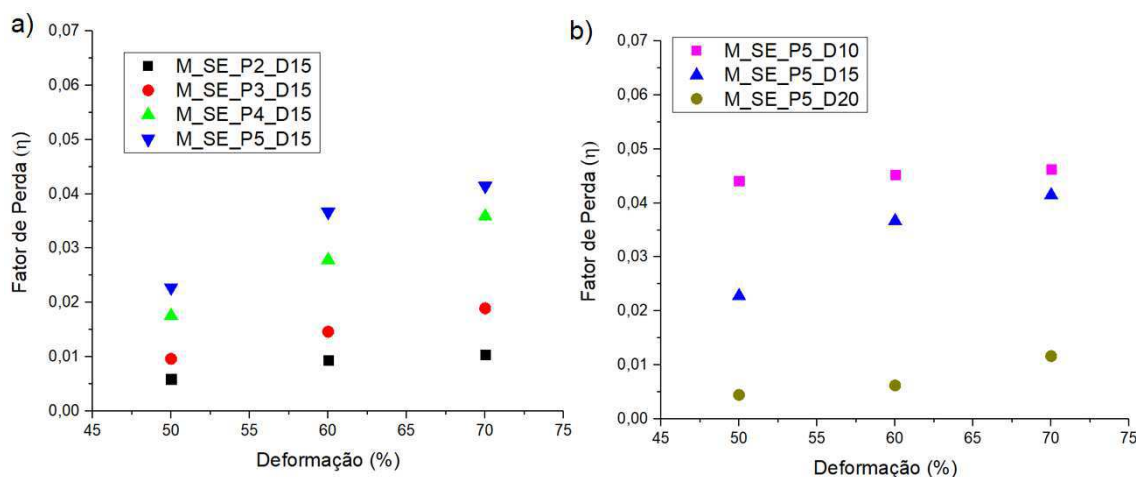
Fonte: Autoria própria

Analisando o comportamento da W_d é natural que com o aumento da deformação cresce a presença da fase martensita aumentando a energia dissipada por ciclo e diminuindo os valores de rigidez secante. Sabe-se que LMF submetidas a tração são encontrados valores de W_d entre 5 e 15 MJ/m^3 (ZURBITU et al., 2010). Para elementos LMF que trabalham sob cisalhamento, como é o caso de molas helicoidais, são esperados valores menores, pois as tensões de cisalhamento são menores que tensões de tração. Conforme os resultados encontrados por Grassi (2014) com molas fechadas (ângulo de passo = zero) sob deformações de 500%, que os valores de W_d variaram entre 0,35 MJ/m^3 e 1,2 MJ/m^3 . Contudo neste trabalho utilizou-se de molas abertas (ângulo de passo > zero), sob deformação de até 70%, onde ainda não se tem a completa transformação de fase, por isso espera-se valores de W_d em uma faixa mais ampla. Os valores de W_d observados para as $M_{LMF}NiTi$ variaram de 0,08 MJ/m^3 (M_SE_P2_D15 sob deformação de 50%) a 6,93 MJ/m^3 (M_SE_P5_D10 sob deformação de 70%).

Os valores do fator de perda por sua vez são totalmente dependentes da energia dissipada por ciclo de carregamento/ descarregamento, sendo assim é diretamente influenciada pela deformação que é imposta as $M_{LMF}NiTi$. Com isso observa-se variações relevantes do fator de perda com o aumento da amplitude de deformação.

Especificamente para as M_SE_P2_D15 houve uma variação em torno de 60%. A Figura 63 mostra graficamente os valores do fator de perda.

Figura 63 – Fator de Perda das $M_{LMF}NiTi$, em função da deformação máxima sob carregamento estático. (a) Valores para molas com diferentes passos; (b) Valores para molas com diferentes diâmetros.



Fonte: Autoria própria

Os valores obtidos estão em acordo com estudos anteriores que mostram valores do fator de perda para LMF geralmente é menor do que 0,1 (HOLANDA, 2014). (NESPOLI et al., 2017).

Utilizando os resultados obtidos de rigidez austenítica K_a , foram calculados os valores de módulo de cisalhamento G para $M_{LMF}NiTi$. Com a Equação (18) foram calculados os valores de G mostrados na Tabela 11. Nesta tabela são apresentados os valores de rigidez austenítica e módulo de cisalhamento que estão de acordo com a faixa encontrada na literatura (25 ~ 40GPa) para LMF de Ni-Ti na fase austenítica (AN et al, 2012).

Tabela 11 – Valores de Rigidez Austenítica e Módulo de Cisalhamento.

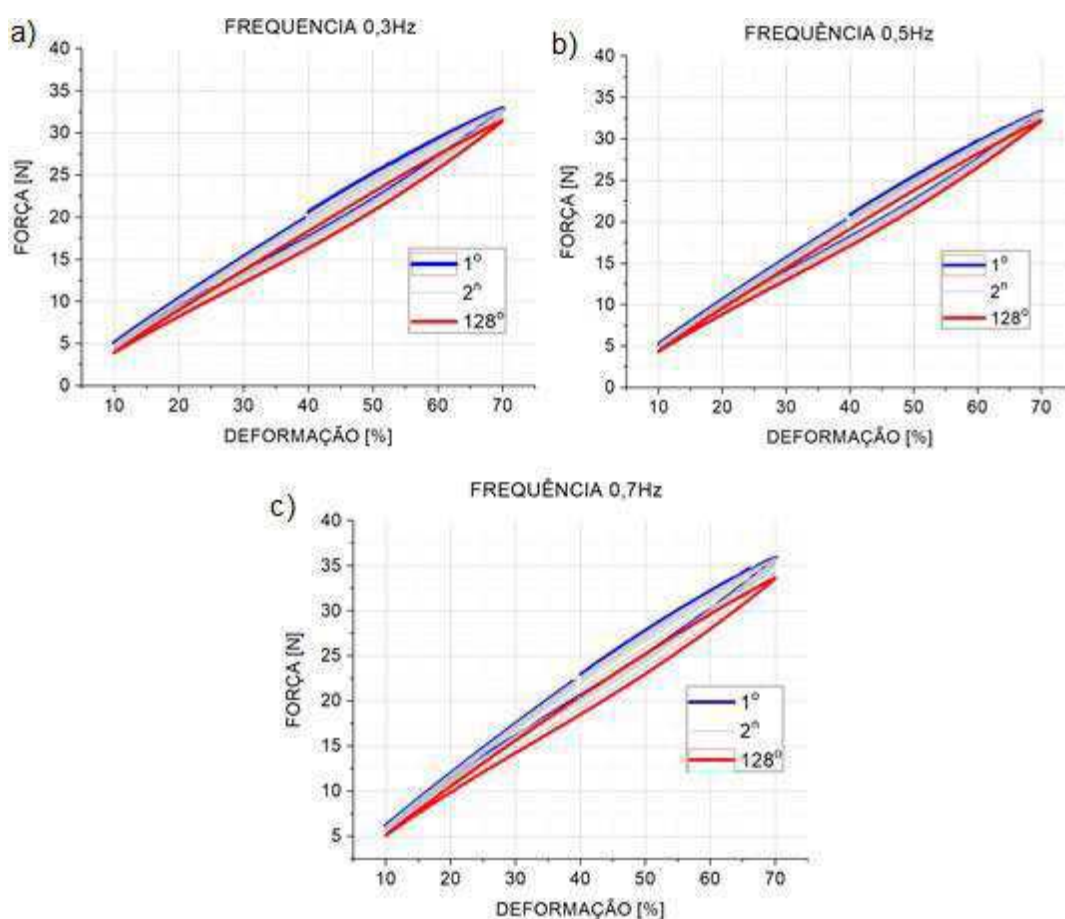
MOLA	RIGIDEZ AUSTENÍTICA	MÓDULO DE CISALHAMENTO (GPa)
M_SE_P2_D15	3,8	33,6
M_SE_P3_D15	3,8	38,7
M_SE_P4_D15	3,9	36,1
M_SE_P5_D15	3,9	35,0
M_SE_P6_D15	4,2	38,8
M_SE_P5_D10	2,2	25,5
M_SE_P5_D20	5,6	31,2

Fonte: Autoria Própria.

5.4.2. Caracterização Dinâmica

Conhecendo a faixa de deformação que as molas suportam após os ensaios estáticos foi possível escolher o intervalo de deformação para submeter as $M_{LMF}NiTi$ a ensaios dinâmicos. Para avaliar a resposta mecânica em diferentes frequências de trabalho. As $M_{LMF}NiTi$ foram submetidas em cada teste a 128 ciclos de carregamento e descarregamento no intervalo de deformação de 10% e 70%. A Figura 64 mostra um conjunto de curvas de força-deformação das $M_{LMF}NiTi$ M_SE_P2_D15, demonstrando o comportamento das molas sob frequência.

Figura 64 - Comportamento força – deformação da Mola M_SE_P2_D_15, sob frequência: (a) Frequência 0,3Hz; (b) Frequência 0,5Hz; (c)Frequência 0,7Hz.



Fonte: Autoria própria

Para esses testes verificou-se e uma simetria entre o ciclo de carregamento e descarregamento. A temperatura durante o ensaio foi monitorada e verificou-se que a temperatura nas $M_{LMF}NiTi$ se manteve relativamente constante. Com isso considera-se que a frequência não influenciou nas temperaturas das molas e que o calor latente gerado

pelo teste é totalmente dissipado pela convecção natural. Qualitativamente pode-se observar que os valores de força necessária para gerar a mesma deformação entre o 1º e 128º ciclos não teve variações relevantes (em torno de 3%).

Observou-se uma redução do laço histerético nas curvas da Figura 64 quando comparadas as curvas da Figura 59 e 61, constatada pela diminuição da energia dissipada por ciclo mostrado na Tabela 12. Nesta tabela são apresentados os valores de energia dissipada por ciclo, rigidez secante e fator de perda. A tendência de variação de tais parâmetros é evidente. No geral as configurações dimensionais influenciam diretamente na rigidez secante das molas.

Tabela 12 – Parâmetros Mecânicos das Molas Helicoidais LMF sob várias frequências

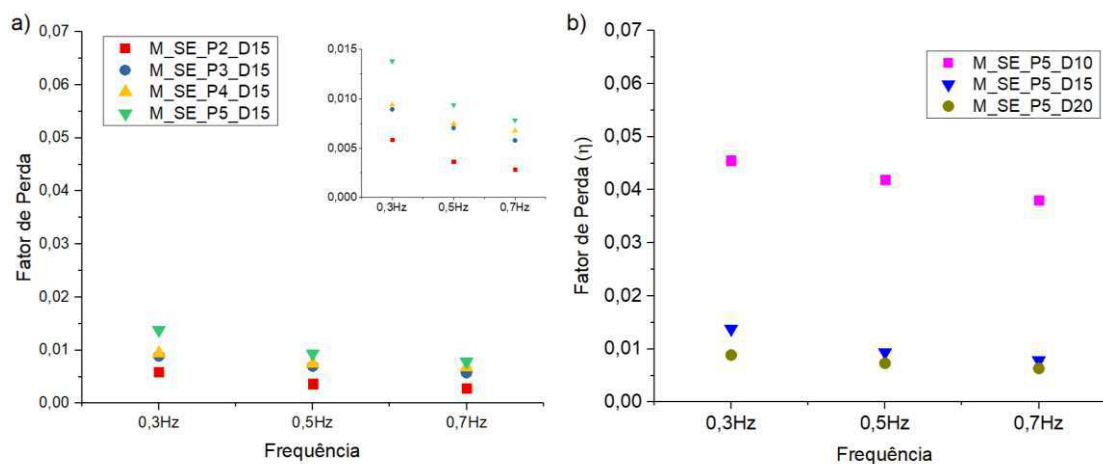
Componente	Freq. [Hz]	Energia dissipada por ciclo [MJ/m ³]	Rigidez Secante x10 ³ (N/m)	Fator De Perda (η)
M_SE_P2_D15	0,3	0,14	2,54	0,006
	0,5	0,13	2,56	0,004
	0,7	0,12	2,62	0,003
M_SE_P3_D15	0,3	0,47	2,44	0,009
	0,5	0,44	2,49	0,007
	0,7	0,43	2,48	0,006
M_SE_P4_D15	0,3	0,74	2,31	0,010
	0,5	0,67	2,49	0,008
	0,7	0,61	2,51	0,007
M_SE_P5_D15	0,3	1,76	2,16	0,014
	0,5	1,54	2,22	0,010
	0,7	1,30	2,25	0,008
M_SE_P5_D10	0,3	5,29	0,96	0,053
	0,5	5,15	0,99	0,048
	0,7	4,93	1,02	0,043
M_SE_P5_D20	0,3	0,58	2,95	0,009
	0,5	0,52	3,06	0,007
	0,7	0,46	3,13	0,006

Fonte: Aatoria Própria.

No geral a faixa de frequência ao qual as $M_{LMF}NiTi$ foram submetidas. Provocou uma redução dos valores do fator de perda quando comparados aos valores obtidos nos ensaios estáticos, apenas as molas M_SE_P5_D10 mantiveram os valores nos mesmos níveis. Fato que relacionado ao ângulo do passo dessas molas que é de 14,3º valor bem superior ao ângulo crítico 12º, pois as tensões envolvidas estão próximas das tensões de ruptura.

No geral a variação do fator de perda em função da frequência foi relevante com variações em torno de 50% para as M_SE_P2_D15 e M_SE_P5_D15. Silva (2009) mostrou a influência da frequência no fator de perda com redução mais significativas para frequências entre 1 e 10Hz. A Figura 65 mostra graficamente os valores do fator de perda.

Figura 65 - Fator de Perda das M_LMF NiTi., em função da frequência sob carregamento dinâmico. (a) Valores para molas com diferentes passos; (b) Valores para molas com diferentes diâmetros.



Fonte: Autoria própria

6. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho de pesquisa, foram:

- A fabricação das molas helicoidais de LMF Ni-Ti usando o processo de fundição de precisão foi possível com bastante sucesso e repetibilidade, sendo fabricadas 28 molas;
- As $M_{LMF}NiTi$ obtidas atingiram as geometrias desejadas com variações dimensionais da ordem de 2% na comparação com as molas padrão em cera;
- As $M_{LMF}NiTi$ apresentaram transformação de fase já no estado bruto de fundição, com temperaturas austeníticas situadas entre $-39^{\circ}C$ à $+50^{\circ}C$;
- O tratamento térmico promoveu uma redução das temperaturas de transformação fase, com as temperaturas austeníticas situadas entre $-7^{\circ}C$ à $+30^{\circ}C$. Também foi possível identificar as temperaturas de transformação martensítica, no resfriamento ($-55^{\circ}C$ à $-15,5^{\circ}C$). Esse tratamento térmico também promoveu o aparecimento da fase intermediária (R) durante o resfriamento;
- Os resultados dos testes estáticos de tração indicam que as molas possuem um comportamento superelástico quase ideal com deformação residual em torno de 1%;
- Foi possível avaliar a influência do ângulo do passo no comportamento mecânico. As $M_{LMF}NiTi$ com valores de ângulo de passo mais próximos do valor crítico de 12° mostraram maior susceptibilidade para o rompimento prematuro. Esse foi o caso das molas com passo 6mm, que romperam quando submetidas a deformações de 40%;
- As molas com passo 2mm e 3mm suportaram deformações de até 90%. As molas com passo 4mm e 5mm suportaram deformações de até 70%. O acréscimo de 1mm no passo pode aumentar de 6 a 30% as forças necessárias para produzir a mesma deformação;
- As $M_{LMF}NiTi$ com diâmetro de fio de 1,0mm a 2,0mm suportaram deformações de até 70% sem rompimento. O acréscimo de 0,5mm no diâmetro do fio duplicou as forças necessárias para produzir a mesma deformação;
- A energia dissipada por ciclo para deformação de 70% ficou situada na faixa de 0,29-6,23MJ/m³, estando de acordo com a faixa apontada pela literatura;

- O fator de perda para deformação de 70% ficou entre 0,012 e 0,049, compatível com os valores da literatura para molas fabricadas por processos convencionais;
- O módulo cisalhamento para as molas obtidas ficou entre 25 e 38 GPa, dentro da faixa apontada pela literatura (25-40 GPa);
- Com relação aos ensaios dinâmicos verificou-se que nos primeiros 30 ciclos, as $M_{LMF}NiTi$ passam por um processo de estabilização. As forças produzidas para atingir a mesma deformação não sofrem influência dos níveis de frequência na faixa estudada (0,3 a 0,7Hz). Contudo o fator de perda sofre redução significativa em relação aos ensaios estáticos e em função da frequência;
- Em geral, os resultados dos testes dinâmicos e estáticos mostram que as molas fornecem boa capacidade de dissipação de energia, rigidez secante e fator de perda em acordo com a presente literatura. Com base nesses resultados pode-se considerar que estes componentes têm potencialidade para serem aplicados no isolamento vibrações de baixa frequência;
- Finalmente, os resultados obtidos nesse trabalho levam essas $M_{LMF}NiTi$, ao encontro da inovação e ao avanço tecnológico, devido a diversas possibilidades de aplicações.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar uma análise numérica por simulação computacional, usando o método dos elementos finitos, para determinar a distribuição de tensão em cada geometria de mola específica;
- Analisar a influência no comportamento termomecânico em outras composições de LMF;
- Realizar um estudo detalhado das estruturas, a fim de identificar as principais causas de falha dessas molas;
- Realizar um estudo metalúrgico nas molas LMF obtidas por fundição de precisão;
- Realizar um estudo de tratamento superficial, com objetivo de determinar um processo com melhores propriedades mecânicas.

8. REFERÊNCIAS

AGUIAR, R. A. A; SAVI, M. A.; PACHECO, P. MCL. **Experimental investigation of vibration reduction using shape memory alloys**. Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, SAGE Publications, [s.l.], v. 24, n. 2, p.247-261, 2012.

AGUIAR, R. A. A. et al. **Shape Memory Alloy Helical Springs Performance: Modeling and Experimental Analysis**. Materials Science Forum, Trans Tech Publications, [s.l.], v. 758, p.147-156, 2013.

AMERINATANZI, Amirhesam et al. **Application of the Superelastic NiTi Spring in Ankle Foot Orthosis (AFO) to Create Normal Ankle Joint Behavior**. Bioengineering (Basel), MDPI AG, [s.l.], v. 4, n. 4, p.95, 2017.

AN, S. et al. **Engineering design framework for a shape memory alloy coil spring actuator using a static two-state model**. Smart Materials And Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 21, n. 5, p.055009-055026, 2012.

BISCARINI, A.; MAZZOLAI, G.; TUISSI, A. **Enhanced Nitinol Properties for Biomedical Applications**. Recent Patents On Biomedical Engineering, Bentham Science Publishers Ltd. [s.l.], v. 1, n. 3, p.180-196, 2008.

BELLINI, A.; COLLI, M.; DRAGONI, E. **Mechatronic Design of a Shape Memory Alloy Actuator for Automotive Tumble Flaps: A Case Study**. Ieee Transactions On Industrial Electronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) [s.l.], v. 56, n. 7, p.2644-2656, jul. 2009.

BUEHLER, W. J.; GILFRICH, J. V.; WILEY, R. C. **Effect of Low-Temperature Phase Changes on the Mechanical Properties of Alloys near Composition TiNi**. Journal Of Applied Physics, AIP Publishing, [s.l.], v. 34, n. 5, p.1475-1477, 1963.

BUEHLER, W. J.; WANG, Frederick E. **A summary of recent research on the nitinol alloys and their potential application in ocean engineering**. Ocean Engineering, Elsevier BV. [s.l.], v. 1, n. 1, p.105-120, jul. 1968.

BUDYNAS, R.; NISBETT, K.. Shigley's Mechanical Engineering Design. S.l.. Ed. Mcgraw-hill, 2015. ISBN 978-0073398204

CALLISTER JR, William D.. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma introdução**. 9. ed. Nova York: John Wiley & Sons, 2016.

CHANG, L. C.; READ, T. A.. **Plastic eDeformation and Diffusionless Phase Changes in Metals - the Gold-Cadmium Beta Phase**. Jom, Springer Nature, [s.l.], v. 3, n. 1, p.47-52, 1951. AIME TRANS 191:47-52.

CZECHOWICZ, Alexander; LANGBEIN, Sven. **Shape Memory Alloy Valves**. [s.l.], Ed. Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-19081-5

CZECHOWICZ, Alexander; DÜLTGEN, Peter; LANGBEIN, Sven. **Adaptive Elastic SMA Elements for Damping Applications: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation and Control of Adaptive Systems; Integrated System Design and Implementation**, ASME, [s.l.], v. 1, p.015-021, 2013.

DE ARAÚJO, C.J.; GOMES, SILVA, A.A.; J.A., CALVALCANTI, A.J.T.; REIS, R.P.B., GONZALEZ, C.H.; **Fabrication of Shape Memory Alloys Using the Plasma Skull Push-Pull Process**. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier BV, [s.l.], v.209, p. 3657-3664, 2009.

DUERIG, T; PELTON, A.; STÖCKEL, D. **An overview of nitinol medical applications. Materials Science And Engineering**. Elsevier BV. [s.l.], v. 273-275, p.149-160, 1999.

DUERIG, T. W.; MELTON, K. N.; STÖCKEL, D.; WAYMAN, C. M. **Engineering aspects of shape memory alloys**. London, UK. Ed. Butterworth-Heinemann, 1990. ISBN 978-0-7506-1009-4

DUVALL, JULIA et al. **The Design and Development of Active Compression Garments for Orthostatic Intolerance**. Design Of Medical Devices Conference, ASME. [s.l.], p.1-2, 2017.

ELAHINIA, Mohammad H. **Shape memory alloy actuators: Design, fabrication, and experimental evaluation**. Toledo, Oh, Usa: Wiley, 2016. ISBN: 978-1-118-42694-4.

FERNANDES, F.M.B., **Ligas com memória de forma**. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT. Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2006.

FOLLADOR, M et al. **A general method for the design and fabrication of shape memory alloy active spring actuators**. Smart Materials and Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 21, n. 11, p.115029-115039, 2012.

FREITAG, LISA et al. **Functional coatings for titanium casting molds using the replica technique**. Journal Of The European Ceramic Society, Elsevier BV, [s.l.], v. 38, n. 13, p.4560-4567, 2018.

FRENZEL, J. et al. **High quality vacuum induction melting of small quantities of NiTi shape memory alloys in graphite crucibles**. journal of alloys and compounds, elsevier bv,[s.l.], v. 385, n. 1-2, p.214-223, dez. 2004.

GERALD J. JULIEN. **Manufacturing Of Nitinol Parts And Forms**. US, Patents nº US 6,422,010 B1, 11 jun. 2001, 23 jul. 2002. .

GODARD, OLIVIER J.; LAGOUDAS, MAGDALINI Z.; LAGOUDAS, DIMITRIS C.. **Design of space systems using shape memory alloys**. Smart Structures and Materials: Smart Structures and Integrated Systems, SPIE. [s.l.], p.545-558, 5 ago. 2003.

GRANBERRY, RACHAEL; ABEL, JULIANNA; HOLSCHUH, BRAD. **Active knit compression stockings for the treatment of orthostatic hypotension**. Proceedings of The 2017 Acm International Symposium On Wearable Computers - Iswc '17, ACM Press. [s.l.], p.186-191, 2017.

GRASSI, E. N. D., 2014. **Comportamento termomecânico de minimolas superelásticas de NiTi: Influência de tratamentos térmicos**. 115f, 2014. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

GRENINGER A.B., MOORADIAN V.G.. **Strain Transformation in metastable beta copper-zinc and beta copper-Ti alloys**, 1938, AIME TRANS 128:337-69.

HEIDARI, B et al. **Fabrication and modeling of shape memory alloy springs**. Smart Materials And Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 25, n. 12, p.125003-1250019, 2016.

HOLANDA, Samuell Aquino. **Estudo da Rigidez Complexa de Um Sistema Vibratório Incorporando Atuador com Memória de Forma**. 105f. (Dissertação de Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

HOLSCHUH, Bradley; OBROPTA, Edward; NEWMAN, Dava. **Low Spring Index Niti Coil Actuators For Use In Active Compression Garments**. Ieee/asme Transactions On Mechatronics, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).[s.l.], v. 20, n. 3, p.1264-1277, jun. 2015.

HUANG, Bin et al. **Passive base isolation with superelastic nitinol SMA helical springs**. Smart Materials And Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 23, n. 6, 2014.

JANI, Jaronie Mohd et al. **A review of shape memory alloy research, applications and opportunities**. Materials & Design, [s.l.], v. 56, p.1078-1113, 2014.

JONES, S; YUAN, C. **Advances in shell moulding for investment casting**. Journal Of Materials Processing Technology, [s.l.], v. 135, n. 2-3, p.258-265, abr. 2003. Elsevier BV.

JUVINALL, ROBERT C.; MARSHEK, KURT M. **Fundamentals of Machine Component Design**. 5. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012. ISBN 978-1118012895

KAUFFMAN, George B.; MAYO, Isaac. **The Story of Nitinol: The Serendipitous Discovery of the Memory Metal and Its Applications**. The Chemical Educator, Springer Nature, [s.l.], v. 2, n. 2, p.1-21, 1997.

KHAN, Mohammad Ibraheem; PEQUEGNAT, Andrew; ZHOU, Y. Norman. **Multiple Memory Shape Memory Alloys**. Advanced Engineering Materials, Wiley-Blackwell, [s.l.], v. 15, n. 5, p.386-393, 2013.

KHANNA, Rohit et al. **Evaluation of canine retraction following periodontal distraction using NiTi coil spring and implants**. A clinical study. Journal Of Oral Biology And Craniofacial Research, Elsevier BV. [s.l.], v. 4, n. 3, p.192-199, set. 2014.

LANGBEIN, S.; CZECHOWICZ, A.. **Konstruktionspraxis Formgedächtnistechnik**. Bochum, Ed. Springer Vieweg, 2013. ISBN 978-3-8348-2343-4

LEXCELLENT, C. **Shape Memory Alloys Handbook**. Hoboken, USA. Ed. Wiley, 2013. ISBN 978-1-84821-434-7.

MACHADO, L.G.; SAVI, M.A.. **Medical applications of shape memory alloys**. Brazilian, Journal of Medical and Biological Research, Scielo, [s.l.], v. 36, n. 6, p.683-691, 2003.

MAGANZINI, ANTHONY LOUIS; WONG, ALAN M.; AHMED, MAIRAJ K.. **Forces of Various Nickel Titanium Closed Coil Springs**. The Angle Orthodontist, EH Angle Education & Research Foundation, [s.l.], v. 80, n. 1, p.182-187, jan. 2010. The Angle Orthodontist.

MAHTABI, M.J.; SHAMSAEI, N.; MITCHELL, M.R.. **Fatigue of Nitinol: The state-of-the-art and on going challenges**. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, Elsevier BV, [s.l.], v. 50, p.228-254, 2015.

MASSALSKI T, OKAMOTO H, SUBRAMANIAN P. KACPRZAK L., **Binary Alloy Phase Diagrams**, Ohio, USA, Materials Park, OH: ASM International; 1996. ISBN: 978-0-87170-403-0

MIYAZAKI, S. et al. **Development and Characterization of Shape Memory Alloys**. Shape Memory Alloys, Springer Vienna. [s.l.], p.69-147, 1996.

MIYAZAKI, S.; SACHDEVA, R.I.. **Shape memory effect and superelasticity in Ti-Ni alloys**. Shape Memory Alloys For Biomedical Applications, Elsevier. [s.l.], p.3-19, 2009.

MONTENEGRO, Eclys de Oliveira Soares. **Estudo Do Comportamento Termomecânico De Telas De Ligas Com Memória De Forma Ni-Ti Obtidas Por Fundição De Precisão**. 127f, 2016. (Dissertação de Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

NESPOLI, ADELAIDE et al. **An experimental study on pseudoelasticity of a NiTi-based damper for civil applications**. Smart Materials and Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 26, n. 10, p.105041-105052, 2017

NORTON, ROBERT L.. **Projeto de Máquinas 4ª ed**. Porto Alegre. Ed. Bookman, 2013. ISBN 978-8-582-60022-1.

ÖLANDER, ARNE. **AN Electrochemical Investigation Of Solid Cadmium-Gold Alloys**. Journal Of The American Chemical Society, American Chemical Society (ACS). [s.l.], v. 54, n. 10, p.3819-3833, out. 1932.

OLIVEIRA, ANDERSSON G. **Concepção E Análise Dinâmica De Sistema Com Controle De Mancam Adaptativo Incorporando Molas LMF**. 108p., 2017. (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Paraíba, 2017.

OLIVEIRA, Henrique Martinni Ramos. **Estudo experimental do comportamento térmico e dinâmico de fios de liga com memória de forma NiTi em regime superelástico**. 115 f., 2014. (Dissertação de Mestrado) - Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2014.

OTSUKA, KAZUHIRO. **Origin of Memory Effect in Cu-Al-Ni Alloy**. Japanese Journal Of Applied Physics, Japan Society of Applied Physics. [s.l.], v. 10, n. 5, p.571-579, 1971.

OTSUKA, K; WAYMAN, C.M. **Shape Memory Materials**, Cambridge University Press, Cambridge UK. 1998. p.1-131. ISBN 978-0-521-66384-7

OTUBO, J.; RIGO, O.; NETO, C.; KAUFMAN, M.; MEI, P. **NiTi shape memory alloy ingot production by EBM**. J Phys IV, v. 112, p. 813-820, 2003.

PATTNAIK, SAROJRANI et al. **Developments in investment casting process - A review**. Journal of Materials Processing Technology, Elsevier BV, [s.l.], v. 212, n. 11, p.2332-2348, 2012.

PEREIRA, F. R. P., SIMOES, J. B., REIS, R. P. B. DOS, DE ARAÚJO, C. J., **Thermomechanical Tests of Shape Memory Alloy Belleville Washers**. In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, Natal, 2011. Proceedings of COBEM 2011. Rio de Janeiro - RJ: ABCM, Vol. 1, pp. 1-10.

RAO, A.; SRINIVASA, A. **A three-species model for simulating torsional response of shape memory alloy components using thermodynamic principles and discrete Preisach models**. Mathematics And Mechanics Of Solids, SAGE Publications. [s.l.], v. 20, n. 3, p.345-372, 4 set. 2014.

RAO, A.; SRINIVASA, A. R.; REDDY, J. N. **Design of Shape Memory Alloy (SMA) Actuators**. New York, USA Springer International Publishing, 2015. ISBN 978-3-319-03188-0.

RYHÄNEN, J.. **Biocompatibility evolution of nickel-titanium shape memory alloy**. 118p, 1999. (Academic Dissertation) - Faculty of Medicine, University of Oulu, Oulu Finland, 1999.

SAADAT, S et al. **An overview of vibration and seismic applications of NiTi shape memory alloy**. Smart Materials and Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 11, n. 2, p.218-229, 2002.

SANTHANAM, R.; KRISHNA, Y.; SIVAKUMAR, M. S.. **Behaviour of NiTi SMA Helical Springs under Different Temperatures and Deflections**. Isrn Materials Science, Hindawi Limited. [s.l.], v. 2013, p.1-4, 2013.

SANTIAGO, J. J. M.; SILVA, P. C. S.; DE ARAÚJO, C.J; SIMOES., J. B.. **Mechanical Behavior of Ni-Ti SMA Helical Springs Manufactured by Investment Casting**. Proceedings Of. The 24th Abcm International Congress of Mechanical Engineering, [s.l.], p.1-8, 2017

SAVI, M. A. et al. **Nonlinear geometric influence on the mechanical behavior of shape memory alloy helical springs**. Smart Materials And Structures, IOP Publishing, [s.l.], v. 24, n. 3, p.035012-035022, 2015.

SEOK, SANGOK et al. **Meshworm: A Peristaltic Soft Robot With Antagonistic Nickel Titanium Coil Actuators**. *Ieee/asme Transactions On Mechatronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), [s.l.], v. 18, n. 5, p.1485-1497, out. 2013.

SHABALOVSKAYA, S.A.. **Biological Aspects of Ti-Ni Alloy Surfaces**. Journal de Physique Iv, EDP Sciences. [s.l.], v. 05, n. 8, p.1191-1199, 1995.

SHAW, J.A.; CHURCHILL, C.B.; IADICOLA, M.A.. **Tips and Tricks for Characterizing Shape Memory Alloy Wire: Part 1-Differential Scanning Calorimetry and Basic Phenomena**. Experimental Techniques, Springer Nature, [s.l.], v. 32, n. 5, p.55-62, 2008.

SHEN, Y.K., LIU, J.J., CHANG, C.T. AND CHIU, C.Y., **Comparison of the Results for Semi solid and Plastic Injection Molding Process**, Int. Comm. Heat Mass Transfer, [s.l.], p97-105, 2002.

SILVA, N.J. **Estudo do Comportamento Termomecânico de uma Liga Ni-Ti com Memória de Forma Usando Análise Dinâmico-Mecânica**. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais), Universidade Federal de Campina Grande, 2009.

SIMÕES, Jackson de Brito et al. **Development of NiTi shape memory alloy meshes**. Proceedings of the 23rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, Rio de Janeiro, p.1-7, 2015.

SIMÕES, JACKSON DE BRITO. **Fabricação de componentes miniaturizados de ligas com memória de forma Ni-Ti usando fundição de precisão**. 243 f., 2016. (Tese-Doutorado) Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2016.

SINGH, B., KUMAR, P., MISHRA, B.K., **Experimental Investigation of Wax Blends in Investment Casting Process**. Indian Foundry Journal, s.l., p.29-36, 2006.

SPINELLA, I.; DRAGONI, E.. **Analysis and Design of Hollow Helical Springs for Shape Memory Actuators.** Journal Of Intelligent Material Systems And Structures, SAGE Publications, [s.l.], v. 21, n. 2, p.185-199, 4 dez. 2009.

SPINELLA, IGOR; DRAGONI, EUGENIO; STORTIERO, FRANCESCO. **Modeling, Prototyping, and Testing of Helical Shape Memory Compression Springs With Hollow Cross Section.** Journal Of Mechanical Design, ASME International., [s.l.], v. 132, n. 6, p.061008-031017, 2010.

STANCIU, S.; BUJOREANU, L.; CIMPOESU, N.; IONIȚĂ, I.; MOLDOVEANU, V. **Shape memory effect and related characteristics of helical springs made from Cu–Al–Ni alloy by investment casting.** Optoelectronics and Advanced Materials-Rapid Communications, v. 3, n. 6, p. 581-585, 2009.

STOECKEL, DIETER; WARAM, THOMAS. **Use of Ni-Ti shape memory alloys for thermal sensor-actuators.** Active and Adaptive Optical Components, [s.l.], p.1-7, 1991.

STOECKEL, DIETER. **Shape memory actuators for automotive applications.** Materials & Design, Elsevier BV. [s.l.], v. 11, n. 6, p.302-307, dez. 1990.

THOMPSON, S. A.. **An overview of nickel-titanium alloys used in dentistry.** International Endodontic Journal, Wiley, [s.l.], v. 33, n. 4, p.297-310, 2000.

WANG, FREDERICK E.; BUEHLER, WILLIAM J.; PICKART, STANLEY J.. **Crystal Structure and a Unique "Martensitic" Transition of TiNi.** Journal Of Applied Physics, AIP Publishing [s.l.], v. 36, n. 10, p.3232-3239, 1965.

WAYMAN, C.M.. **On memory effects related to martensitic transformations and observations in β -brass and Fe₃Pt.** Scripta Metallurgica, Elsevier BV, [s.l.], v. 5, n. 6, p.489-492, 1971.

WORDEN, K; BULLOUGH, W. A; HAYWOOD, J. **Smart technologies.** Ed. World Scientific River Edge, New Jersey, 2003. ISBN 981-02-4776-1

YAMAUCHI, K. et al. **Shape Memory and Superelastic Alloys: Technologies and Applications.** Philadelphia - New Delhi: Woodhead Publishing Limited, 2011. ISBN 978-0-857-09262-5

YONEYAMA, T.; MIYAZAKI, S. **Shape Memory Alloys for Biomedical Applications,** Ed. Woodhead, Boca Raton. (2009). ISBN 978-1-845-69344-2

ZHUANG, PENG et al. **Experimental and numerical study on hysteretic performance of SMA spring-friction bearings**. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Springer Nature. [s.l.], v. 15, n. 4, p.597-609, 2016.

ZIOLKOWSKI, A. **Pseudoelasticity of Shape Memory Alloys: Theory and Experimental Studies**. edition 1. Oxford, UK. Ed. Butterworth-Heinemann, 2015. ISBN 978-0128016978.

ZURBITU, J., SANTAMARTA, R., PICORNELL, C., GAN, W. M., BROKMEIER, H.G., AURREKOETXEA, J., 2010. "**Impact fatigue behavior of superelastic NiTi shape memory alloy wires**". Materials Science and Engineering: A, Volume 528, Número 2, pp 764-769.

9. APÊNDICE A- GRÁFICOS DOS ENSAIOS DINÂMICOS.

Figura 66 - Comportamento força – deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,3Hz

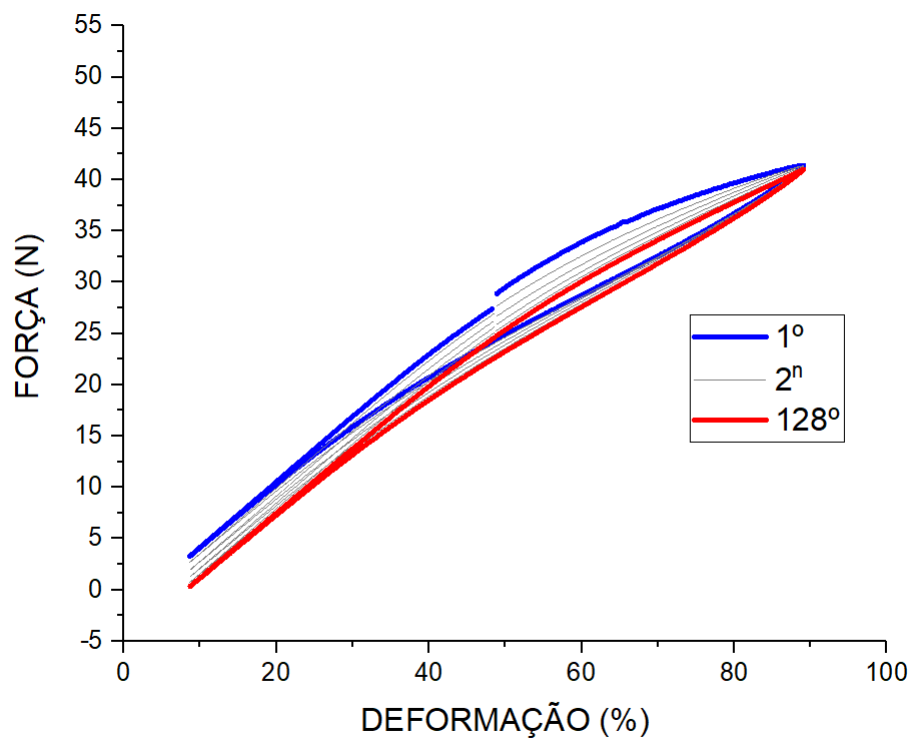


Figura 67 - Comportamento força – deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,7Hz

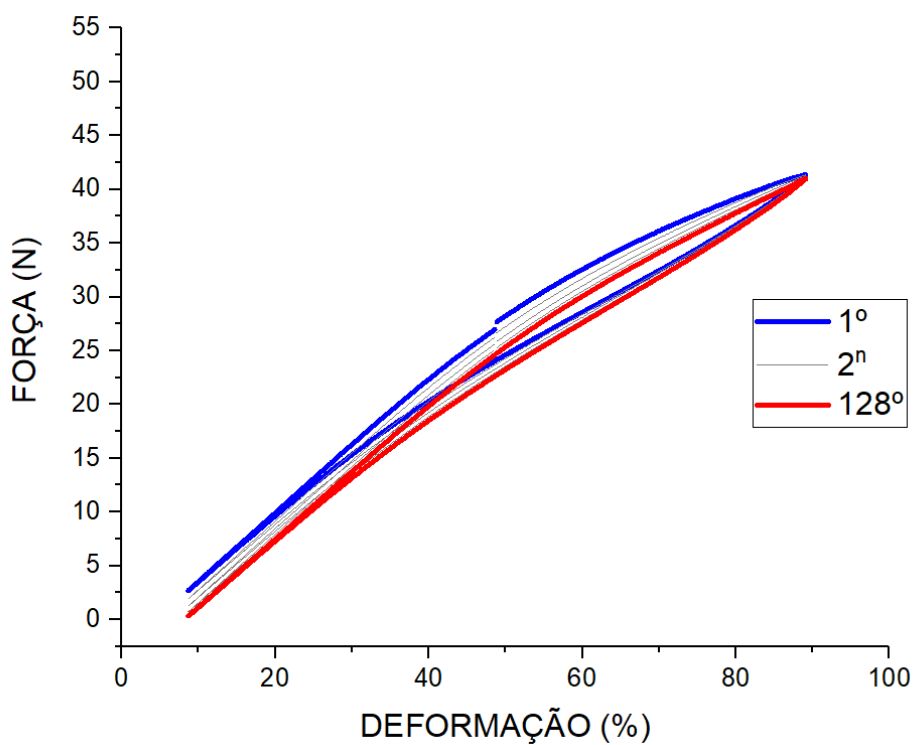


Figura 68 - Comportamento força – deformação M_SE_P3_D15: Frequência 0,7Hz

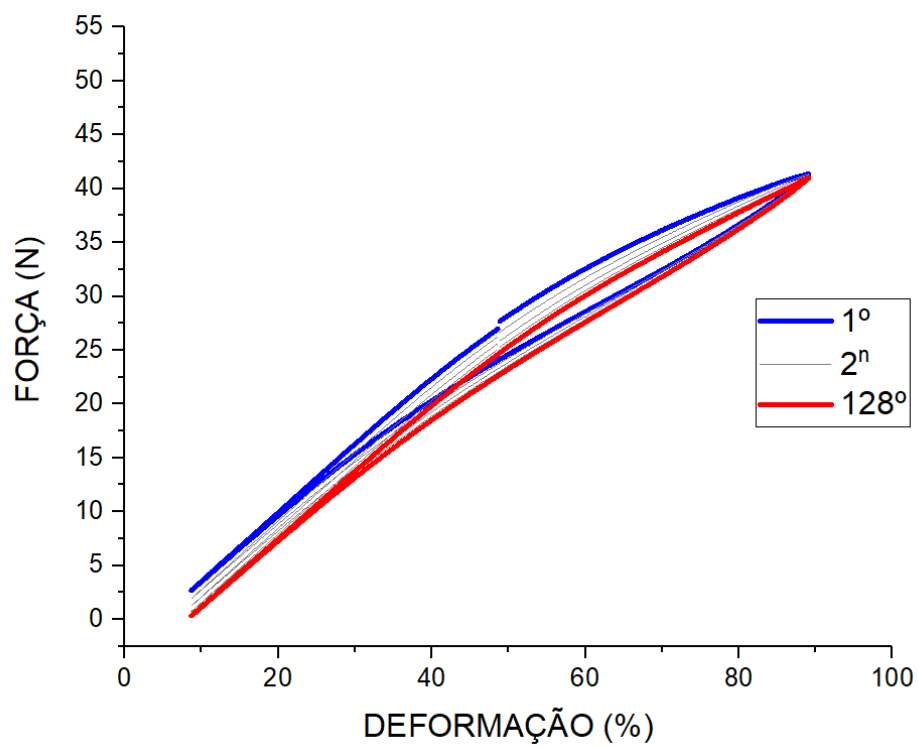


Figura 69 - Comportamento força – deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,3Hz

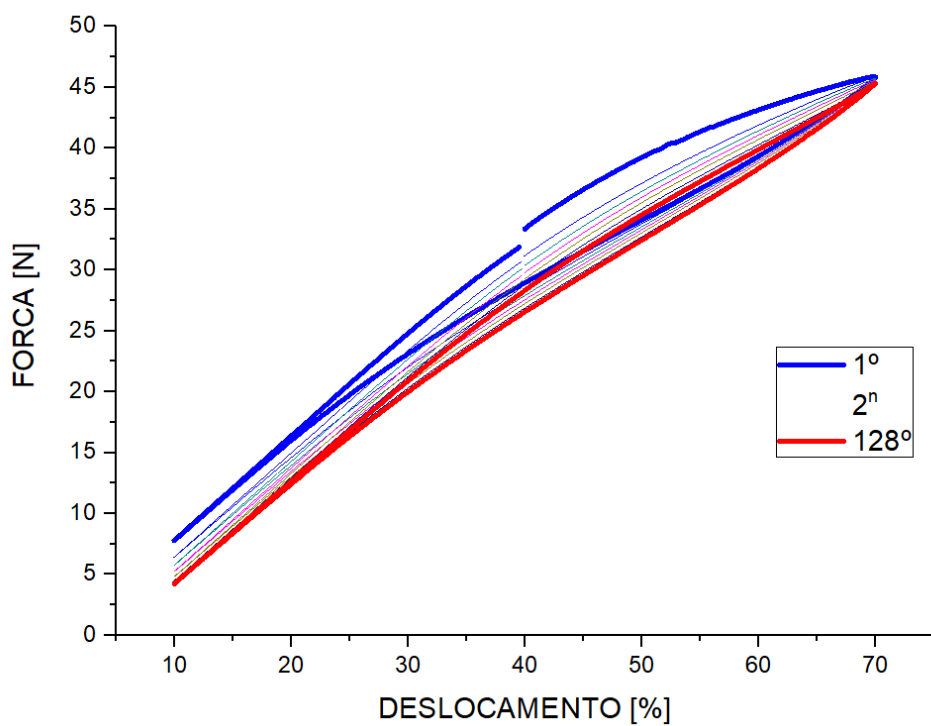


Figura 70 - Comportamento força – deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,5Hz

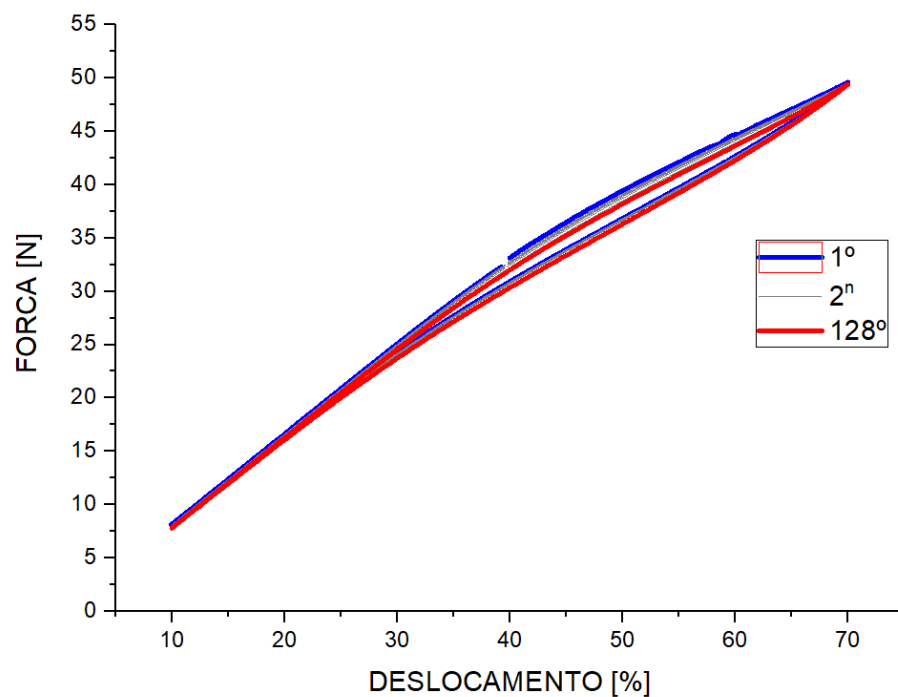


Figura 71 - Comportamento força – deformação M_SE_P4_D15: Frequência 0,7Hz

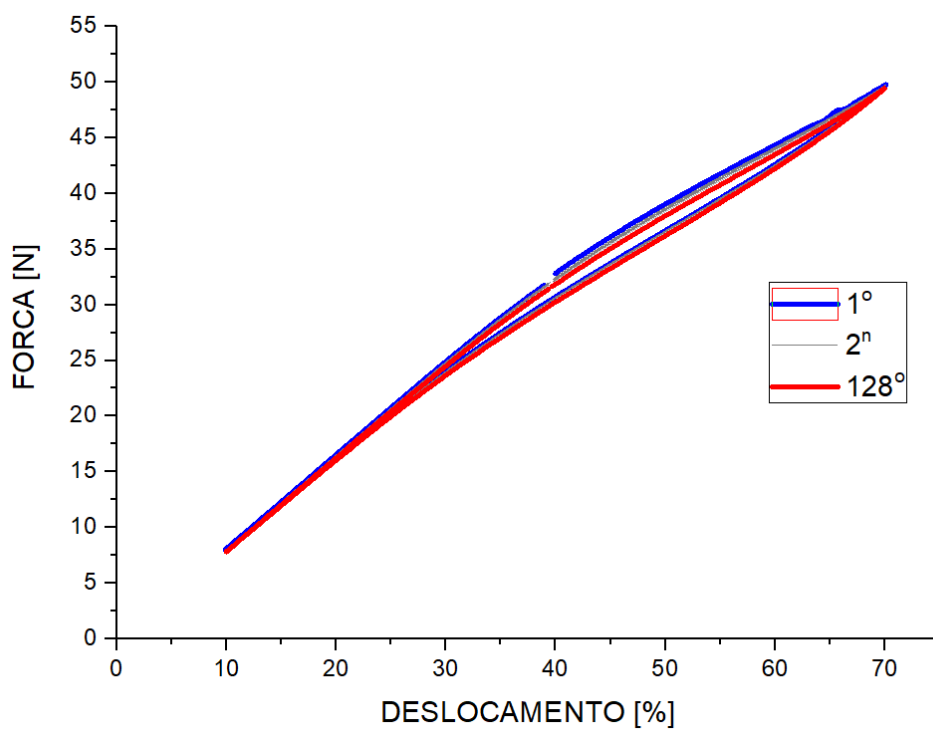


Figura 72 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,3Hz

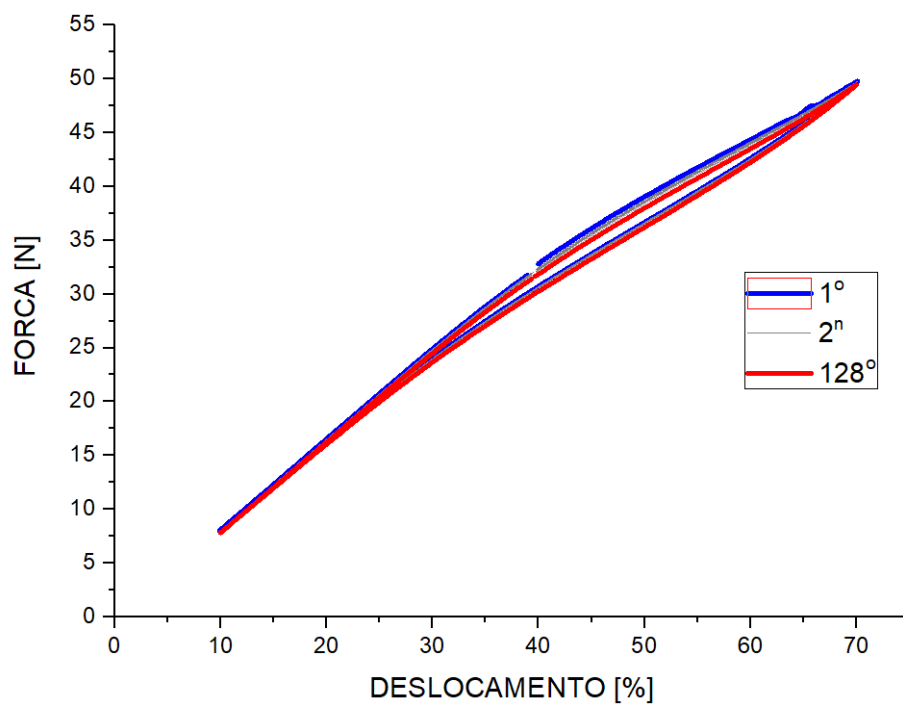


Figura 73 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,5Hz

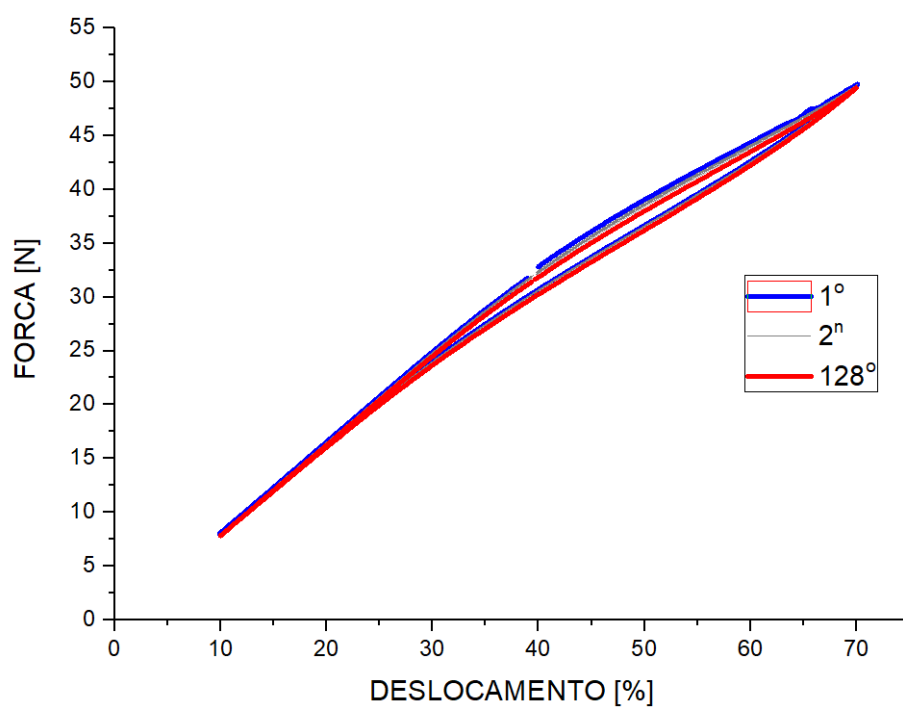


Figura 74 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D15: Frequência 0,7Hz

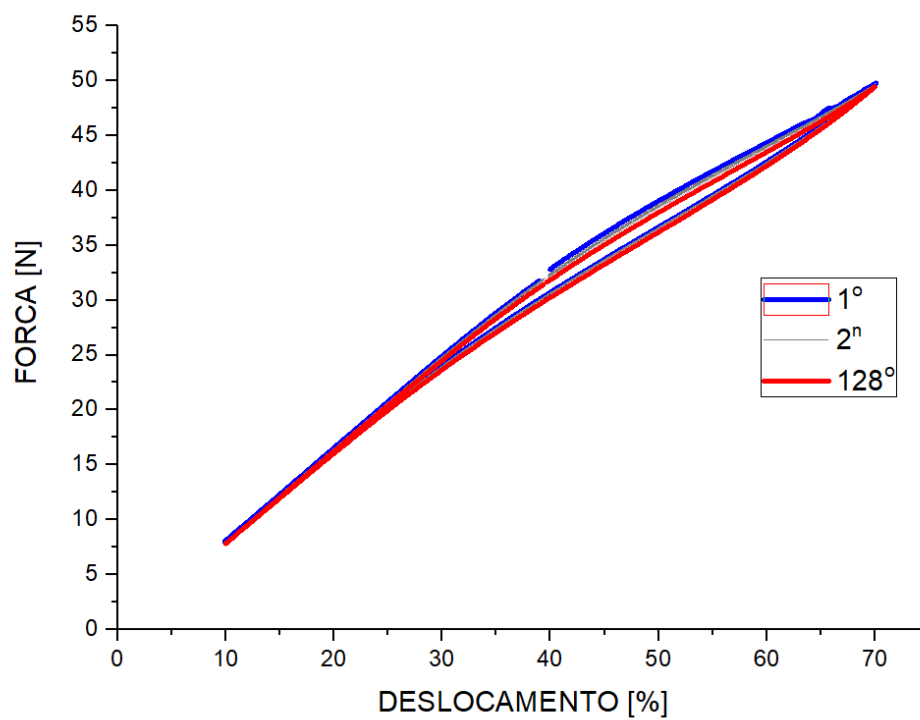


Figura 75 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,3Hz

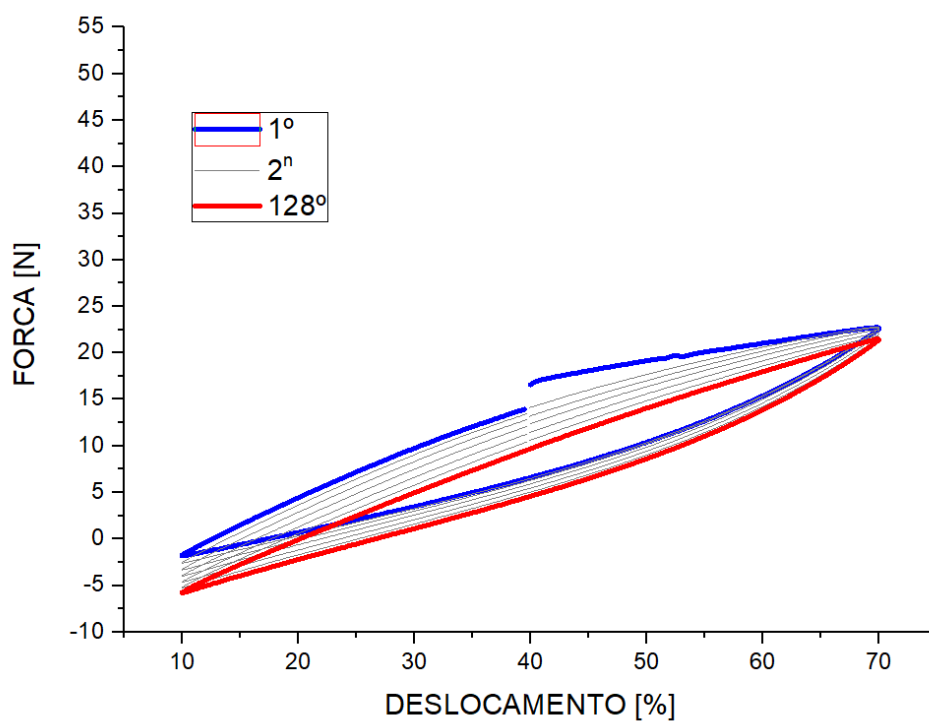


Figura 76 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,5Hz

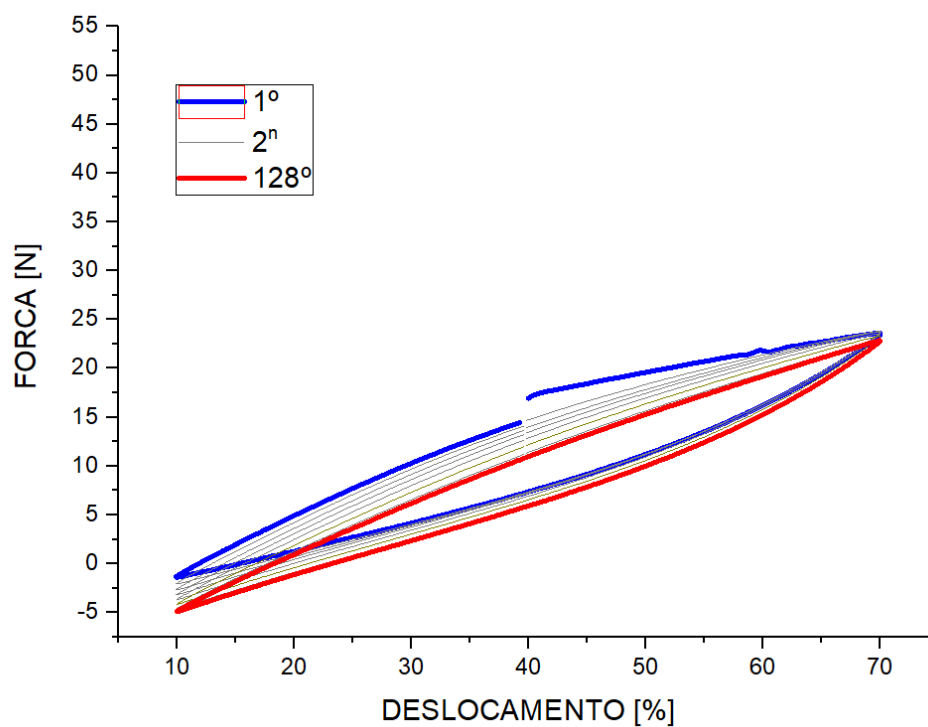


Figura 77 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D10: Frequência 0,7Hz

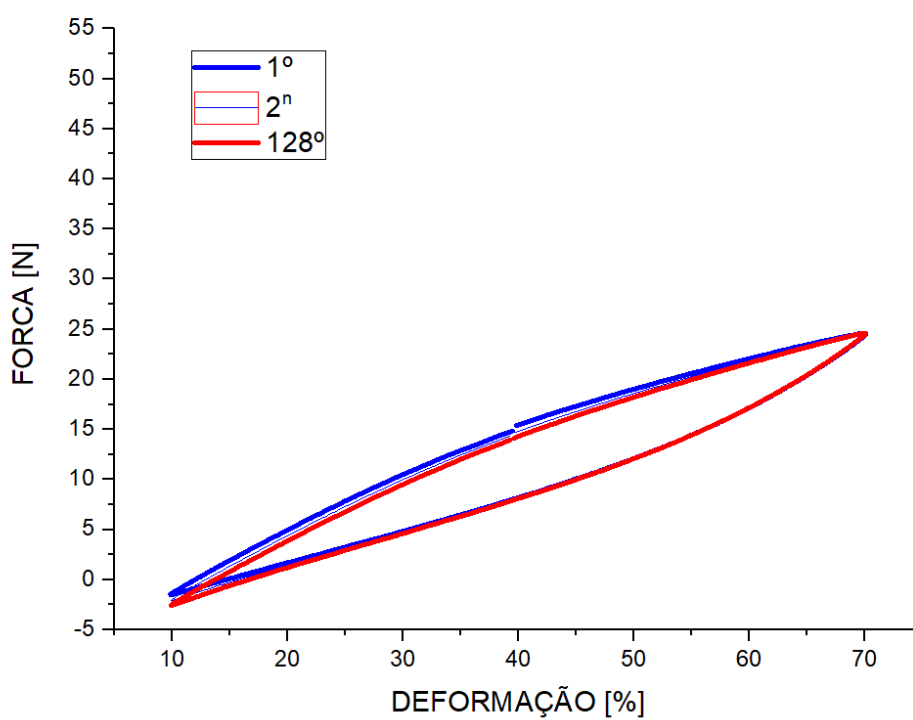


Figura 78 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,3Hz

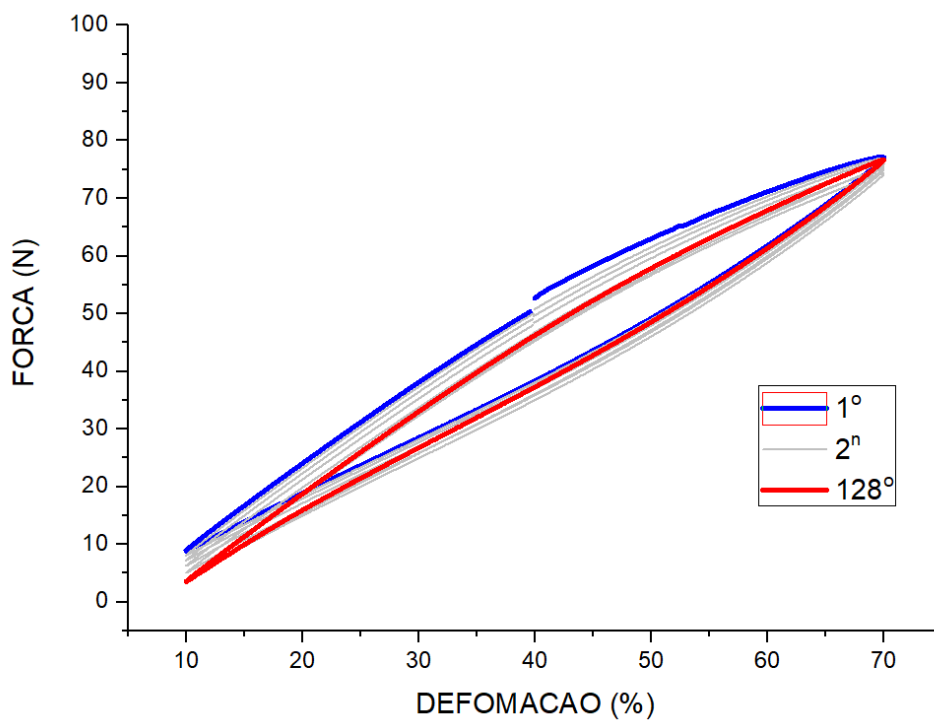


Figura 79 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,5Hz

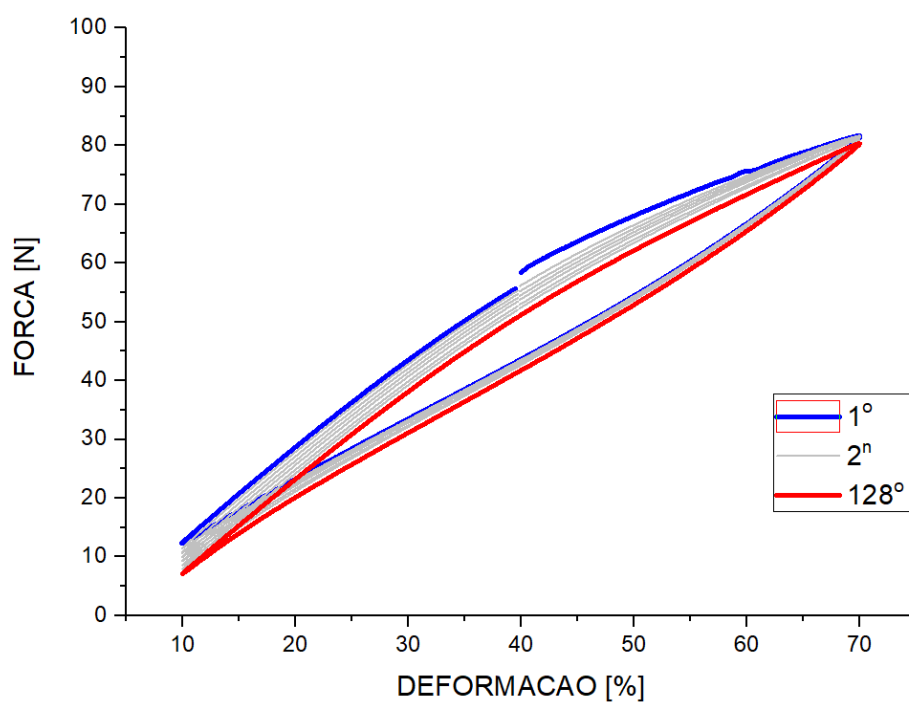


Figura 80 - Comportamento força – deformação M_SE_P5_D20: Frequência 0,7Hz

