

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

**CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES
BELLEVILLE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

Jackson de Brito Simões

Campina Grande – PB
Maio/2012

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

**CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES
BELLEVILLE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA**

Jackson de Brito Simões

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

Orientadores: Dr. Carlos José de Araújo
Dr. Neilor Cesar dos Santos

Agência Financiadora: CAPES

CAMPINA GRANDE
Maio/2012

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S593c Simões, Jackson de Brito.
Caracterização termomecânica de atuadores belleville de ligas com memória de forma / Jackson de Brito Simões. - Campina Grande, 2012. 94f.: il., color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.
Orientadores: Prof. Dr. Carlos José de Araújo, Prof. Dr. Neilor Cesar dos Santos.

Referências.

1. Atuadores. 2. Ligas com Memória de Forma (LMF). 3. Superelasticidade. 4. Atuadores Belleville. 5. Geração de Força. 6. Atuadores Bifuncionais. I. Título.

CDU 681.587 (043)

Caracterização Termomecânica de Atuadores Belleville de Ligas com Memória de
Forma

Jackson de Brito Simões

Dissertação Aprovada em 29/05/2012 pela banca examinadora constituída dos
seguintes membros:



Dr. Carlos José de Araújo
Orientador

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Neitor Cesar dos Santos
Orientador

PPGEM /CCT/UFCG/IFPB



Dr. Wanderley Ferreira de Amorim Júnior
Examinador Interno

PPGEM/UAEM/CCT/UFCG



Dr. Marcelo Amorim Savi
Examinador Externo

UFRJ

DEDICATÓRIA

Esta dissertação de mestrado é dedicada a minha família, em especial a Chiara Millena (esposa) e a Maria Elena (filha), que são a força propulsora e a motivação da minha luta para conquistar meus ideais.

CURRICULUM VITAE DO CANDIDATO

- Engenheiro Mecânico pela UFCG (2006).

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por me conceder a capacidade necessária para realização deste projeto, assim como a oportunidade que ele me proporcionou de desfrutar das amizades formadas durante a realização deste trabalho e dos conhecimentos adquiridos.

Agradeço ao professor Dr. Carlos José de Araújo pela confiança e oportunidade que me foi dada desde o primeiro dia que ingressei em seu Grupo de Pesquisa e pelo efetivo acompanhamento durante todo o trabalho, pela sua paciência para debater minuciosamente alguns assuntos para dirimir por completo todas as dúvidas que surgiam no decorrer desta obra.

Aos professores Dr. Neilor Cesar dos Santos e Dr. Cícero da Rocha Souto que em alguns momentos me ajudaram com sugestões que acredito que enriqueceram o trabalho.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e me incentivaram para concretização de mais esta etapa da minha vida profissional. De forma especial, agradeço a minha esposa, Chiara Millena e minha filha Maria Elena, que compreenderam os momentos de ausência em alguns momentos.

A todos os integrantes do Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG, especialmente a Francisco Fernando, Rômulo Pierre, Zoroastro Villar pois sempre se dispuseram a contribuir com este trabalho. Enfim, a todos que de forma direta ou indireta me auxiliaram para que fosse possível a concretização deste trabalho.

Agradeço ainda a todos os funcionários e professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica – UAEM.

“O maior dos mestres é o estudo, e a maior das disciplinas é o trabalho”.

Machado de Assis

CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ATUADORES BELLEVILLE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

RESUMO

No atual estágio do desenvolvimento científico e tecnológico na área de materiais inteligentes, pesquisas em todo o mundo têm originado avanços capazes de permitir sua efetiva utilização como sensores e atuadores, principalmente no caso das Ligas com Memória de Forma (LMF). Esse interesse decorre do fato dessas LMF constituírem materiais metálicos especiais capazes de recuperar deformações residuais de grande intensidade (em média da ordem de 5 % em tração uniaxial), por intermédio de um simples aquecimento.

Nesse contexto, este trabalho tem por objetivo geral fabricar e avaliar o comportamento termomecânico bifuncional de atuadores Belleville de LMF (AMF_{CON}) do sistema Ni-Ti, fabricados com tecnologia nacional própria, para geração de força em uniões aparafusadas através do Efeito Memória de Forma e Superelasticidade. Para isso, foram selecionadas LMF de composições 55,3Ni-44,7Ti (% em peso) e 48Ni-38Ti-14Nb (% em peso) que possuem propriedades Superelásticas a temperatura ambiente ($\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$). O método utilizado para realizar a medição da geração de força destes AMF_{CON} em função do tempo e da temperatura, envolveu deformação a temperaturas criogênicas, inferiores a $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, e aquecimento natural pelo próprio calor ambiente. Os resultados obtidos demonstraram que é possível utilizar-se da bifuncionalidade destes atuadores para aplicações estáticas (uniões aparafusadas) e/ou dinâmicas (elementos de absorção de energia), tendo em vista a medição de forças geradas da ordem de 2,5 kN e Superelasticidade de 40 % com relação a altura do atuador.

Palavras-chaves: Ligas com Memória de Forma (LMF), Superelasticidade, Atuadores Belleville, Geração de Força, Atuadores bifuncionais.

THERMOMECHANICAL CHARACTERIZATION OF BELLEVILLE SHAPE MEMORY ALLOY ACTUATORS

ABSTRACT

In current stage of scientific and technological development in the area of smart materials, researches around the world have originated advances which are able to allow their effective use as sensors and actuators, especially in case of Shape Memory Alloys (SMA). This interest comes from the fact of these SMA being metallic materials able to recover high amount of residual strain (at about 5% in uniaxial tensile) just by simple heating.

In this regard, this study had as main aim to manufacture and evaluate the bi-functional thermomechanical behavior of SMA Belleville actuators (SMA_{CON}) from the Ni-Ti alloy system. These elements manufactured with local technology are appropriated for generation of forces in bolted connections through Shape Memory Effect and Superelasticity. For this purpose, there were selected SMA compositions of 55.3Ni-44.7Ti (wt%) and 14Nb-48Ni-38Ti (wt%) which have superelastic properties at room temperature ($\sim 27^\circ C$). The method used to carry out the measurement of generated force of SMA_{CON} versus time and temperature, involved deformation at cryogenic temperatures, below $-50^\circ C$, and natural heating by the heat exchange with local environment. The obtained results showed it is possible to use the bifunctionality of the SMA_{CON} for static applications (bolted joint) and dynamic (energy dissipation elements), keeping in mind that the generated forces were in the order of 2.5 kN and superelasticity of 40% in relation to height of the actuator.

Keywords: Shape Memory Alloys (SMA), Superelasticity, Belleville Actuators, Force Generation, Bifunctional Actuators.

PUBLICAÇÕES

REIS, R. P. B.; PEREIRA, F. F. R. ; SIMÕES, Jackson de Brito ; DE ARAÚJO, C. J. .
THERMOMECHANICAL TESTS OF SHAPE MEMORY ALLOY BELLEVILLE WASHERS. In: 21st Brazilian Congress of Mechanical Engineering, 2011, Natal - RN. Proceedings of COBEM 2011. Rio de Janeiro - RJ: ABCM, 2011. v. 1. p. 1-10.

PEREIRA, F. F. R.; SIMÕES, Jackson de Brito ; REIS, R. P. B. ; DE ARAÚJO, C. J. .
FABRICAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA DE ARRUELAS BELLEVILLE DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA. In: VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM 2010), 2010, Campina Grande - PB. Anais do CONEM 2010. Rio de Janeiro - RJ: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (ABCM), 2010. v. 1. p. 1-10.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ABREVIações E SÍMBOLOS	xviii
1.0 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	4
1.2 JUSTIFICATIVA.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF)	6
2.1.1 Características das LMF.....	6
2.1.2 Considerações sobre as LMF de Ni-Ti	8
2.2 COMPORTAMENTO TERMOMEcÂNICO DAS LMF	10
2.2.1. Efeito Memória de Forma Simples (EMFS).....	10
2.2.2. Superelasticidade	13
2.2.3. Caracterização térmica das LMF.....	15
2.2.4 Modelagem matemática do comportamento de LMF	17
2.2.5 Aplicações de LMF	21
2.3. Arruelas Cônicas - Belleville	27
2.3.1 Comportamento mecânico de Arruelas Belleville	29
2.3.2 Equacionamento matemático para o comportamento carga-deflexão em arruelas Belleville.....	31
2.4 Atuadores do Tipo Arruelas de LMF: Estado da Arte	33
2.4.1 Atuadores Cilíndricos (AMF _{CIL}).....	34
2.4.2 Atuadores Belleville (AMF _{CON}).....	43
3.0 MATERIAIS E MÉTODOS	49
3.1 Seleção das LMF	50

3.2 Desenvolvimento do Processo de Fabricação DOS AMF _{CON}	50
3.2.3 Fabricação do AMF _{CON} via usinagem convencional	54
3.2.4 Tratamento térmico dos AMF _{CON}	55
3.3 Caracterização Térmica	55
3.4 Caracterização Termomecânica PRELIMINAR	56
3.4.1 Estabilização cíclica dos AMF _{CON}	56
3.4.2 Ensaio de rigidez em função da temperatura	57
3.5 Ensaio de geração de força em função da temperatura	58
3.5.1 Geração de força direta na máquina de ensaios	58
3.5.2 Geração de força em parafuso de aço carbono	60
3.6 Resposta Superelástica dos AMF _{CON}	62
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES	63
4.1 Atuadores cônicos de LMF Ni-Ti e Ni-Ti-Nb	63
4.2 Temperaturas de transformação e histerese térmica	64
4.3 Caracterização mecânica cíclica	66
4.4 Geração de força em função da temperatura	68
4.4.1 Geração de força direta	69
4.4.2 Geração de força em parafuso	76
4.5 Variação da rigidez em função da temperatura	78
4.6 Resposta Superelástica dos AMF _{CON}	81
4.6.1 Análise Experimental	81
4.6.2 Análise Teórica	83
5.0 CONCLUSÕES	86
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
7.0 REFERÊNCIAS	89

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões do AMFCON de Cu-Al-Ni-Mn-Ti.....	44
Tabela 2 – Dimensões para os AMF_{CON} de LMF Ni-Ti deste trabalho.....	53
Tabela 3 – Temperaturas de transformação e histerese térmica dos AMF_{CON} - Injetados.....	66
Tabela 4 – Temperaturas de transformação e histerese térmica dos AMF_{CON} – Usinados.	66
Tabela 5 – Valores da carga para atingir a deformação máxima no 1° e 50° ciclo durante a ciclagem dos AMF_{CON} injetados.....	68
Tabela 6 – Valores da carga para atingir a deformação máxima no 1° e 50° ciclo durante a ciclagem dos AMF_{CON} usinados.....	68
Tabela 7 - Força Gerada para AMF_{CON} usinados.	73
Tabela 8 – Força Gerada para AMF_{CON} injetados.....	74
Tabela 9 – Resultados obtidos para a força gerada (FG) direta e no parafuso com relação ao EMFS. AMF_{CON} Injetados.	77
Tabela 10 – Resultados obtidos para a força gerada (FG) direta e no parafuso com relação ao EMFS. AMF_{CON} usinados.	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fenômeno de transformação de fase devido à variação de temperatura, (PAIVA, 2004).	8
Figura 2 – Diagrama tensão – deformação ilustrativo do Efeito de Memória de Forma Simples (PAIVA, 2004).	12
Figura 3 - Esquematização do EMFS em uma arruela Belleville de LMF. .	13
Figura 4 – Diagrama tensão – deformação ilustrativo do fenômeno de Superelasticidade (PAIVA, 2004).	14
FIGURA 5 - Diagrama tensão - deformação para diversas temperaturas crescentes na região de transformação de fase de uma LMF típica (a) Fio. (b) Fita. (COUTINHO NETO <i>et al</i> , 2008).	15
Figura 6 - Curva de DSC obtida para a LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) (REIS, 2010).	16
Figura 7 - Curva de RET para a LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) (REIS, 2010).	17
Figura 8 – Esquema ilustrativo da determinação experimental dos parâmetros das LMF para implementação da modelagem constitutiva descrita pela Equação (1) (Adaptado de ANSYS, 2008).	20
Figura 9 – Esquematização da instalação de um <i>stent</i> de LMF para desobstrução de artéria humana (SILVA, 2009).	22
Figura 10 – União de tubulação por meio de luva de LMF (GHANDI, 1992 apud OLIVEIRA, 2008).	23
Figura 11 – Ilustração da fratura característica de uma costela humana e utilização de um grampo de Judet de LMF (VILLARINHO <i>et al</i> , 2010).	24
Figura 12 – Demonstração do IC com Efeito Memória de Forma. Da esquerda para direita: forma inicial do componente, forma deformada, aquecimento corpóreo e forma após aquecimento. (Adaptado de KARDAS <i>et al</i> , 2007).	25
Figura 13 – Protótipo de um dedo robótico acionado por fios de LMF (SILVA, 2011).	25
Figura 14 – Dispositivos em LMF para centragem de edifícios durante abalos sísmicos (Adaptado de SPEICHER <i>et al</i> , 2009).	26

Figura 15 – Dispositivo para pré-carga de parafusos baseado em arruelas de LMF, (Adaptado de SINTEF, 2000).	27
Figura 16 - Tipos diversos de arruelas Belleville (NORTON, 2006).	27
Figura 17 – Esquema ilustrativo das tensões atuantes num parafuso durante aperto convencional por torque (T).	29
Figura 18 – Comportamento força-deflexão para diversas razões h/t em arruelas Belleville, (SCHNORR, 2003).	30
Figura 19 - Curva força-deflexão para arruelas Belleville (Adaptado de DAVET, 1997).	30
Figura 20 – Principais parâmetros característicos de uma Arruela Belleville.	31
Figura 21 – Comportamento tensão - deflexão em uma arruela Belleville de aço,	32
(Adaptado de NORTON, 2006).	32
Figura 22 – Geração de força por um AMF _{CIL} Ni-Ti-Nb submetido a diferentes temperaturas de homogeneização e deformações (Adaptado de SODERBERG <i>et al</i> , 1997).	34
Figura 23 - Montagem experimental para ativação de uma arruela cilíndrica de LMF Ni-Ti usando aquecimento resistivo (Adaptado de PEAIRS, PARK e INMAN, 2004).	35
Figura 24 - Montagem em câmara de aquecimento de uma máquina universal de ensaios para testes de compressão em um AMF _{CIL} de Ni-Ti (HESSE <i>et al</i> , 2004).	36
Figura 25 - Efeito do tratamento térmico de recozimento no comportamento tensão-deformação de uma LMF Ni-Ti usada na fabricação de um AMF _{CIL} . (a) Tração. (b) Compressão. (Adaptado de HESSE <i>et al</i> , 2004).	37
Figura 26 - Efeito da ciclagem no comportamento tensão-deformação de uma LMF Ni-Ti usada na fabricação de um AMF _{CIL} . (a) Resposta cíclica em compressão. (b) Resposta em tração e compressão após estabilização cíclica. (Adaptado de HESSE <i>et al</i> , 2004).	37
Figura 27 - Montagem de uma junta aparafusada com atuador AMF _{CIL} de Ni-Ti para ensaio de geração de força. (HESSE <i>et al</i> , 2004).	38

Figura 28 – Variação da força gerada após atuação do AMF_{CIL} de Ni-Ti sob diferentes pré-cargas de aperto. (Adaptado de HESSE <i>et al</i>, 2004).	39
Figura 29 – Montagem utilizada para a ativação de um AMF_{CIL} de Ni-Ti (Adaptado de ANTONIOS <i>et al</i>, 2006).	39
Figura 30 - Geração de força com a temperatura no arranjo da Figura 29 (Adaptado de ANTONIOS <i>et al</i>, 2006).	41
Figura 31 - Comparação da evolução das forças de aperto para diferentes valores de pré-carga (100,140, 160, 180 e 200 lb) (Adaptado de ANTONIOS <i>et al</i>, 2006).	41
Figura 32 – Efeito da taxa de aquecimento no desempenho do AMF_{CIL} (Adaptado de ANTONIOS <i>et al</i>, 2006).	42
Figura 33 - Montagem experimental para testes de AMF_{CIL} de Ni-Ti (Adaptado de FARIA, <i>et al</i> 2011).	42
Figura 34 – Ensaio de geração de força com os principais parâmetros observados. Adaptado de (FARIA <i>et al</i>, 2011).	43
Figura 35 – Ensaio de compressão do AMF_{CON} de Cu-Al-Ni-Mn-Ti nas temperaturas 60°C, 95°C e 120°C (Adaptado de Labrecque <i>et al</i>, 1996). ..	45
Figura 36 - Comportamento da arruela Belleville de Cu-Al-Ni-Mn-Ti em um diagrama tridimensional de força-deflexão-temperatura. (a) Curvas isotérmicas experimentais. (b) Curvas obtidas a partir da relação clássica (Adaptado de Labrecque <i>et al</i>, 1996).	45
Figura 37 - Comparação do comportamento experimental e teórico para o AMF_{CON} de Cu-Al-Ni-Mn-Ti a uma temperatura de 90°C, no estado austenítico (Adaptado de Labrecque <i>et al</i> , 1996).	46
Figura 38 – Curva teórica do comportamento da arruela Belleville de LMF Cu-Al-Ni-Mn-Ti. (Adaptado de LABRECQUE <i>et al</i>, 1996).	46
Figura 39 - Dispositivos para recentragem de edifícios submetidos a abalos sísmicos. (a) Dispositivo com mola helicoidal de LMF. (b) Dispositivo com arruela Belleville de LMF. (Adaptado de SPEICHER <i>et al</i>, 2009).	47
Figura 40 – Teste de compressão do AMF_{CON} da Figura 39(b). (a) Montagem nas garras da máquina de ensaio. (b) Resposta em	

compressão do AMF _{CON} de Ni-Ti no estado superelástico. (Adaptado de SPEICHER, 2010).....	48
Figura 41 – Resposta de um AMF _{CON} submetido a ciclos de compressão. (a) Superposição de 10 ciclos. (b) Destaque do 1° (primeiro) e 10°(décimo) ciclos. (Adaptado de SPEICHER, 2010).....	48
Figura 42 – Fluxograma da metodologia empregada durante a realização do trabalho.....	49
Comentar sobre o Fluxograma	Erro! Indicador não definido.
Figura 43 - Sequência de fabricação da LMF Ni-Ti-Nb pela técnica PSPP. (a) Níquel, titânio e nióbio puros. (b) Tocha rotativa de plasma. (c) Botão de Ni-Ti-Nb homogeneizado. (d) Formas obtidas após injeção em molde metálico (não mostrado).....	51
Figura 44 – Molde auxiliar (M _A) utilizado para adaptação do processo PSPP.....	52
Figura 45 - Vista em corte do molde M _{BEL} concebido no programa Autodesk Inventor, para fabricação do AMF _{CON}	52
Figura 46 – Molde em aço inox (M _{BEL}) para obtenção do AMF _{CON}	53
Figura 47 - Esquema fotográfico do processo de desmoldagem e acabamento do AMF _{CON}	54
Figura 48 - AMF _{CON} obtido a partir do processo de usinagem convencional.	55
Figura 49 – Máquina eletrodinâmica de ensaios INSTRON, Electropulse E10000.....	56
Figura 50 – Máquina de ensaios INSTRON 5582, equipada com câmara de aquecimento controlado.....	57
Figura 51 - Diagrama esquemático do experimento para geração de força nos AMF _{CON}	59
Figura 52 - Montagem para medição da deformação induzida em um parafuso pelo AMF _{CON}	60
Figura 53 - Esquema experimental para monitoramento da deformação no parafuso induzida pelo AMF _{CON}	61
Figura 54 – Aspectos gerais dos AMF _{CON} diretamente injetados via PSPP, usinados e de aço.	63

Figura 55 – Termogramas DSC dos AMF _{CON} . (a) Atuadores Injetados. (b) Atuadores Usinados.	64
Figura 56 – Ciclagem mecânica dos AMF _{CON} a temperatura ambiente. (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usinados.....	67
Figura 57 – Ensaio de geração de força em arruela Belleville de aço.....	69
Figura 58 – Curva característica tipicamente obtida do ensaio de geração de força dos AMF _{CON} e seus principais parâmetros.	69
Figura 59 – Geração de força para AMF _{CON} em função do tempo a diferentes deformações. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usinados.	72
Figura 60 – Força gerada pelos AMF _{CON} em função da temperatura para diferentes deformações: 10%, 15% e 20%. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usinados.....	75
Figura 61 – Força gerada em função da deformação para AMF _{CON} . (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usinados.....	76
Figura 62 – Elongação do parafuso em função da temperatura para um teste típico com um AMF _{CON} de Ni-Ti-Nb usinado.....	77
Figura 63 – Curva experimental Força-Deflexão para determinação da rigidez de um AMF _{CON}	79
Figura 64 – Evolução do comportamento força – deflexão dos AMF _{CON} a temperatura crescente de teste: 25°C, 35°, 45° e 55°C. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usinados.	80
Figura 65 – Comportamento da rigidez em função da temperatura dos AMF _{CON} . (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usinados.....	80
Figura 66 – Curvas superelásticas para os AMF _{CON} deformados até 40%. 82	
Figura 67 – Comportamento de um AMF _{CON} Superelástico de razão h/t = 2 submetido a uma deformação de aproximadamente 50%. (Adaptado de SPEICHER, 2010).....	83
Figura 68 – Comparação teórica-experimental do comportamento força – deflexão dos AMF _{CON} a temperatura ambiente durante carregamento.....	84

ABREVIACOES E SÍMBOLOS

AMF _{CIL}	Atuadores Cilíndricos de Ligas com Memória de Forma
AMF _{CON}	Atuadores Cnicos de Ligas com Memória de Forma
ASTM	American Society for Testing and Materials
COPPE	Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos
CCT	Centro de Ciência e Tecnologia
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EMF	Efeito Memória de Forma
EMFD	Efeito Memória de Forma Duplo
EMFS	Efeito Memória de Forma Simples
F _{AT}	Força pico gerada diretamente pela tendência de EMFS
F _{EMFS}	Força residual gerada diretamente pela tendência de EMFS
F _{FRG}	Força total residual gerada
F _G	Força Gerada
F _{GER}	Geração de força total
F _{Res}	Força residual
F _{TOT}	Força pico total
IC	Implante Coclear
IFPB	Instituto Federal da Paraíba
LaMMEA	Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas
LMF	Ligas com Memória de Forma
M _A	Molde de Alumínio
M _{Bel}	Molde metálico bi-partido
NOL	Naval Ordnance Laboratory
PSPP	Plasma Skull Push-Pull
PPGEM	Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
RET	Resistência elétrica em função da temperatura
SE	Superelasticidade
UAEM	Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande

UFRGS Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFRJ Universidade Federal do Rio de Janeiro

Letras latinas

A	Austenita
a_A	Constante positiva da Austenita na transformação direta
A_F	Temperatura final de transformação reversa durante o aquecimento (Martensita – Austenita)
Al	Alumínio
a_M	Constante positiva da Martensita na transformação direta
A_p	Temperatura de pico de transformação reversa durante o aquecimento (Martensita – Austenita)
A_S	Temperatura inicial de transformação reversa durante o aquecimento (Martensita – Austenita)
A_{ST}	Área da seção transversal do parafuso
b_A	Constante positiva da Austenita na transformação reversa
b_M	Constante positiva da Martensita na transformação reversa
C_A	Coefficiente que descreve a transformação da Martensita em Austenita devido à tensão
C_M	Coefficiente que descreve a transformação da Austenita em Martensita devido à tensão
Cr	Cromo
Cu	Cobre
D_i	Diametro interno – Arruela Belleville
D_0	Diametro externo – Arruela Belleville
E	Módulo de elasticidade
E_A	Módulo de elasticidade da estrutura Austenita
E_M	Módulo de elasticidade da estrutura Martensita
F_{AS}	Ponto que marca o inicio da geração de força a partir da tendência de recuperação de forma
F_ϵ	Ponto correspondente à força necessária para promover a

	deformação desejada no atuador
Fe	Ferro
F_0	Ponto que marca o início de geração de força após a deformação
F_P	Ponto que marca o pico de geração de força
F_R	Ponto que marca a força residual proveniente da geração de força
Ht	Histerese térmica
K	Coefficiente de Rigidez
L	Comprimento útil do parafuso
LVDT	Linear variable differential transformer
M	Martensita
M^+	Martensita associada à tração
M_F	Temperatura de final da transformação direta durante o resfriamento (Austenita – Martensita)
Mn	Manganês
M_p	Temperatura de pico de transformação direta durante o resfriamento (Austenita – Martensita)
M_S	Temperatura de início da transformação direta durante o resfriamento (Austenita – Martensita)
N_2	Nitrogênio líquido
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Carga
Si	Silício
T	Temperatura
.t	Espessura da Arruela Belleville
Ti	Titânio
Zn	Zinco

Letras gregas

Ω	Tensor de transformação de fase
Θ	Coefficiente de expansão térmica

ε	Deformação
ε_L	Deformação residual máxima recuperável por aquecimento
ε_R^T	Recuperação de deformação residual
ξ	Fração volumétrica de Martensita
ξ_0	Fração volumétrica de Martensita inicial
ν	Coefficiente de Poisson
δ	Elongação
ΔT	Varição entre temperatura de transformação inicial e final
σ	Tensão
σ^{crit}	Tensão crítica

1.0 INTRODUÇÃO

No atual estágio do desenvolvimento científico e tecnológico na área de materiais inteligentes, pesquisas em todo o mundo têm originado avanços capazes de permitir sua efetiva utilização como sensores e atuadores. Os materiais inteligentes têm a capacidade de alterar suas características físicas e mecânicas, mediante a imposição de carregamentos mecânicos, campos elétricos, eletromagnéticos ou de temperatura, além de outros (ROGERS e LIANG, 1997). As cerâmicas piezelétricas, os fluidos eletorreológicos e magnetorreológicos e as Ligas com Memória de Forma (LMF), foco desta dissertação, estão inseridos entre os principais materiais classificados neste grupo (JANOCHA, 2007).

As LMF têm como principais fenômenos associados ao seu comportamento termomecânico especial, o Efeito Memória de Forma (EMF) e a Superelasticidade (SE) (ROGERS, 1995). Estas ligas são capazes de recuperar a geometria original (ou desenvolver forças de restituição consideráveis ao se restringir sua recuperação) quando deformadas e depois submetidas a um campo de temperatura (caso do EMF) e/ou de tensão (caso da SE). Esses fenômenos ocorrem devido à transformação de fase induzida no material no estado sólido, originada seja pela temperatura, seja pela tensão mecânica.

Existe uma variada gama de aplicações baseadas em LMF em setores que vão da engenharia aeroespacial (LAGOUDAS, 2008) até o da medicina e odontologia (YAHIA, 2000). Nesse contexto, destacam-se como aplicações ainda potenciais na área médica as seguintes propostas: grampo de Judet para recuperação de fraturas da coluna vertebral (VILLARINHO *et al.*, 2010), implante coclear (KARDAS, 2007), desenvolvimento de mãos robóticas para reabilitação acionadas por fios de LMF (BUNDHOO, 2008; SILVA, 2011). Na área tecnológica da engenharia em geral tem-se como exemplos: dispositivos para centragem de edifícios (SPEICHER *et al.*, 2009), parafusos Superelásticos (TRAVASSOS, 2010), porcas de LMF (ZHANG *et al.*, 2000) e arruelas cilíndricas (HESSE *et al.*, 2004). Na indústria automobilística, a utilização de fios

de LMF para acionamento dos retrovisores automotivos (WILLIAMS *et al*, 2010) e ainda os Atuadores Cilíndricos de LMF para geração de força (FARIA, 2011).

A função dos atuadores em geral é realizar intervenções no sistema em que é inserido de maneira que a variável de controle responda adequadamente aos estímulos externos ou aos sinais de controle (JANOCHA, 2007). No caso dos atuadores de LMF, a aplicação para geração de força em uniões aparafusadas que são acionados principalmente pela ativação do EMF através de um campo de temperatura já se mostrou potencialmente interessante, como demonstrado nos trabalhos de LABRECQUE *et al* (1996), LA CAVA *et al* (2000), PEAIRS *et al* (2004), HESSE *et al* (2004), ANTONIOS *et al* (2006) e FARIA *et al* (2011).

Uma junta ou união aparafusada é uma forma de acoplamento mecânico largamente utilizada em máquinas devido à sua confiabilidade e baixo custo. Falhas nestas uniões já levaram a eventos catastróficos como vazamentos de petróleo durante a sua extração e transporte, falhas em motores de aviões, em estruturas metálicas de telhados, além de outras. As principais falhas neste tipo de união ocorrem devido a erros durante a montagem, defeitos de fabricação dos fixadores, erros de projeto e/ou dimensionamento e material inadequado (SKF, 2001). Nos Estados Unidos a utilização deste tipo de união foi causa do aumento de reclamações de garantia na indústria automotiva, que é a maior em todo mundo, causando sérios prejuízos (BICKFORD, 1995). Outro fato que evidência falhas no uso de uniões aparafusadas foi o descarrilhamento do trem Amtrak no Mississippi em 2004. Nessa ocorrência, a falta de manutenção nas junções da ferrovia ocasionou o acidente que resultou num total de 43 pessoas feridas e mais de 6,8 milhões de dólares em danos. Cuidados na aplicação de uniões aparafusadas em trens merece atenção devido ao surgimento dos chamados supertrens para o transporte de pessoas, os quais por atingirem altíssimas velocidades torna a fixação dos trilhos um fator primordial para segurança (FARIA, 2011).

A pré-carga aplicada em uniões aparafusadas deve ser suficiente para evitar vazamentos de fluidos em tubulações, assegurar rigidez da montagem tornando-a capaz de suportar carregamentos externos devidos a tração, compressão, tensões de cisalhamento e momento fletor, resistir ao

afrouxamento espontâneo do parafuso e ainda melhorar a vida em fadiga da própria união quando submetida a carregamentos dinâmicos (SKF, 2001).

Para reduzir os inconvenientes deste método de fixação são exigidos esforços de manutenção para aumentar a vida útil da estrutura. Os principais problemas de manutenção relacionados com estas uniões aparafusadas são devido ao grande número de junções a serem inspecionados e a acessibilidade de algumas delas, resultando em indisponibilidade e elevando os custos. Uma possível solução para reduzir esses inconvenientes é a utilização de atuadores de LMF em formato cônico (AMF_{CON}), do tipo arruela Belleville, para geração de força com o intuito de originar e/ou manter uma pré-carga. Outro potencial referente a utilização desses AMF_{CON} seria o aumento da rigidez da união aparafusada após recuperação de forma e com a continuidade do aumento da temperatura da união acima da temperatura final de transformação Martensita em Austenita (A_f). Esse estado ativado do AMF_{CON} pode proporcionar a junta "altas" deformações sob cargas praticamente constantes, sem reduzir a pré-carga, devido ao fenômeno da Superelasticidade, fenômeno que em uma junta comum não seria possível. Portanto, esse AMF_{CON} pode ter um caráter bifuncional de geração de força associada a aumento de rigidez, dependendo apenas da temperatura de aplicação.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar o comportamento termomecânico bifuncional de atuadores Belleville de LMF (AMF_{CON}) do sistema Ni-Ti fabricados com tecnologia nacional própria para geração de força em uniões aparafusadas através do Efeito Memória de Forma e Superelasticidade.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Selecionar LMF do sistema Ni-Ti passíveis de serem utilizadas na fabricação de Atuadores Cônicos (AMF_{CON}) com propriedades Superelásticas à temperatura ambiente ($\sim 27\text{ }^{\circ}\text{C}$);
- Desenvolver a fabricação dos AMF_{CON} pelos processos de fusão a plasma com injeção em molde (atuadores injetados) e usinagem convencional;
- Realizar caracterização puramente térmica dos AMF_{CON} usando calorimetria DSC;
- Realizar testes de geração de força dos AMF_{CON} em máquina de ensaios universal e em parafuso de aço comum;
- Avaliar as variações de rigidez dos AMF_{CON} com o aumento da temperatura bem como o comportamento Superelástico.

1.2 JUSTIFICATIVA

As fixações aparafusadas são os tipos de uniões amplamente utilizadas nas mais diversas aplicações, a exemplo de união de tubulações, fixação de partes de máquinas, componentes automotivos e aeronáuticos, estrutura metálicas, etc. Assim, eliminar ou reduzir as falhas nesse tipo de união pode contribuir para reduzir os custos inerentes à manutenção e ainda aumentar a confiabilidade dos sistemas aparafusados.

Nesse cenário, a utilização de AMF_{CON} pode contribuir para o aumento da disponibilidade do sistema que utiliza uniões aparafusadas, tendo em vista a redução das tensões de cisalhamento oriundas do processo de aperto clássico por aplicação de torque. Além disso, vislumbra-se também a possibilidade de utilização destes AMF_{CON} no desenvolvimento de sistemas de aperto inteligentes, que promoveriam a recuperação de pré-carga nestes tipos de fixação.

Vale lembrar ainda que foram encontrados apenas dois trabalhos na literatura internacional envolvendo atuadores Belleville de LMF (LABRECQUE *et al*, 1996; SPEICHER, 2009), já que a maior parte das pesquisas anteriormente realizadas abordaram atuadores do tipo arruelas cilíndricas (PEAIRS *et al*, 2004; HESSE *et al*, 2004; ANTONIOS *et al*, 2006; FARIA *et al*, 2011). Esse fato ressalta ainda mais a importância e a justificativa deste trabalho de pesquisa e desenvolvimento.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A utilização dos chamados materiais inteligentes tem crescido consideravelmente nas últimas três décadas, ocupando um importante espaço no projeto de atuadores termomecânicos para aplicações tecnológicas diversas. As Ligas com Memória de Forma (LMF) fazem parte do grupo de principais e mais importantes materiais inteligentes, entre os quais se encontram também os materiais piezelétricos e os fluidos magneto-reológicos e eletro-reológicos (LAGOUDAS, 2008). Neste contexto, e conforme mencionado anteriormente, esta dissertação trata do desenvolvimento de um atuador LMF cônico, do tipo arruela Belleville.

2.1 LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA (LMF)

2.1.1 Características das LMF

As LMF são ligas metálicas que têm a capacidade de recuperar a sua geometria original após uma deformação “pseudoplástica” imposta, ou desenvolver consideráveis forças de restituição ao se restringir essa recuperação de sua forma original, após a imposição de um campo de temperatura e/ou de tensões. O fenômeno ocorre por intermédio de transformações de fase que são induzidas no interior do material. (OTSUKA E WAYMAN, 1998).

As propriedades das LMF são conhecidas desde 1930, no entanto somente na década de 1960 é que estes materiais começaram a despertar interesse tecnológico. Em 1962, o pesquisador Buehler e seus colaboradores americanos do Naval Ordnance Laboratory (NOL), descobriram o Efeito de Memória de Forma numa liga equiatômica de Ni-Ti, que posteriormente veio a ser denominada de Nitinol. No início da década de 1970, a empresa Raychem desenvolveu a primeira aplicação industrial de LMF na indústria aeronáutica (INTRINSIC, 2003). Em 1975, o pesquisador Andreasen, da Universidade de Iowa, nos Estados Unidos, realizou o primeiro implante de aparelho dentário

Superelástico (MANTOVANI, 2000; HODGSON *et al*, 1992 apud BORN, 2007). Em geral, as excepcionais propriedades das LMF têm despertado um interesse crescente em aplicações como atuadores termomecânicos. Atualmente, aplicações vêm sendo bastante difundidas nos mais diversos campos, variando desde a indústria aeroespacial até o setor de saúde médica e odontológica.

Essencialmente, as LMF apresentam duas fases cristalográficas distintas, denominadas de Austenita e Martensita, e que apresentam propriedades diferentes. As LMF têm um comportamento completamente distinto dos materiais clássicos. Enquanto a deformação elástica nos aços é de 0,20%, nas LMF essa deformação pode chegar a 10% na sua fase austenítica (SIMEÃO, 2010). Esse fenômeno está associado a uma transformação martensítica especial, que tem a característica de ser termoelástica e reversível, diferentemente da transformação martensítica convencional que ocorre nos aços. As transformações das estruturas cristalinas (Martensita-Austenita e Austenita-Martensita) não acontecem por difusão de átomos, mas por deformações cisalhantes na rede cristalina. A fase de alta temperatura, mais quente, denomina-se Austenita e a fase de baixa temperatura, mais fria, chama-se Martensita (LAGOUDAS, 2008).

Para esses materiais as temperaturas de transformação definem quando se inicia e termina a transformação em cada fase, que varia de liga para liga. A temperatura em que se dá início a transformação da Martensita em Austenita durante aquecimento é denominada de A_s , enquanto a temperatura onde essa transformação se termina denomina-se A_f . Analogamente, durante o resfriamento, as temperaturas de início e final da transformação da Austenita em martensítica são chamadas respectivamente de M_s e M_f .

A Figura 1 apresenta o fenômeno de transformação de fase devido à variação de temperatura, em termos de variação de deformação. Segundo Paiva (2004), o mecanismo de transformação de fase em LMF devido à variação de temperatura ocorre da seguinte forma: considere uma amostra de LMF a uma temperatura acima de A_f e livre de carregamentos. O material apresenta uma microestrutura austenítica (A). Partindo do ponto A, com a diminuição da temperatura, a estrutura cristalina experimenta uma transformação para a fase martensítica ($A \Rightarrow M$, trecho AB). Este processo se

inicia na temperatura M_s (ponto A) e se desenvolve até que a temperatura M_f (ponto B), abaixo da qual a Martensita (M) é estável, seja atingida. Elevando-se a temperatura, a partir do ponto B, ao atingir A_s (ponto C), observa-se o início de uma transformação de fase inversa, da Martensita em Austenita ($M \Rightarrow A$, trecho CD), que persiste até que a temperatura A_f seja alcançada (ponto D). Este fenômeno pressupõe três regiões distintas, sendo que duas delas estão relacionadas aos trechos lineares que correspondem à expansão térmica das fases Austenita e Martensita e uma região onde há um laço de histerese relacionado aos trechos de transformação de fase. A área compreendida por este laço representa a energia dissipada durante o processo.

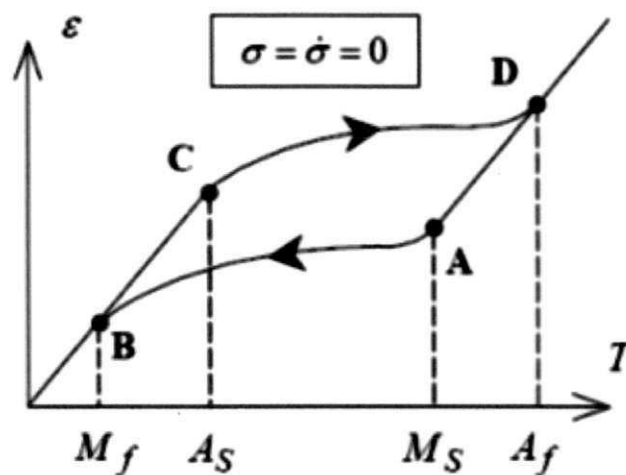


Figura 1 - Fenômeno de transformação de fase devido à variação de temperatura, (PAIVA, 2004).

Este ciclo de aquecimento e resfriamento, sem carregamento mecânico, pode ser repetido inúmeras vezes sem que as propriedades do material sofram alterações. A transformação martensítica também pode ocorrer devido a um carregamento mecânico, que origina o comportamento Superelástico apresentado na seção 2.2.2.

2.1.2 Considerações sobre as LMF de Ni-Ti

Segundo Lagoudas (2008), as LMF podem ser classificadas de acordo com os seguintes aspectos: elementos primários da liga, modo de atuação

(magnético, térmico), temperatura de operação, ou comportamento termomecânico. As principais LMF classificadas segundo elementos primários são: Ni-Ti, Cu-Zn-Al, Cu-Al-Ni e Fe-Mn-Si. Como as ligas de Ni-Ti são amplamente utilizadas nas mais diversas áreas do conhecimento, tendo propriedades singulares nas aplicações de atuadores para geração de força, optou-se por um enfoque maior nessas LMF.

Pesquisas com diferentes composições vêm sendo desenvolvidas, principalmente a partir de LMF de Ni-Ti contendo adição de outros metais como terceiro elemento, a exemplo do cobre, nióbio, háfnio, platina, ferro, entre outros. Os resultados dessas adições têm proporcionado diversas opções de LMF, com inúmeras propriedades específicas para cada finalidade, principalmente por possibilitar o aumento ou a diminuição das temperaturas de transformação de fase, bem como a redução ou aumento da histerese térmica associados à mudança de forma do material. Essa disponibilidade tem dado aos projetistas uma maior flexibilidade no desenvolvimento de aplicações, por adequar as propriedades das LMF Ni-Ti com as restrições determinadas no projeto que não seriam possíveis com os materiais clássicos (LAGOUDAS, 2008).

As propriedades das LMF são muito sensíveis a variação de composição química e processamento termomecânico. O sistema binário Ni-Ti apresenta temperaturas de transformação que variam entre -200°C e 100°C . Um dos maiores desafios neste sistema de liga consiste em desenvolver os procedimentos de tratamentos termomecânicos mais apropriados para a obtenção das características de Memória de Forma almejadas. Já o tratamento térmico que conduz à obtenção do desejado Efeito de Memória de Forma é normalmente efetuado a temperaturas compreendidas entre 500°C e 800°C (FERNANDES, 2006).

Devido à elevada reatividade do Ti, a fusão destas LMF precisa ser feita sob vácuo ou em atmosfera inerte. Para isso, utiliza-se, em escala industrial e laboratorial, técnicas como a fusão por arco de plasma, por feixe de elétrons ou por indução sob vácuo. A usinagem de ligas de Ni-Ti é geralmente difícil, exigindo ferramentas e procedimentos especiais. A soldagem e a brasagem destas ligas é também de difícil execução.

As propriedades termomecânicas LMF de Ni-Ti são, em geral, melhores que aquelas de base cobre. Estas ligas podem apresentar recuperação de forma após deformações significativas, são termicamente estáveis, apresentam uma excelente resistência à corrosão, biocompatibilidade, um bom desempenho Superelástico, além de uma alta resistência elétrica que permite o aquecimento por efeito Joule. No entanto, possuem um custo mais elevado quando comparadas as ligas à base de Cu.

A adição de Cu nas ligas de Ni-Ti, mencionada anteriormente, preferencialmente ocorre em substituição ao Ni e permite formar ligas Ni-Ti-Cu. O principal objetivo com essa adição é a redução da histerese térmica, pois essa característica pode ser importante no desenvolvimento de atuadores elétricos (LAGOUDAS, 2008).

Ao contrário dos dispositivos de atuação que necessitam de uma pequena histerese térmica, em algumas aplicações se faz necessário ter essa histerese aumentada. Um dos elementos de liga que facilita esta característica é o nióbio (Nb), cuja adição as LMF de Ni-Ti foi estudada pela primeira vez em 1986 (MELTON, SIMPSON, DUERIG, 1986 apud LAGOUDAS, 2008). A importância dessa adição é notória e tem importância prática muito grande, pois permite que o material seja deformado a baixas temperaturas, inclusive criogênicas, e ainda possa chegar à temperatura ambiente sem que a deformação seja recuperada, dentre outros fenômenos desejados durante a sua aplicação.

2.2 COMPORTAMENTO TERMOMECÂNICO DAS LMF

O comportamento termomecânico associado à transformação termoelástica das LMF envolve principalmente três fenômenos macromecânicos: o Efeito Superelástico, o Efeito Memória de Forma Simples (EMFS) e o Efeito Memória de Forma Duplo ou Reversível (EMFD). Este terceiro em particular não será tratado neste trabalho.

2.2.1. Efeito Memória de Forma Simples (EMFS)

O EMFS é a capacidade que as LMF possuem de recuperar uma deformação “aparentemente plástica”, introduzida a baixa temperatura ($T < M_f$), através de um aquecimento simples acima de uma temperatura crítica ($T > A_s$) (OTSUKA E WAYMAN, 1998). Este fenômeno está associado à transformação da fase martensítica termoelástica descrita na Figura 1. A deformação é induzida na fase martensítica, abaixo da temperatura crítica M_f na qual a LMF é extremamente maleável, iniciando sua recuperação quando o material é submetido a um aquecimento acima da temperatura crítica A_s , provocando a mudança da microestrutura do material para a fase Austenita, que é mais rígida.

Esse Efeito, também conhecido como Efeito de Memória Unidirecional, é caracterizado por não apresentar, durante o resfriamento da LMF, nenhuma alteração de forma, ainda que a estrutura sofra a transformação martensítica direta ($A \Rightarrow M$). Assim, quando a LMF é submetida a um grau de deformação residual, esta persiste até que o material seja aquecido, conduzindo a uma recuperação da forma anterior à deformação. Quando submetido a um novo resfriamento, o material não muda espontaneamente de forma, tendo que ser deliberadamente deformado novamente se outra recuperação da forma for novamente desejada.

Considerando uma amostra com uma estrutura martensítica (M), obtida a partir do resfriamento a uma temperatura inferior a M_f . Com a aplicação de um carregamento mecânico, tem-se inicialmente uma resposta elástica até que uma tensão crítica (σ^{CRIT}) seja alcançada (ponto **A**), dando início a um processo de reorientação da Martensita resultando em uma única variante martensítica associada à tração (M^+). Durante este processo de reorientação $M \Rightarrow M^+$, a tensão não se desenvolve muito em comparação com a deformação alcançada (trecho **AB**). A partir do ponto **B**, a liga volta a apresentar um comportamento elástico, referente a deformação Martensita orientada M^+ . Ao descarregar a LMF, não há uma nova conversão em diversas variantes, pois esta única variante resultante é termodinamicamente estável para $T < M_f$, havendo apenas uma pequena recuperação elástica e uma deformação residual recuperável pelo aquecimento (ϵ_L) (PAIVA, 2004).

Para retornar à geometria original do corpo, é necessário aquecê-lo a uma temperatura superior a A_f , promovendo, assim, a recuperação da

deformação residual (ϵ_L). Ao resfriar a amostra a temperatura inicial abaixo de M_f , a diferença entre a geometria obtida acima de A_f e abaixo de M_f é insignificante na prática, pois a deformação induzida durante o resfriamento é ordens de grandeza menor que a deformação ϵ_L induzida por tensão e recuperada durante o aquecimento. A Figura 2 mostra a representação da curva tensão-deformação característica do fenômeno de EMFS.

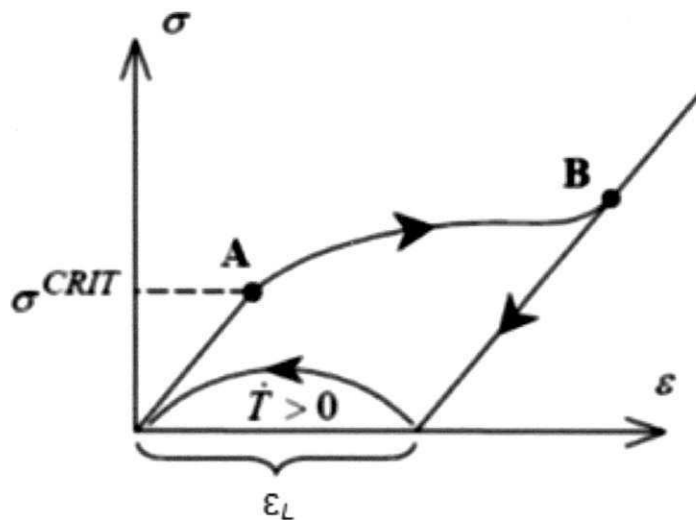


Figura 2 – Diagrama tensão – deformação ilustrativo do Efeito de Memória de Forma Simples (PAIVA, 2004).

A Figura 3 mostra esquematicamente o EMFS, ilustrado com base em um atuador cônico do tipo arruela Belleville, que inicialmente está a uma temperatura inferior a M_f quando é aplicada uma força provocando sua deformação. Ao ser liberada a força, uma pequena parte de sua forma é recuperada (deformação elástica), permanecendo uma deformação residual. Um aquecimento acima de A_f permite recuperar completamente a forma original. Se essa deformação for bloqueada pode-se gerar uma força de restituição em função da temperatura.

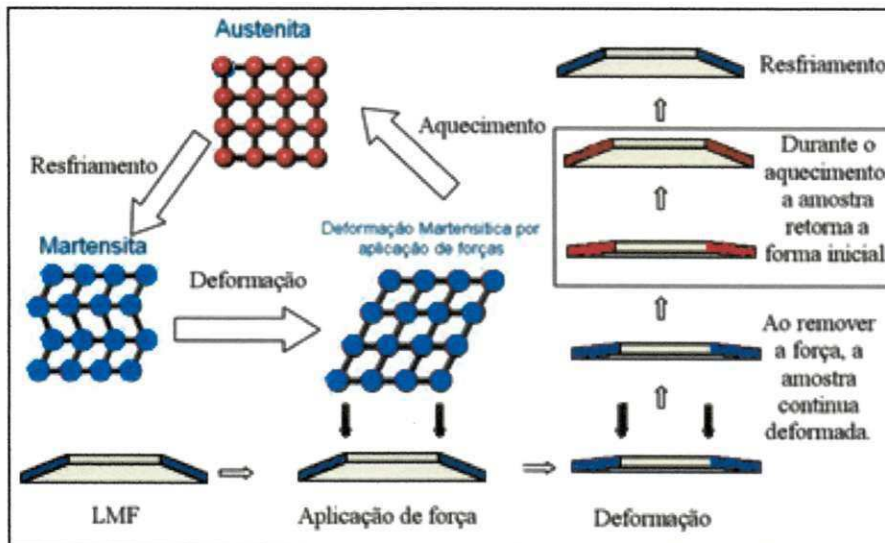


Figura 3 - Esquematização do EMFS em uma arruela Belleville de LMF.

2.2.2. Superelasticidade

A Superelasticidade é também conhecida como pseudoelasticidade. Essa denominação deve-se ao fato das LMF poderem sofrer grandes deformações (de até 10%) sob carregamento mecânico que podem ser totalmente recuperadas após descarregamento (DUERIG *et al*, 1999).

O comportamento pseudoelástico é associado com a formação e reversão da Martensita induzida por tensão a partir da fase austenítica, quando a LMF é carregada e descarregada mecanicamente a uma temperatura acima da temperatura A_f (ZHANG E MCCORMICK, 2000B apud PAIVA E SAVI, 2005). A fração volumétrica de Martensita (ξ) cresce continuamente a partir da tensão crítica com o aumento da tensão e decresce se a tensão é aliviada.

Assim, considerando uma amostra de LMF a uma temperatura superior a A_f , a fase austenítica (A) é estável. De acordo com o esquema tensão – deformação da Figura 4, para uma temperatura constante $T > A_f$, com a aplicação de um carregamento mecânico o material se comporta elasticamente até que uma tensão crítica σ^{CRIT} seja atingida (ponto **A**), quando, então, dá-se início uma transformação de fase $A \Rightarrow M^+$ (trecho **AB**). Esta Martensita induzida por tensão existente no ponto **B** é apenas uma variante associada à tração (M^+). Ao descarregar a amostra, o material experimenta uma transformação inversa $M^+ \Rightarrow A$ (trecho **CD**), já que para $T > A_f$ a Martensita é uma fase instável na ausência de um campo de tensões (PAIVA, 2004).

É importante destacar, o aparecimento de um laço de histerese (região compreendida entre os pontos **A**, **B**, **C** e **D**) no comportamento tensão-deformação, conforme ilustra a Figura 4. Vale ressaltar também que existe um limite para a recuperação dessas deformações representado pelo limite elástico da fase produto obtida após a transformação (para tensões acima do ponto **B**), a partir de onde o material passa a se comportar plasticamente e a deformação não mais pode ser recuperada.

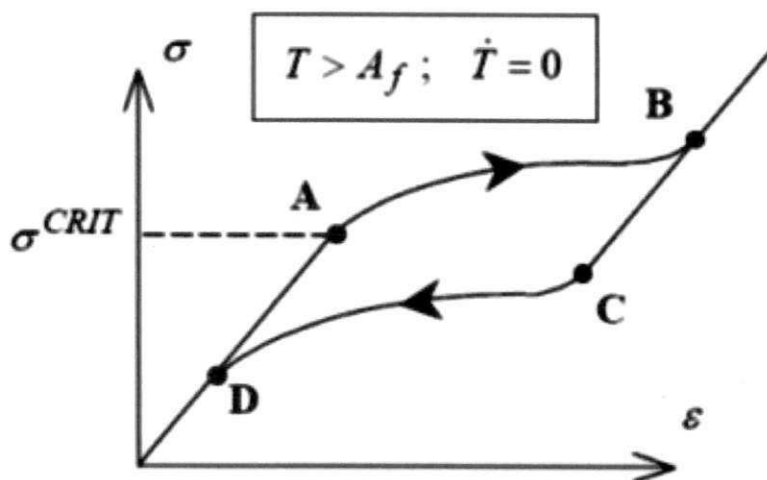


Figura 4 – Diagrama tensão – deformação ilustrativo do fenômeno de Superelasticidade (PAIVA, 2004).

A Superelasticidade, assim como o EMFS, pode ocorrer em uma mesma amostra de LMF, dependendo apenas da temperatura de trabalho em que se encontra o material e da sua história termomecânica, e desde que a tensão crítica limite para o escorregamento de planos seja suficientemente elevada (PAIVA, 2004).

Outra propriedade importante que está diretamente associado ao fenômeno de mudança de fase encontrado nas LMF é o aumento da rigidez com o aumento da temperatura, como pode ser visualizado na Figura 5 pelo aumento da inclinação da reta tensão – deformação correspondente a região elástica para cada temperatura de teste crescente. Portanto, define-se aqui rigidez como a inclinação da região linear AD na figura 4, que nesse caso é equivalente ao módulo de elasticidade do material. Assim como a rigidez, as tensões críticas para reorientação e formação de Martensita induzida por tensão também são aumentadas (COUTINHO NETO *et al*, 2008; ZURBITU *et*

al, 2010). Essa figura permite visualizar a migração do comportamento de EMFS para Superelasticidade com o aumento da temperatura.

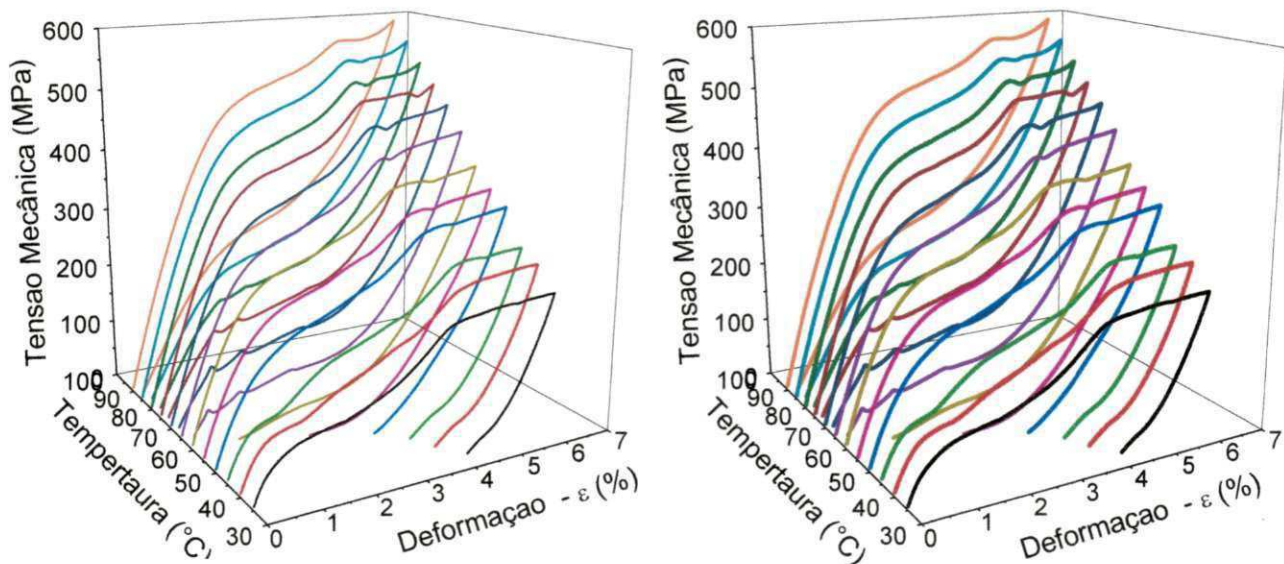


FIGURA 5 - Diagrama tensão - deformação para diversas temperaturas crescentes na região de transformação de fase de uma LMF típica (a) Fio. (b) Fita. (COUTINHO NETO *et al*, 2008).

2.2.3. Caracterização térmica das LMF

A Figura 5 indica que uma das principais maneiras de realizar a caracterização termomecânica de LMF consiste da realização de ensaios de tração uniaxial a temperaturas crescentes e mantidas constantes durante cada teste. Estes ensaios termomecânicos permitem não só mensurar os comportamentos de EMFS e Superelasticidade, descritos respectivamente nas Figuras 2 e 4, como também determinar uma série de propriedades e parâmetros constitutivos, como os módulos de elasticidade das fases Martensita e Austenita, as tensões críticas de formação e reversão da Martensita induzida por tensão e os coeficientes de aumento dessas tensões críticas com o aumento da temperatura, que traduzem uma lei de Clausius-Clayperon específica para LMF.

No caso de caracterizações puramente térmicas, as principais técnicas utilizadas são a calorimetria exploratória diferencial, internacionalmente

conhecida por DSC (do inglês *Differential Scanning Calorimetry*), e a variação de resistência elétrica em função da temperatura (RET).

A calorimetria DSC é uma técnica de análise térmica que pode ser usada para medir as temperaturas de transformação de fase, o calor latente devido à transformação, e o calor específico de diferentes fases de um material, tendo a vantagem de exigir apenas uma pequena quantidade de material (de 5 a 200 mg). O princípio básico do DSC é quantificar a energia absorvida ou recuperada por uma amostra livre de tensões externas quando é aquecida ou resfriada em seu intervalo de transformação. Essa técnica é utilizada para caracterização de vários tipos materiais, inclusive as LMF, permitindo a medição principalmente das temperaturas de transformação, que determinam o início e fim de formação das fases nesses materiais.

Os valores exotérmicos e endotérmicos, correspondentes às variações de energia, podem ser avaliados e mostram um significado físico. A Figura 6 mostra um termograma DSC típico de uma LMF do sistema Ni-Ti-Cu, revelando os dois picos típicos durante resfriamento e aquecimento, característicos de formação e reversão da fase martensítica.

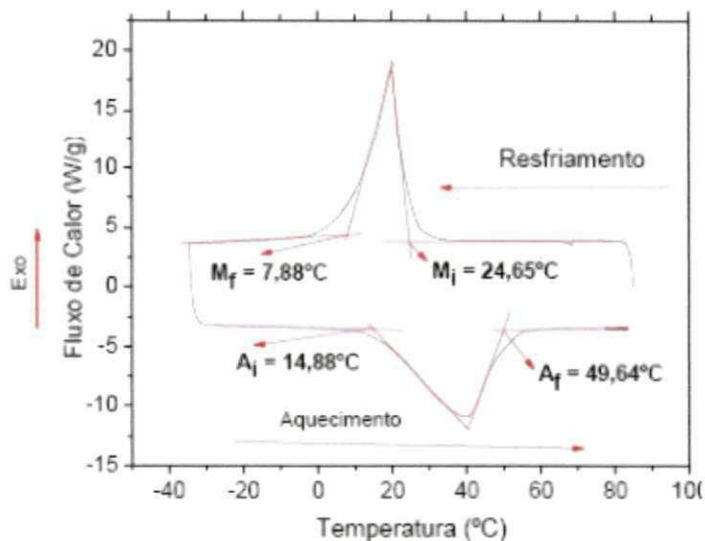


Figura 6 - Curva de DSC obtida para a LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) (REIS, 2010).

Conforme mencionado anteriormente, a outra técnica comumente utilizada para medição de temperaturas de transformação em LMF é baseada em medidas de variação de resistência elétrica do material durante aquecimento e resfriamento (REIS, 2010). Usando este procedimento, as

variações significativas de resistividade, de até 20%, são aferidas na região do intervalo transformação. A Figura 7 mostra uma curva característica correspondente ao resultado direto de uma medição de temperaturas via resistência elétrica para a mesma LMF da Figura 6.

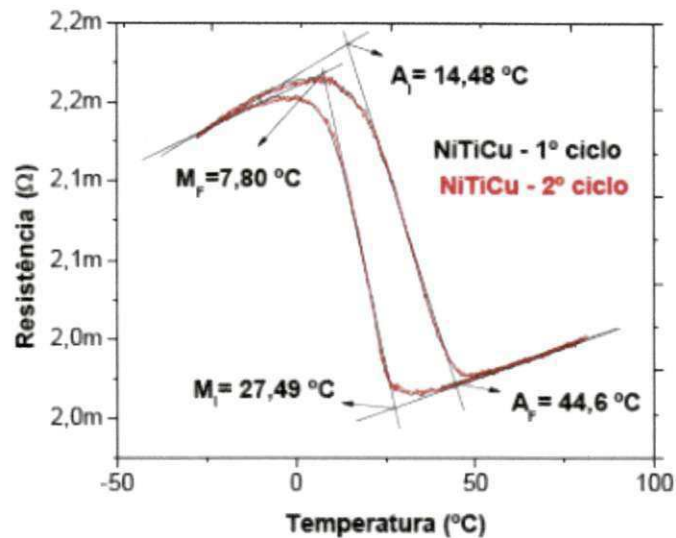


Figura 7 - Curva de RET para a LMF 49,4Ni-44,7Ti-5,9Cu (% em peso) (REIS, 2010).

Essas medidas de RET para determinação de temperaturas de transformação em LMF podem ser realizadas concomitantemente com ensaios de Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD) sob carga constante, conforme descrito por COUTINHO NETO *et al* (2008).

2.2.4 Modelagem matemática do comportamento de LMF

Vários autores têm desenvolvido trabalhos de pesquisa em modelagem do comportamento termomecânico das LMF, considerando abordagens macro e microscópicas, sendo as macroscópicas as mais difundidas e com maiores validações experimentais (PAIVA E SAVI, 2005). Inúmeros são os modelos macroscópicos existentes na literatura, cada um com sua particularidade, dentre os quais se podem citar: TANAKA (1986), LIANG E ROGERS (1990), BRINSON E LAMMERING (1993), AURICHIO E SACO (1997), PAIVA *et al* (2005) e LAGOUDAS (2008), dentre outros.

De uma maneira geral, as equações constitutivas são, basicamente, função da deformação, tensão e temperatura, e um procedimento comum para

relacionar essas variáveis é definir uma quarta variável, correspondente a fração volumétrica de Martensita (ξ).

Segundo PAIVA e SAVI (2005), a equação constitutiva para LMF em sua forma geral pode ser escrita conforme descrito pela Equação (1):

$$\dot{\sigma} = E(\dot{\xi}) + \theta \dot{T} + \Omega(\dot{\xi}) \quad (1)$$

Sendo as variáveis E e Ω definidas pelas equações (2) e (3):

$$E(\xi) = (1 - \xi)E_A + \xi E_M \quad (2)$$

$$\Omega(\xi) = -E(\xi)_L \quad (3)$$

Nessas equações, tem-se: $\dot{\sigma}$ – taxa de variação tensão, $\dot{\epsilon}$ – taxa de deformação, $\dot{\xi}$ – taxa fração volumétrica de Martensita, ϵ_L - deformação máxima recuperável, E - modulo de elasticidade, E_A modulo de elasticidade da estrutura Austenita, E_M modulo de elasticidade da estrutura Martensita, \dot{T} - variação entre temperatura de transformação inicial e final, θ - coeficiente de expansão térmica e Ω - tensor de transformação de fase. Os sub-índices A e M estão relacionados com as fases Austenita e Martensita, respectivamente.

A Equação (1) expressa a mudança de tensão induzida nas LMF em termos de mudanças correspondentes na deformação, temperatura e fração volumétrica de Martensita. Essa equação também é válida para mudanças entre dois estados e pode expressar o comportamento termomecânico da LMF, se a mesma está passando por transformações de fase ou não. Sem transformações de fase, o último termo da equação desaparece e uma equação termo-elástica simples é obtida. Se o processo também é isotérmico, o termo correspondente à temperatura também é cancelado, reduzindo a Equação (1) à lei de Hooke. A fração de Martensita é função da variação de temperatura. A transformação da Austenita para Martensita, que ocorre com mudança das temperaturas de transformação de M_s para M_f é dada pela Equação (4) (BRINSON, 1993 apud FARIA, JUNIOR *et al*, 2011):

$$\dot{\xi} = \frac{1 - \xi_0}{2} \cos[a_m(T - M_f + b_m\sigma)] + \frac{1 - \xi_0}{2} \quad (4)$$

Sendo as constantes utilizadas definidas a partir das Equações (5), (6) e (7) seguintes:

$$M'_f = M_f + \frac{\sigma}{C_M}, \quad M'_s = M_s + \frac{\sigma}{C_M} \quad (5)$$

$$a_m = \frac{\pi}{M_s - M_f} \quad (6)$$

$$b_m = -a_m \frac{(M'_f - M_f)}{\sigma} \quad (7)$$

Onde ξ_0 é a fração de Martensita inicial, M_f é a temperatura de transformação final da Martensita, M_s corresponde a temperatura de transformação inicial da Martensita, C_M é o coeficiente de correção que descreve a transformação da Austenita em Martensita, devido a tensão e a_m e b_m constantes positivas da Austenita e Martensita na transformação reversa respectivamente.

De forma semelhante, a transformação inversa ocorre entre as temperaturas de transformação A_s e A_f podendo ser descrita pela Equação (8):

$$\dot{\xi} = \frac{\xi_0}{2} \{ \cos[a_a(T - A_s) + b_a\sigma] + 1 \} \quad (8)$$

Sendo as constantes utilizadas definidas a partir das seguintes equações:

$$A'_f = A_f + \frac{\sigma}{C_A}, \quad A'_s = A_s + \frac{\sigma}{C_A} \quad (9)$$

$$A'_f = A_f + \frac{\sigma}{C_A}, \quad A'_s = A_s + \frac{\sigma}{C_M} \quad (10)$$

$$a_a = \frac{\pi}{A_s - A_f} \quad (11)$$

$$b_a = -a_a \frac{(A'_f - A_f)}{\sigma} \quad (12)$$

Onde A_f é a temperatura de transformação final da Austenita, A_s é a temperatura de transformação inicial da Austenita, C_A o coeficiente que descreve a transformação da Martensita para Austenita devido à tensão e a_a e b_a constantes positivas da Austenita e Martensita na transformação direta respectivamente. Na Figura 8 podem ser visualizados os parâmetros do material que devem ser obtidos experimentalmente para inserção no modelo.

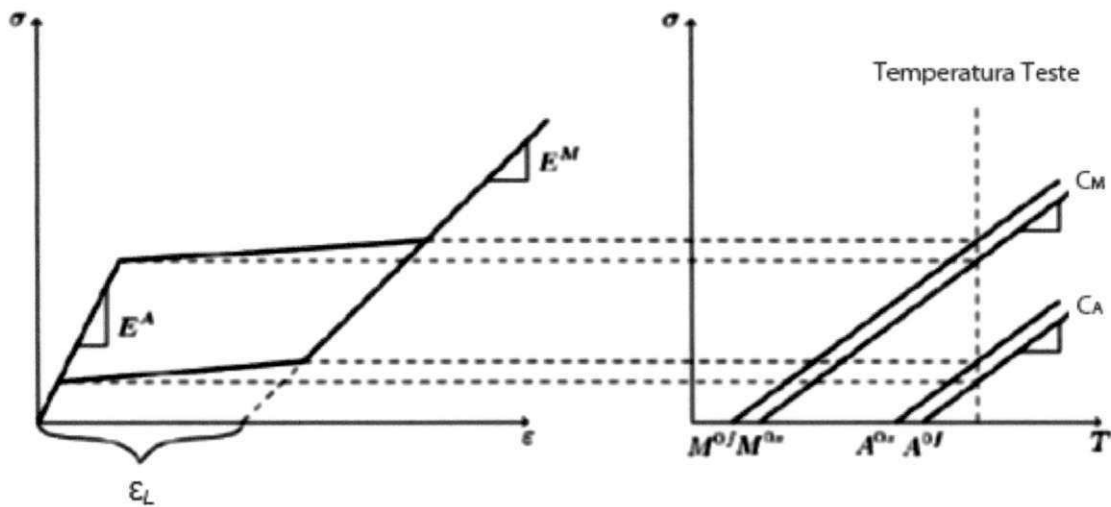


Figura 8 – Esquema ilustrativo da determinação experimental dos parâmetros das LMF para implementação da modelagem constitutiva descrita pela Equação (1) (Adaptado de ANSYS, 2008).

Este grupo de equações permite realizar a simulação do comportamento termomecânico mostrado na Figura 5.

2.2.5 Aplicações de LMF

Devido ao seu comportamento termomecânico diferenciado, as LMF têm um grande potencial de aplicação em diversas áreas do conhecimento, destacando-se os setores médico-odontológico, aeroespacial e automotivo. Nesta seção são apresentadas algumas das aplicações de LMF, subdivididas em duas categorias: aplicações convencionais e potenciais. Considera-se aqui como aplicações convencionais aquelas onde as viabilidades técnica e comercial já foram de alguma forma demonstradas. As aplicações potenciais são aquelas vislumbradas com base no comportamento termomecânico das LMF, mas que ainda necessitam de demonstração de sua viabilidade técnica e/ou comercial. Neste segundo grupo concentram-se atualmente as pesquisas em LMF.

Aplicações Convencionais

Devido aos fenômenos de Superelasticidade e Efeito Memória de Forma, as LMF têm sido utilizadas em uma variedade de diferentes configurações geométricas dentro da indústria de dispositivos médicos e odontológicos. Dentre às aplicações comerciais que foram desenvolvidas explorando o fenômeno da Superelasticidade, tem-se: fios para direcionamento de cateteres, arcos ortodônticos usados para correção do posicionamento dentário, limas endodônticas, entre outras (STOECKEL *et al*, 2002).

Em termos de Efeito Memória de Forma, as LMF têm sido utilizadas na fabricação de *stents* (termo técnico que indica micro-estruturas auto-expansíveis) para desobstrução das artérias, conforme esquematizado na Figura 9. Nessa aplicação, o *stent* de LMF sofre um tratamento termomecânico para assumir uma determinada forma, e posteriormente é deformado a baixa temperatura e inserido na veia obstruída. Com o aquecimento devido ao calor do corpo humano, o *stent* retoma a forma pré-definida (DUERIG *et al*, 1999).

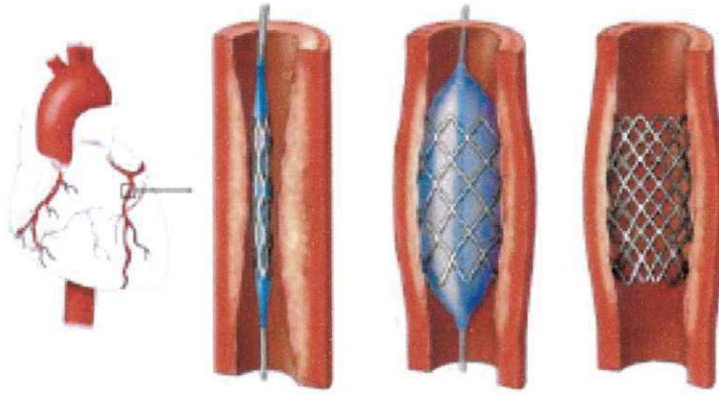


Figura 9 – Esquemática da instalação de um *stent* de LMF para desobstrução de artéria humana (SILVA, 2009).

As ligas de Ni-Ti, muito conhecidas na literatura internacional pelo termo Nitinol, são as LMF mais utilizadas na bioengenharia. Esse fato se deve a excelente resistência à corrosão e excelente biocompatibilidade destas LMF (STOECKEL *et al*, 2002).

Na indústria automotiva as aplicações vão desde dispositivos para absorção de impacto até a utilização da LMF como sensor e atuador como em alguns acessórios, a exemplo da utilização como atuador para absorção de impactos em veículos militares ou para o controle de espelhos retrovisores automotivos (WILLIAMS *et al*, 2010).

O comportamento da histerese em regime de Superelasticidade torna a LMF um sistema eficaz para dissipar energia devido a impactos e vibrações (LAGOUDAS, 2008). O Efeito Memória de Forma é explorado em acoplamentos de tubulações através da utilização de luvas de LMF. Estas luvas, conforme ilustra a Figura 10, possuem a forma de anéis cilíndricos de diâmetro ligeiramente inferior ao dos tubos que devem ser unidos. A baixa temperatura, na fase martensítica, a luva de LMF é expandida e, posteriormente, sendo aquecida até uma temperatura ligeiramente superior a A_f , sofre uma contração que permite estabelecer uma ligação rígida entre as extremidades dos tubos em que é instalada (GHANDI, 1992 apud OLIVEIRA, 2008).

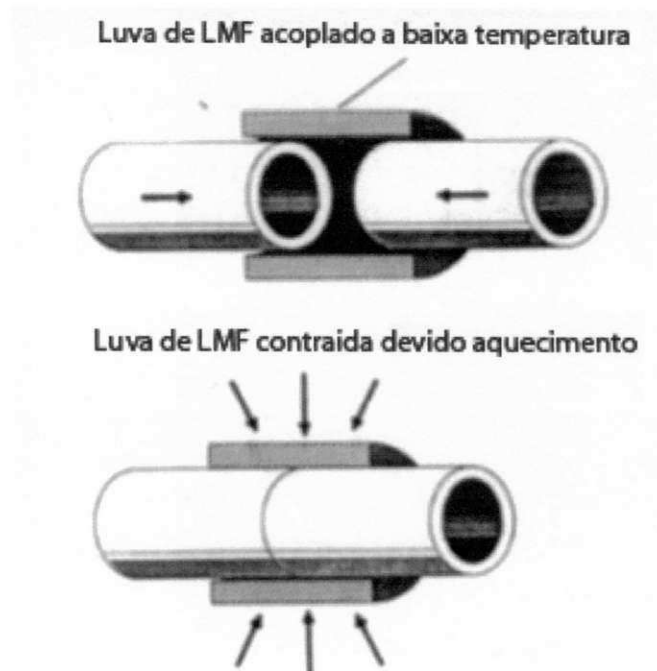


Figura 10 – União de tubulação por meio de luva de LMF (GHANDI, 1992 apud OLIVEIRA, 2008).

Aplicações Potenciais

A indústria de produtos biomédicos está sempre atenta à evolução dos materiais e tem empregado as mais modernas tecnologias na confecção de próteses e instrumentos que proporcionem uma melhor reabilitação, e um menor tempo de internação hospitalar. Isso ocorre mesmo no Brasil, onde recentemente pesquisadores da Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS realizaram um estudo preliminar para o desenvolvimento de um grampo de Judet de LMF (VILLARINHO *et al*, 2010). Esse dispositivo, ilustrado na Figura 11, é utilizado na reabilitação de "Tórax Instável" que prejudica a mecânica respiratória provocando uma alta taxa de mortalidade. Os resultados preliminares evidenciaram que a transformação provocada pelo calor humano, ocasionando o fechamento das garras do grampo de Judet, permite que esse elemento se mantenha firme e sem alteração da consistência com o tempo, de forma a antever sua aplicabilidade num modelo experimental. Nesse contexto, grampos de Judet de Nitinol são apresentados como vantajosos em relação aos já existentes em aço inoxidável 316L, especialmente pela facilidade de manuseio e simplificação dos procedimentos cirúrgicos.

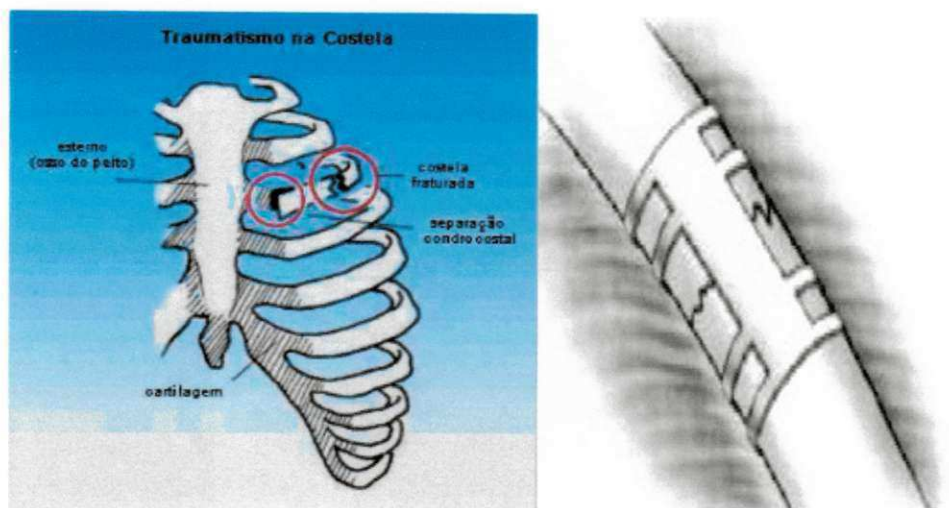


Figura 11 – Ilustração da fratura característica de uma costela humana e utilização de um grampo de Judet de LMF (VILLARINHO *et al*, 2010).

Nesse cenário da indústria biomédica, a necessidade de intervenções cirúrgicas tecnologicamente avançadas tem proporcionado o desenvolvimento de soluções mais complexas.

O Implante Coclear (IC) é um dispositivo eletrônico, parcialmente implantado, que visa proporcionar aos seus usuários sensação auditiva próxima à fisiológica. Estima-se que até o ano de 2008 o número deste tipo de implante no mundo já ultrapassara 120 mil. Segundo Gilford *et al* (2008) muitos pacientes conseguem atingir uma pontuação entre 90 e 100% de acerto nos testes padrões de inteligibilidade de sentenças em ambiente silencioso. Um grande desafio para os futuros IC é melhorar o desempenho em ambientes ruidosos, sendo que uma de suas limitações tradicionais é a incapacidade que o arranjo de eletrodos tem de atingir a profundidade ideal de inserção na cóclea, a parte auditiva do ouvido interno. Pesquisadores alemães descobriram que uma melhoria nos IC pode ser possível usando a tecnologia de LMF, pois proporciona uma maior profundidade de implantação para a matriz-eletródo quando se projeta um componente de LMF, cuja forma corresponde a da cóclea (GILFORD *et al*, 2008 apud DANIELI, 2010).

Antes do processo de inserção, o componente seria deformado pseudo-plasticamente, e, em seguida, contando com aquecimento próprio do corpo, retornaria à sua forma original durante o implante. Os resultados atestam a possibilidade de uma solução que pode fornecer mais profundidade

de implantação e, assim, melhor funcionalidade para o IC. Na Figura 12 é mostrada uma representação do funcionamento desse IC de LMF.

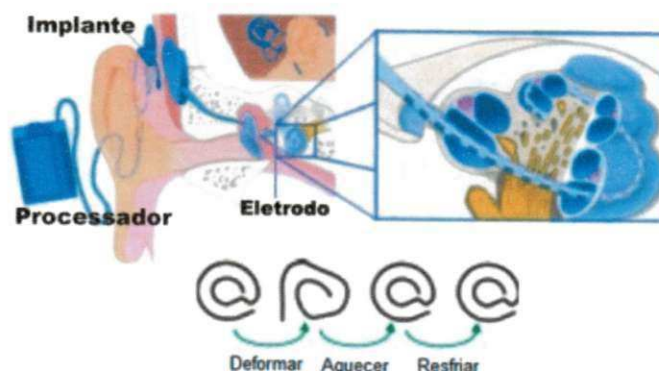


Figura 12 – Demonstração do IC com Efeito Memória de Forma. Da esquerda para direita: forma inicial do componente, forma deformada, aquecimento corpóreo e forma após aquecimento. (Adaptado de KARDAS et al, 2007).

Outro exemplo potencial de aplicação de LMF que merece destaque se encontra na área de reabilitação robótica, com o desenvolvimento de próteses para membros superiores do corpo humano. O protótipo de dedo robótico atuado por fios finos de LMF mostrado na Figura 13 é um primeiro passo nesse sentido, tendo a vantagem de apresentar baixo peso e ruído, se comparado com as próteses disponíveis no mercado. Normalmente os protótipos de mãos artificiais são fabricados usando motores elétricos e mecanismos pneumáticos (BUNDHOO *et al*, 2008).

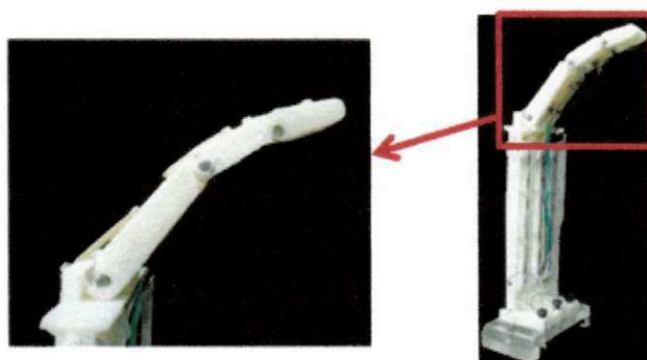


Figura 13 – Protótipo de um dedo robótico acionado por fios de LMF (SILVA, 2011).

Ainda como aplicações potenciais, pode-se destacar a utilização de LMF em atenuação de vibrações. O terremoto de Sichuan, na China, em 2008, foi um lembrete de como grande parte das infraestruturas de hoje são vulneráveis a danos causados por eventos desta natureza. Devido a isso,

desenvolvedores de dispositivos de controle de vibrações em estruturas civis têm mostrado interesse no comportamento superelástico de LMF de Ni-Ti devido à sua capacidade de dissipar energia através de uma grande histerese mecânica. Alguns pesquisadores têm investigado o uso de sistemas de recentralização de edifícios para melhorar o desempenho das estruturas durante eventos sísmicos. Os dispositivos testados no trabalho de SPEICHER *et al* (2009), foram projetados em duas formas: utilizando molas helicoidais e arruelas Belleville, ambos fabricados em LMF, conforme ilustrado na Figura 14. Os resultados iniciais mostram que as molas helicoidais de Nitinol são capazes de obter a recentralização com um bom amortecimento, enquanto arruelas Belleville também de Nitinol mostraram potencial para formar a base para um dispositivo de amortecimento superelástico.

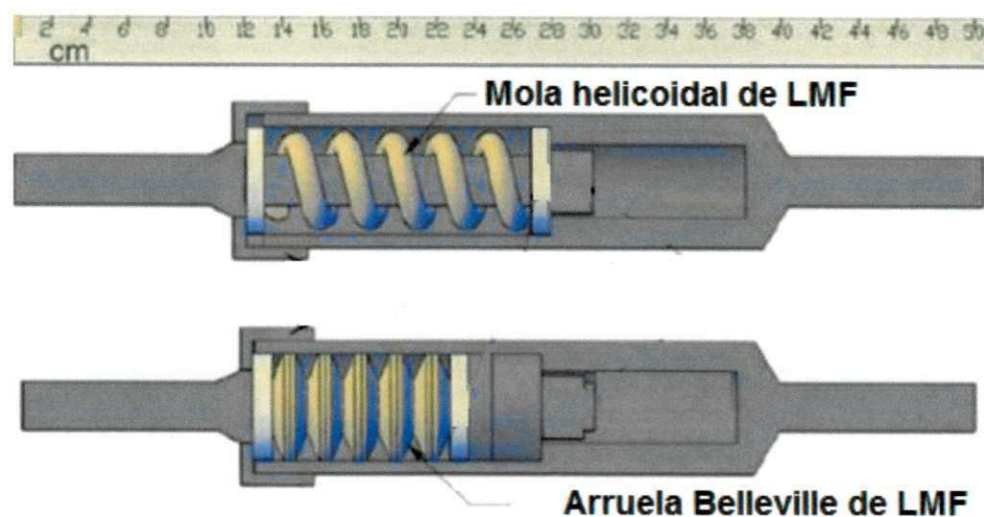


Figura 14 – Dispositivos em LMF para centragem de edifícios durante abalos sísmicos (Adaptado de SPEICHER *et al*, 2009).

Finalmente, a exploração do potencial do Efeito Memória de Forma na utilização de atuadores do tipo arruelas de LMF para geração de pré-cargas em uniões aparafusadas, vem progressivamente crescendo. A ideia é deformar o atuador no seu estado martensítico e, com o bloqueio da recuperação da forma ao aquecer para o estado austenítico, gerar uma força suficiente para que haja aperto entre os membros das juntas, reduzindo e/ou eliminando falhas deste tipo de união devido ao atrito e o torque aplicado, o que proporcionaria uma maior confiabilidade na montagem. A Figura 15 ilustra essa aplicação.

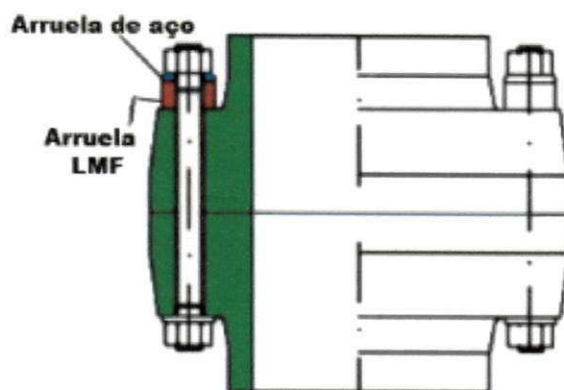


Figura 15 – Dispositivo para pré-carga de parafusos baseado em arruelas de LMF, (Adaptado de SINTEF, 2000).

2.3. ARRUELAS CÔNICAS - BELLEVILLE

As molas ou arruelas Belleville, mostradas na Figura 16, são elementos de disco cônico que podem ser carregadas ao longo de seu eixo, tanto estaticamente, como dinamicamente (SCHNORR, 2003). Essas arruelas desenvolvidas e patenteadas na França por Julien François Belleville, em 1867, têm propriedades elásticas e possuem uma relação não linear entre força e deflexão, que as torna muito úteis onde às condições de espaço e deflexão é limitada, a exemplo de pinos de matrizes de conformação, mecanismos de ricocheteamento de armas de fogo, fornos, e em qualquer aplicação onde pré-carga em parafusos deve ser mantida ao longo do tempo.

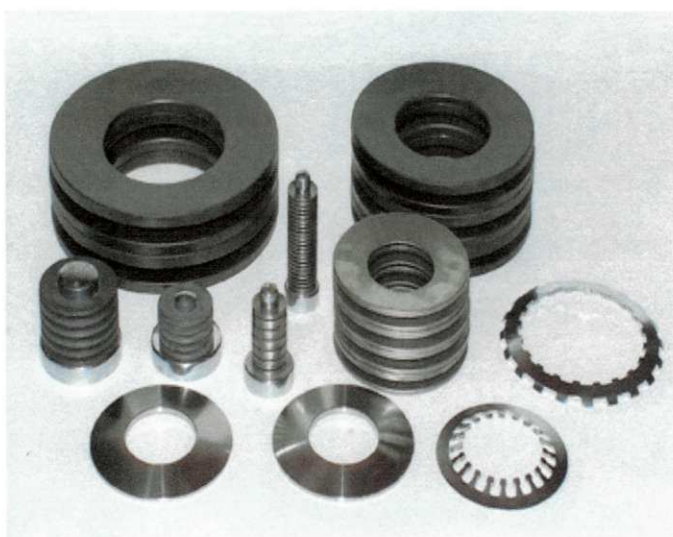


Figura 16 - Tipos diversos de arruelas Belleville (NORTON, 2006).

Em 1917, o Frânces Dubois desenvolveu a primeira teoria para o cálculo teórico dos esforços em arruelas cônicas, usando a teoria da placa plana perfurada, que na prática não se difundiu. Em 1936, dois americanos, Almen e László, publicaram um método simplificado de cálculo rápido e praticamente correto para dimensionar estas molas de disco (SCHNORR, 2003). SHIGLEY (2006) e NORTON (2006) apresentam curvas de força – deflexão para esses elementos semelhantes entre si, muito embora o equacionamento seja um pouco diferente do apresentado pelos americanos, que será aqui abordado, por ser o mais difundido na literatura.

As arruelas Belleville foram ainda introduzidas em várias áreas de tecnologia. Começando com aplicações na construção de ferramentas de corte e estampagem, onde o uso da arruela Belleville é especialmente vantajoso por causa do grande número de variações possíveis para arruelas de mesmas dimensões até a rápida introdução de novas aplicações, inclusive em motores de máquinas e na fabricação de automóveis (SCHNORR, 2003).

Inúmeros são os tipos de arruelas Belleville (Figura 16), com dimensões e processos de fabricação diversificados e também específicos para cada família, dependendo da funcionalidade que o elemento deve desempenhar (NORTON, 2006).

Unir as características que as arruelas Belleville têm de fornecer grandes cargas com pequenas deflexões com a recuperação de forma provocada pela capacidade de recuperar deformações por parte das LMF, mostra-se promissor, pois se espera obter forças de recuperação suficientes para promover pré-cargas em uniões aparafusadas, reduzindo falhas em uniões deste tipo, que são provenientes de forças cisalhantes durante o torque nos parafusos, conforme ilustrado na Figura 17.

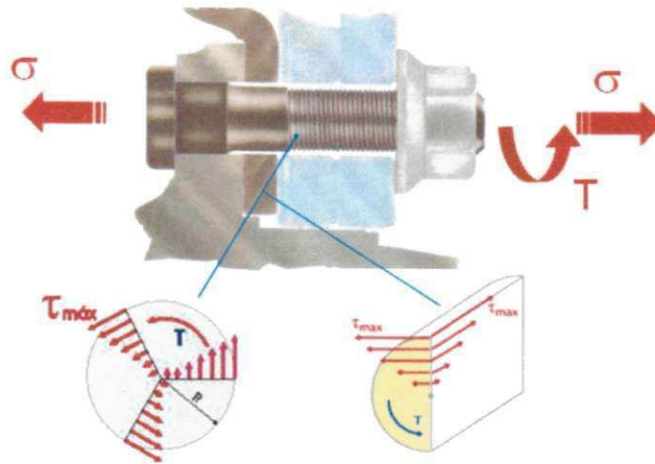


Figura 17 – Esquema ilustrativo das tensões atuantes num parafuso durante aperto convencional por torque (T).

2.3.1 Comportamento mecânico de Arruelas Belleville

Considerando o tipo de aplicação e o uso a que se destina, este dispositivo pode se caracterizar como uma mola ou uma arruela, não havendo nenhum prejuízo quanto ao seu equacionamento, visto que o modelo matemático existente contempla carregamentos estáticos (arruela) e dinâmicos (mola) (SCHNORR, 2003).

Muito embora esse dispositivo tenha sido desenvolvido no século XIX e seja muito utilizado na indústria mecânica, principalmente bélica, do ponto de vista de comportamento mecânico, não há na literatura muitas informações sobre os mesmos.

Conforme mostrado na Figura 18, SCHNORR (2003) apresenta curvas características força-deflexão de arruelas Belleville com razões h/t diferentes, no intervalo 0,40 a 2,40. Estas curvas são normalizadas em ambos os eixos com relação à condição da arruela, quando comprimida até a posição plana. Os valores absolutos de força-deflexão variam com a razão h/t , onde h é a altura interna de cone, t é a espessura de material e R_d corresponde a razão dos diâmetros externos e internos da arruela.

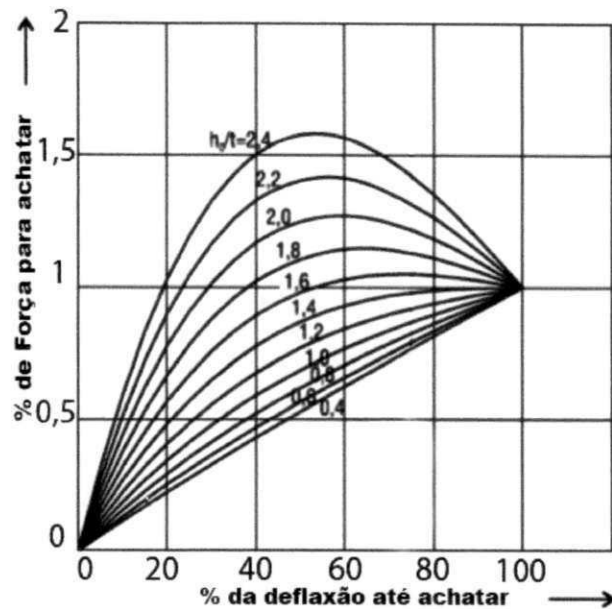


Figura 18 – Comportamento força-deflexão para diversas razões h/t em arruelas Belleville, (SCHNORR, 2003).

Na Figura 19 apresenta uma curva experimental característica de força-deflexão durante carregamento e descarregamento de uma arruela Belleville, segundo DAVET (1997). A histerese presente é causada pelo atrito entre a arruela e a superfície de carregamento. Nesse trabalho o autor não descreve informações a respeito da razão R_d nem sobre o percentual de deformação aplicado na arruela Belleville para determinação desse comportamento, de modo que trata-se de um resultado apenas qualitativo.

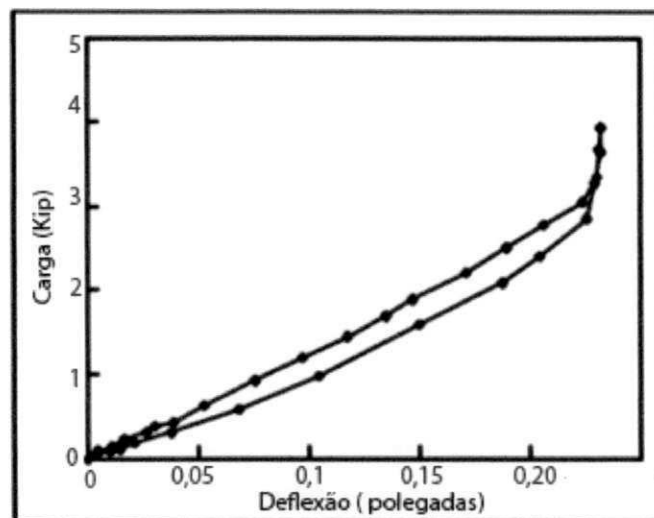


Figura 19 - Curva força-deflexão para arruelas Belleville (Adaptado de DAVET, 1997).

2.3.2 Equacionamento matemático para o comportamento carga-deflexão em arruelas Belleville

Considerando os principais parâmetros característicos das arruelas Belleville, que são espessura (t), Diâmetro externo (D_0), Diâmetro interno (D_i), deflexão (y), e altura livre ou deflexão máxima (h), apresentados na Figura 20, e os parâmetros do material, tais como o coeficiente de Poisson (ν) e o módulo de Elasticidade (E) pode-se definir a Equação (13) que permite avaliar a força necessária para promover uma deflexão desejada.

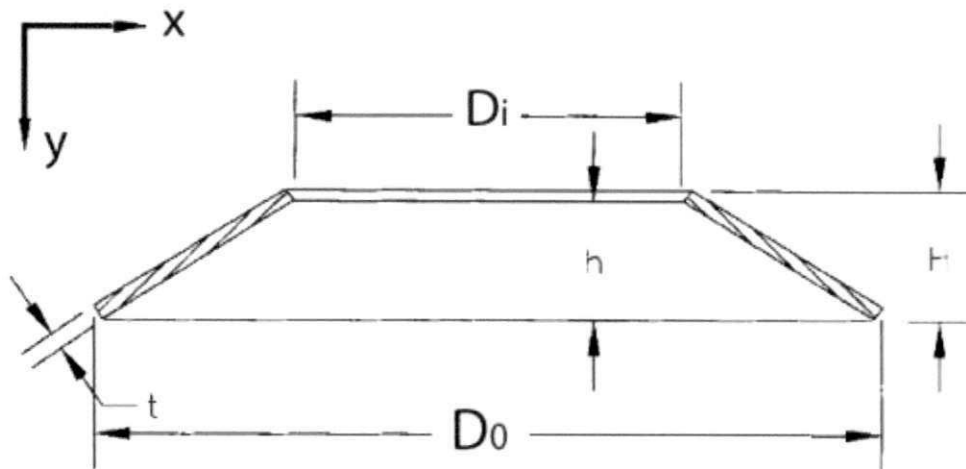


Figura 20 – Principais parâmetros característicos de uma Arruela Belleville.

As curvas mostradas na Figura 18 foram originadas a partir da Equação (13) que representa uma relação carga-deflexão não-linear.

$$F = \frac{4Ey}{K_1 \cdot D_0^2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left[(h - y) \cdot \left(h - \frac{y}{2} \right) \cdot t + t^3 \right] \quad (13)$$

Nessa equação, a constante K_1 é dada pela Equação (14):

$$K_1 = \frac{6}{\pi \ln R_d} \left[\frac{(R_d - 1)^2}{R_d^2} \right] \text{ e } R_d = \frac{D_0}{D_i} \quad (14)$$

Onde: D_o é o diâmetro externo, t é a espessura da arruela, R_d é a razão entre os diâmetros (D_o - diâmetro externo e D_i - diâmetro interno), ν é o coeficiente de Poisson e E é o módulo de elasticidade do material.

A carga na posição plana ($y=h$) pode ser calculada pela Equação (15):

$$F_{Plana} = \frac{4Eht^3}{K_1 \cdot D_o^2 \cdot (1 - \nu^2)} \quad (15)$$

As tensões não são uniformemente distribuídas na arruela Belleville, sendo concentradas nas extremidades dos diâmetros interno e externo, como mostrado na Figura 21. A máxima tensão ocorre no raio interno do lado convexo e é de compressão. As extremidades no lado côncavo possuem tensões de tração, sendo a tensão na extremidade externa geralmente maior que a tensão da extremidade interna.

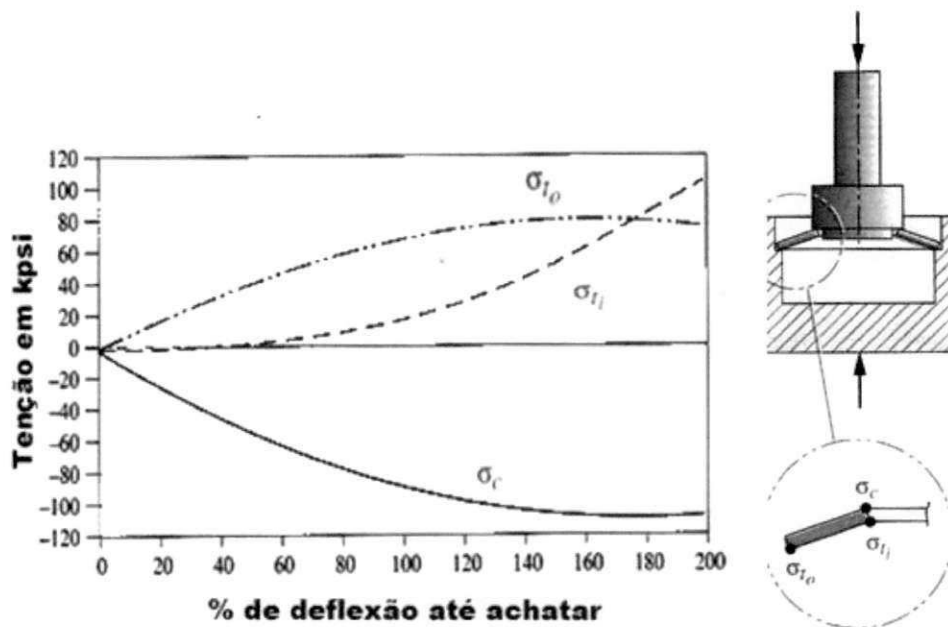


Figura 21 – Comportamento tensão - deflexão em uma arruela Belleville de aço, (Adaptado de NORTON, 2006).

As equações (16), (17) e (18) são utilizadas para os cálculos das tensões críticas definidas na Figura 21.

$$\sigma_c = \frac{4Ey}{K_1 \cdot D_o^2 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \left[(K_2) \cdot \left(h - \frac{y}{2} \right) + K_3 t \right] \quad (16)$$

$$\sigma_{ti} = \frac{4Ey}{K_1 \cdot D_0^2 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \left[(-K_2) \cdot \left(h - \frac{y}{2} \right) + K_3 t \right] \quad (17)$$

$$\sigma_{to} = \frac{4Ey}{K_1 \cdot D_0^2 \cdot (1-\nu^2)} \cdot \left[(K_4) \cdot \left(h - \frac{y}{2} \right) + K_5 t \right] \quad (18)$$

As constantes K_2 , K_3 , K_4 e K_5 , podem ser calculadas usando as Equações (19), (20), (21) e (22), respectivamente.

$$K_2 = \frac{6}{\pi \ln R_d} \left[\frac{(R_d - 1)}{\ln R_d} - 1 \right] \text{ e } R_d = \frac{D_0}{D_i} \quad (19)$$

$$K_3 = \frac{6}{\pi \ln R_d} \left[\frac{(R_d - 1)}{2} \right] \quad (20)$$

$$K_4 = \frac{R_d \ln R_d - (R_d - 1)}{\ln R_d} \left[\frac{R_d}{(R_d - 1)^2} \right] \quad (21)$$

$$K_5 = \frac{R_d}{2(R_d - 1)} \quad (22)$$

2.4 ATUADORES DO TIPO ARRUELAS DE LMF: ESTADO DA ARTE

Ao final do século XX, o desafio de desenvolver novas aplicações a partir de LMF fez com que o interesse de pesquisadores e engenheiros tenha sido despertado, objetivando a aplicação de atuadores de LMF tipo arruelas, principalmente para geração de forças em uniões aparafusadas.

Nesse sentido, pode-se classificar esses tipos de atuadores de duas formas: Atuadores Cilíndricos de LMF (AMF_{CIL}) e Atuadores Cônicos de LMF (AMF_{CON}).

2.4.1 Atuadores Cilíndricos (AMF_{CIL})

SODERBERG *et al* (1997) realizaram um estudo de AMF_{CIL} fabricados a partir de uma LMF 47Ni-44Ti-9Nb (% em peso) e submetidos a compressão. Foram avaliados os aspectos de desempenho para aplicação em uniões aparafusadas sob pré-cargas que geram determinadas deformações, investigando o efeito da compressão das arruelas que foram submetidas a diferentes temperaturas de homogeneização após fabricação. Os melhores resultados com os atuadores sob compressão foram obtidos após homogeneização a uma temperatura de 800°C. Segundo os autores o método provou ser bastante eficiente para a aplicação estudada em relação ao desempenho e custo. A desvantagem do método de compressão foi a elevada força necessária para produzir a predeformação de compressão desejada. A Figura 22 mostra o comportamento da força gerada em função do tempo durante um aquecimento realizado entre -60 °C a 70 °C.

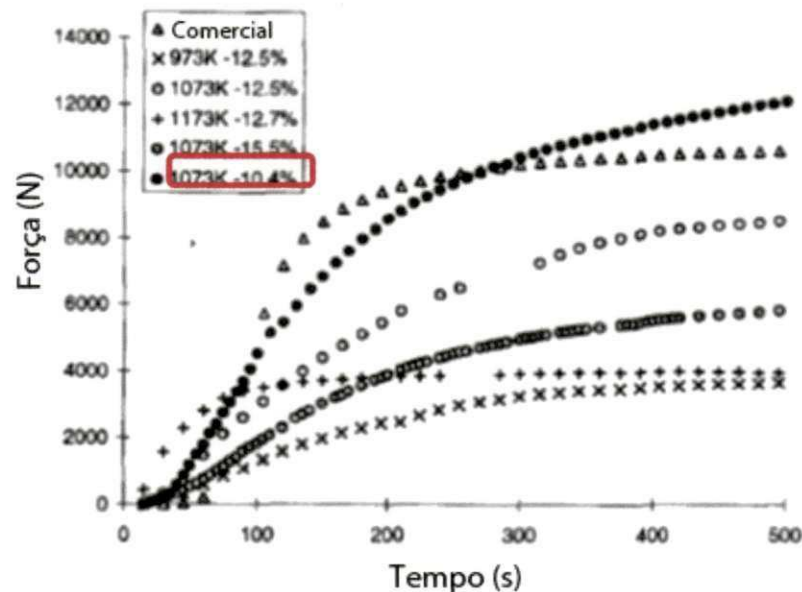


Figura 22 – Geração de força por um AMF_{CIL} Ni-Ti-Nb submetido a diferentes temperaturas de homogeneização e deformações (Adaptado de SODERBERG *et al*, 1997).

Em um trabalho puramente teórico, LA CAVA *et al* (2000) apresentaram um modelo e simulação numérica de um dispositivo de pré-carga com Memória de Forma para juntas flangeadas do tipo AMF_{CIL}. Os autores aplicaram o modelo de transformação martensítica desenvolvido por TANAKA,

et al (1982), que ficou conhecido como Modelo de TANAKA. Este dispositivo permite aplicar a pré-carga nos parafusos da junta de uma forma simples e precisa, além de evitar as tensões de cisalhamento introduzidas pelos processos de aperto tradicionais. As simulações numéricas permitiram descrever algumas das principais características do dispositivo, fornecendo informações úteis para o projeto de um atuador deste tipo.

Segundo PEAIRS *et al* (2004), uma das principais questões quando se trata de estruturas inteligentes com atuadores do tipo arruela de LMF, é a ativação dos mesmos. A massa relativamente grande e a baixa resistência elétrica devido à pequena altura do atuador fazem com que o aquecimento resistivo seja particularmente difícil. As modelagens e testes experimentais apresentados por esses autores demonstraram que um aquecedor externo pode ser usado para acionar um AMF_{CIL} com fonte de energia convencional. O método da impedância fornece uma conveniente alternativa ao aquecimento resistivo fazendo com que as arruelas de LMF sejam facilmente ativadas e auxiliando na prática a implementação do conceito de auto-reparação de juntas. O arranjo experimental utilizado para esse caso pode ser visualizado na Figura 23.

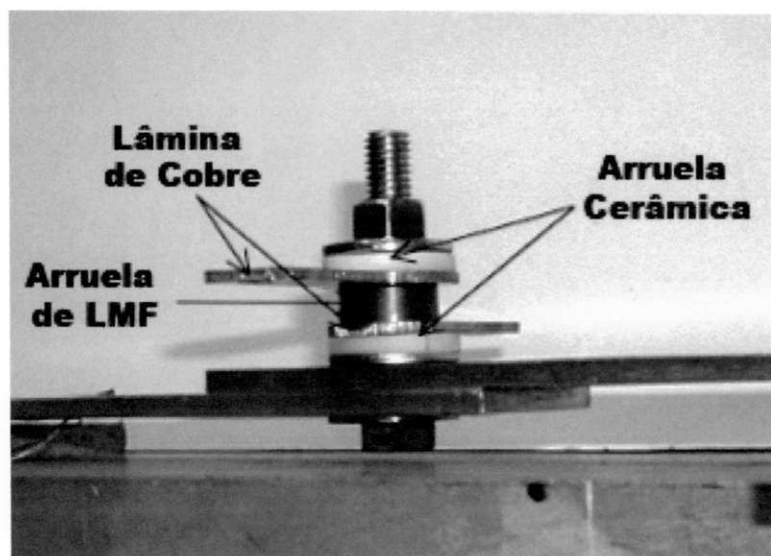


Figura 23 - Montagem experimental para ativação de uma arruela cilíndrica de LMF Ni-Ti usando aquecimento resistivo (Adaptado de PEAIRS, PARK e INMAN, 2004).

Os resultados obtidos a partir do método da impedância indicam que o AMF_{CIL} da Figura 23 foi ativada com sucesso. O experimento demonstrou que

a ativação do EMF através de aquecimento resistivo foi possível sem provocar nenhum perigo. Além disso, um limite superior de potência necessária foi encontrado para um determinado tamanho de atuador, o qual pode eventualmente ser redimensionado para outros tamanhos de atuadores. No entanto, os autores relatam que é desejável a utilização de outro método de aquecimento, porque os requisitos de energia para aquecimento resistivo direto do atuador LMF revelaram-se impraticáveis.

Em outro momento, HESSE *et al*, (2004) publicaram um estudo de um AMF_{CIL} de Ni-Ti sob tração e compressão e sua aplicação como atuador para geração de força de aperto em uniões aparafusadas, relatando a necessidade da realização de estudos dessas LMF submetidas principalmente à compressão, já que a maioria dos estudos encontrados na literatura concentra-se apenas na forma de atuadores sob tração. Uma fotografia da montagem do experimento realizado para os testes de compressão em uma máquina universal de ensaios é mostrada na Figura 24.

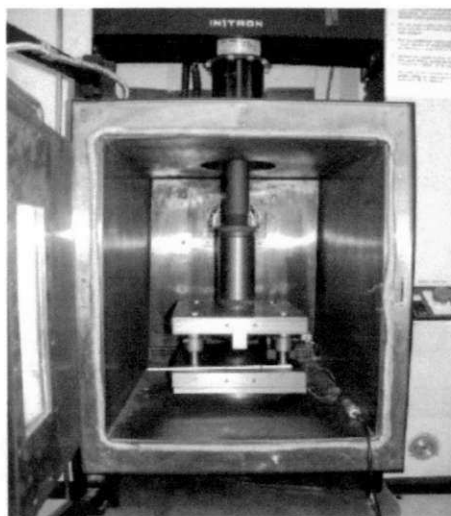


Figura 24 - Montagem em câmara de aquecimento de uma máquina universal de ensaios para testes de compressão em um AMF_{CIL} de Ni-Ti (HESSE *et al*, 2004).

A Figura 25 mostra o comportamento tensão – deformação da LMF Ni-Ti usada na fabricação do AMF_{CIL} antes e após tratamento térmico de recozimento em tração e compressão.

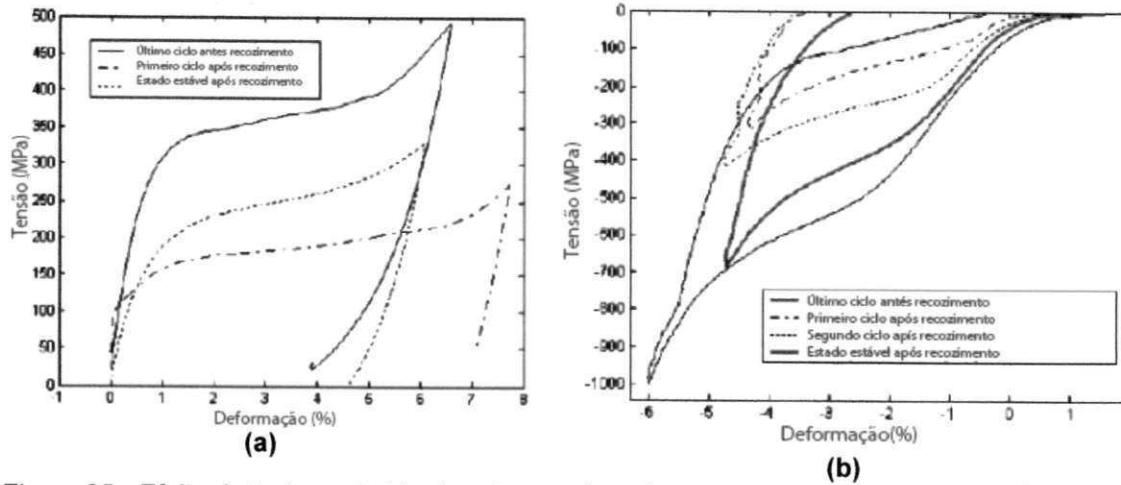


Figura 25 - Efeito do tratamento térmico de recozimento no comportamento tensão-deformação de uma LMF Ni-Ti usada na fabricação de um AMF_{CIL}. (a) Tração. (b) Compressão. (Adaptado de HESSE *et al*, 2004).

Em ambos os testes, de tração e compressão, os patamares de tensão de reorientação da estrutura martensítica, em valores absolutos, diminuem com o recozimento. Além disso, verifica-se que a resposta da LMF é claramente assimétrica quando se compara os comportamentos em tração e compressão.

O efeito da ciclagem na LMF também foi analisado, tanto para o caso da tração, como para compressão. As propriedades das LMF se alteram quando submetida a ciclos de carga e descarga repetidos, conforme mostrado na Figura 26. No caso do ensaio de compressão as tensões críticas foram aumentadas (Figura 26a), diferentemente do caso da resposta em tração que teve suas tensões críticas diminuídas. A Figura 26(b) mostra o comportamento da LMF Ni-Ti usada neste estudo após a estabilização cíclica.

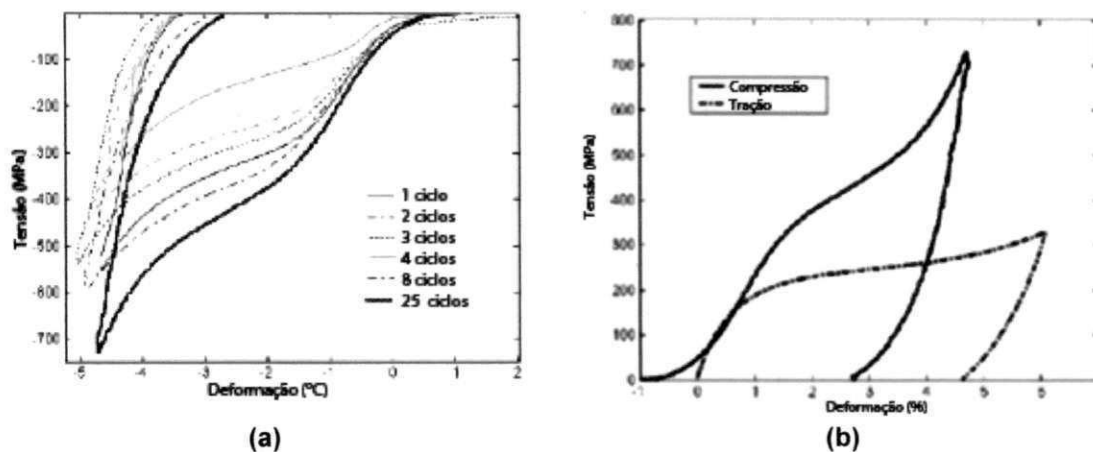


Figura 26 - Efeito da ciclagem no comportamento tensão-deformação de uma LMF Ni-Ti usada na fabricação de um AMF_{CIL}. (a) Resposta cíclica em compressão. (b) Resposta em tração e compressão após estabilização cíclica. (Adaptado de HESSE *et al*, 2004).

Entre as vantagens do método desenvolvido por HESSE *et al*, (2004), comparado com o de PEAIRS *et al* (2004), é que a medida da pré-carga não foi baseada no torque, e que o aquecimento do atuador não é realizado por efeito Joule (resistência elétrica), mas por uma câmara de aquecimento controlado. A montagem da união utilizada por esses autores é mostrada na fotografia da Figura 27.

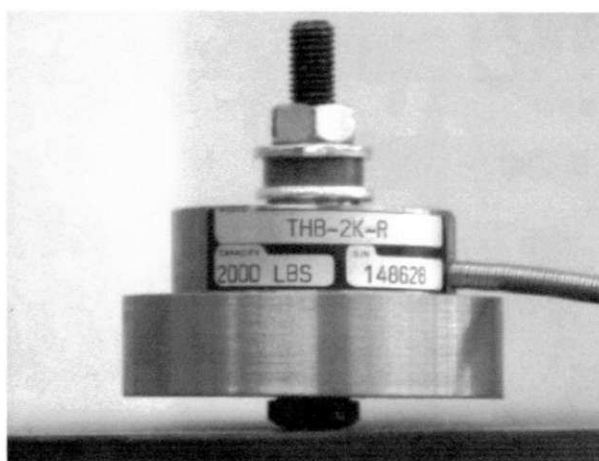


Figura 27 - Montagem de uma junta aparafusada com atuador AMF_{CIL} de Ni-Ti para ensaio de geração de força. (HESSE *et al*, 2004).

A Figura 28 mostra a evolução temporal da variação da força de aperto, resultado da atuação do AMF_{CIL} , para as várias pré-cargas aplicadas a união da Figura 27. É interessante notar que, em todos os casos, a célula de carga mostra primeiramente uma leitura do aumento de carga que é seguido por uma diminuição, mas não é afirmado se ocorre estabilização da força gerada após um tempo suficientemente longo. Os ensaios foram realizados numa faixa de temperatura compreendida entre 22 °C e 62 °C.

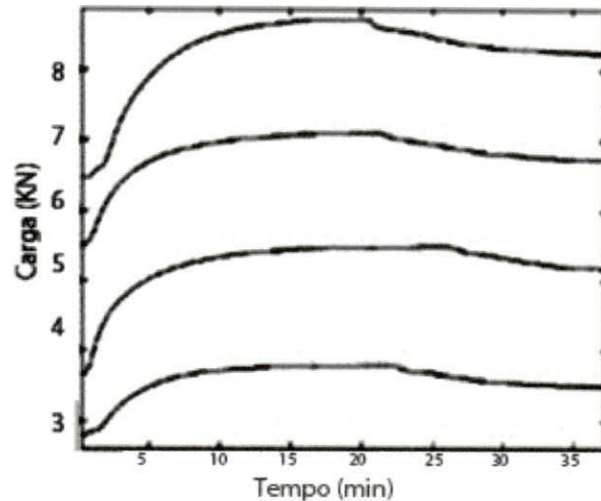


Figura 28 – Variação da força gerada após atuação do AMF_{CIL} de Ni-Ti sob diferentes pré-cargas de aperto. (Adaptado de HESSE *et al*, 2004).

ANTONIOS *et al* (2006) também estudaram o comportamento teórico-experimental de um AMF_{CIL} de Ni-Ti para geração de pré-cargas. A montagem utilizada por esses autores é mostrada na Figura 29. Percebe-se, pelas arruelas cerâmicas presentes na montagem, que o aquecimento deste atuador foi realizado através de uma resistência elétrica instalada ao redor do AMF_{CIL} de Ni-Ti.

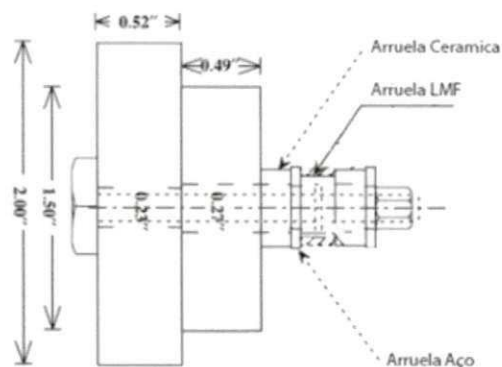
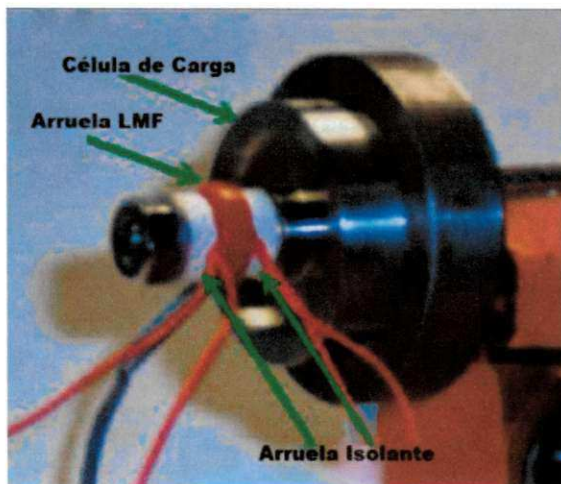


Figura 29 – Montagem utilizada para a ativação de um AMF_{CIL} de Ni-Ti (Adaptado de ANTONIOS *et al*, 2006).

Nesse trabalho são apresentados também resultados teóricos. Dois modelos de análise foram estabelecidos. Um é baseado no modelo de LIANG, o mesmo utilizado no trabalho de GHORASHI e INMAN (2004), e o outro

baseia-se na analogia entre as curvas de tensão cíclica apresentado por EDWARDS *et al* (1991) apud ANTONIOS (2006), definido pela Equação (23).

$$\varepsilon_{a, true} = \frac{\sigma_{a, TRUE}}{E} + \left(\frac{\sigma_{a, true}}{K'} \right)^{1/n'} \quad (23)$$

A Equação (23) é a relação analítica do comportamento cíclico da tensão-deformação em termos das deformações elásticas e residuais. Nessa equação $\varepsilon_{a,true}$ é a deformação verdadeira, $\sigma_{a,true}$ é a tensão verdadeira, E é o módulo de elasticidade, n' é o expoente de endurecimento cíclico e K' corresponde ao coeficiente cíclico de resistência.

A curva de temperatura e força gerada durante o ensaio de compressão com o AMF_{CIL} da Figura 28 apresenta comportamento semelhante a uma curva de tensão-deformação cíclica, sendo assim, as curvas de temperatura e de pré-carga são igualmente reconstruídas. A analogia é feita comparando a deformação e a tensão da Equação (23) com a temperatura e a pré-carga, originando a seguinte relação definida pela Equação (24):

$$T = \frac{PRE_CARGA}{Z} + \left(\frac{PRE_CARGA}{X} \right)^{1/Y} \quad (24)$$

Onde X, Y e Z são parâmetros de ajuste da curva.

Na Figura 30 é mostrado o comportamento da geração de força com a temperatura obtida com o arranjo da Figura 29. Nessa figura é possível identificar dois regimes de trabalho. No primeiro regime, correspondente a região I, caso o aquecimento da amostra seja cessado não haverá a geração de pré-carga. No segundo regime, mostrado na figura como região II, o aquecimento a partir de A_s , correspondente ao início da transformação da Martensita em Austenita, é irreversível. Isso significa que se a temperatura for cessada durante esse regime uma pré-carga será gerada e conservada.

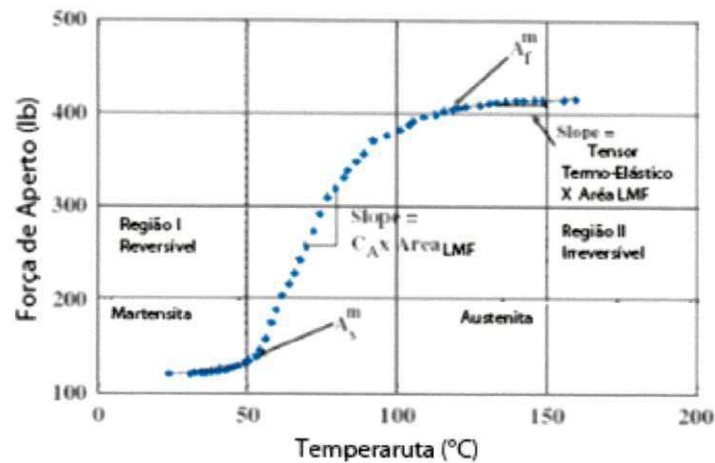


Figura 30 - Geração de força com a temperatura no arranjo da Figura 29 (Adaptado de ANTONIOS *et al*, 2006).

Foi avaliada também a influência de vários níveis de pré-carga antes da ativação do AMF_{CIL}. A Figura 31 mostra que para uma pré-carga entre 100 e 180 lb os resultados são satisfatórios, mas para valores acima dessa faixa acontece uma redução da força gerada.

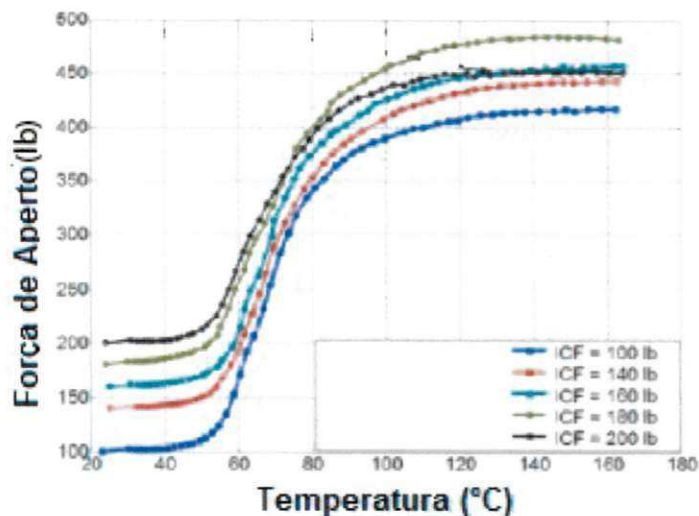


Figura 31 - Comparação da evolução das forças de aperto para diferentes valores de pré-carga (100,140, 160, 180 e 200 lb) (Adaptado de ANTONIOS *et al*, 2006).

Outro resultado desse trabalho que chama atenção é a constatação de que a força de aperto é um tanto maior quanto maior for a taxa de aquecimento, como mostrado na Figura 32.

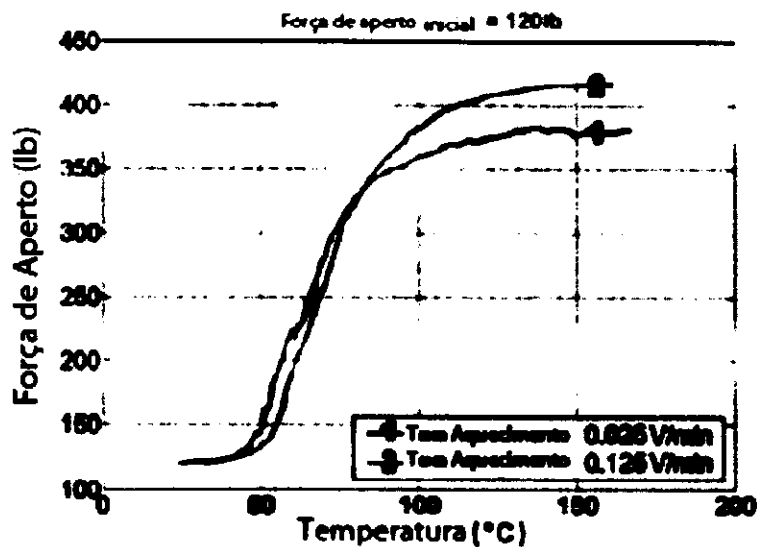


Figura 32 – Efeito da taxa de aquecimento no desempenho do AMF_{CIL} (Adaptado de ANTONIOS *et al*, 2006).

Recentemente, FARIA *et al* (2011), apresentaram um modelo termomecânico para prever a pré-carga obtida para um AMF_{CIL}, com base no calor aplicado e nas dimensões do atuador de LMF. Este modelo veio ampliar e melhorar o modelo anteriormente apresentado por GHORASHI e INMAN (2004), pois elimina o termo de pré-carga relacionado com a rotação da porca, tornando o sistema mais prático. A montagem utilizada nesse estudo pode ser visualizada na Figura 33.

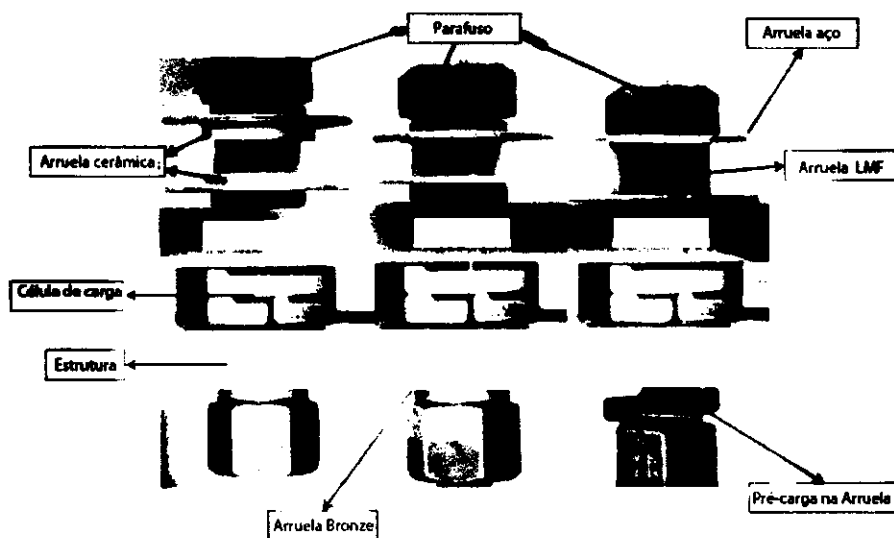


Figura 33 - Montagem experimental para testes de AMF_{CIL} de Ni-Ti (Adaptado de FARIA, *et al* 2011).

Nesse trabalho, a modelagem teórica foi usada para prever o valor da pré-carga final na junta após todo o processo de atuação e resfriamento da mesma. Na Figura 34 é mostrada uma curva experimental com os principais parâmetros identificados no ensaio, apresentando o comportamento completo da pré-carga em uma junta aparafusada inteligente.

Observando as diferentes regiões durante o processo de ativação, percebe-se que o AMF_{CIL} é aquecido até que temperatura de transformação seja atingida, proporcionando uma pré-carga não-linear. Após 60 segundos ocorre a expansão térmica linear reversível dos outros elementos comuns (arruela de aço, parafuso, porca) que dominam o incremento de pré-carga. Após o fim do aquecimento e consequente resfriamento da junta, observou-se uma relaxação da pré-carga gerada.

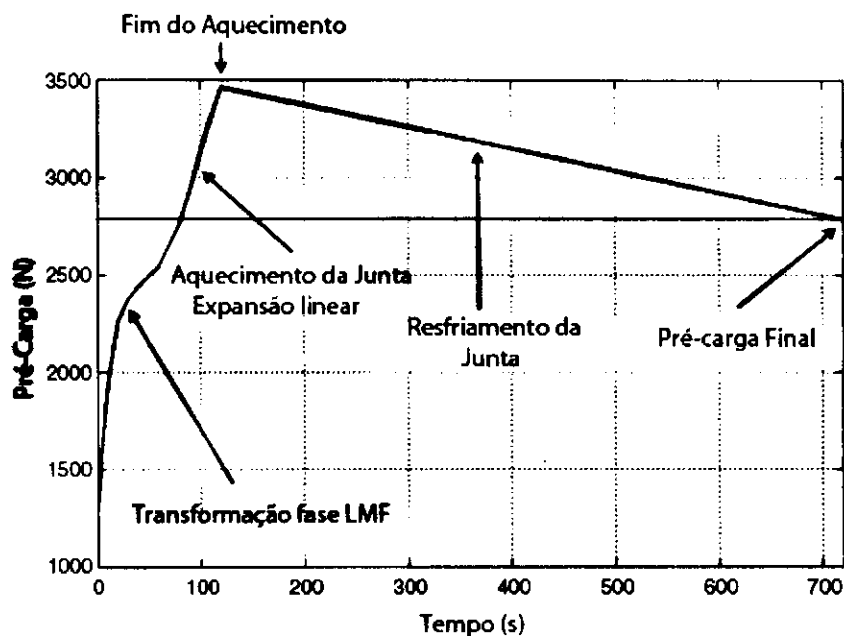


Figura 34 – Ensaio de geração de força com os principais parâmetros observados. Adaptado de (FARIA *et al*, 2011).

2.4.2 Atuadores Belleville (AMF_{CON})

Comparativamente aos atuadores com Memória de Forma Cilíndricos (AMF_{CIL}), existem poucos trabalhos de pesquisa envolvendo estudos destes atuadores com formato cônico, do tipo arruelas Belleville (AMF_{CON}), principalmente quando se trata de geração de força em função da temperatura.

LABRECQUE *et al* (1996) usaram da sensibilidade das LMF com a temperatura para proporcionar variação da curva de carga-deflexão usando um AMF_{CON}, descrevendo as propriedades e o comportamento de uma arruela Belleville de LMF Cu-Al-Ni-Mn-Ti em condições de teste diferentes. Esta liga é mais barata quando comparada com uma LMF Ni-Ti. Os autores apresentaram um comparativo teórico-experiencial do comportamento do dispositivo de LMF, onde a força teórica desenvolvida pela arruela Belleville, cujos parâmetros dimensionais são apresentados na Tabela 1, foi calculada a partir da relação clássica descrita pela Equação (13), com módulo elástico de 80 GPa. No entanto, os autores relatam que a partir de experiências próprias realizadas sobre o material, o módulo de elasticidade variou entre 14 e 33 GPa, dependendo do nível de deformação do material quando em uma condição superelástica. As temperaturas de transformação reversa informadas no trabalho foram $A_s=60^\circ\text{C}$ e $A_f= 80^\circ\text{C}$.

Tabela 1 – Dimensões do AMFCON de Cu-Al-Ni-Mn-Ti

Diâmetro externo (D_o)	24,00 mm
Diâmetro interno (D_i)	10,50 mm
Altura livre (h_0)	1,50 mm
Espessura (t)	3,00 mm

A Figura 35 apresenta os resultados dos testes de compressão em diferentes temperaturas, correspondentes a 60°C , 95°C e 120°C . Observa-se que a carga máxima para uma mesma deflexão aumenta com o aumento da temperatura. Outra característica importante dos resultados da Figura 35 é a diferença na forma das curvas força-deflexão de compressão. A parte superior de cada curva corresponde ao carregamento, enquanto a parte inferior é o caminho do descarregamento. Para temperaturas mais altas, superiores a A_f , que é 80°C , o AMF_{CON} é completamente Superelástico, o que significa que um alto nível de deformação elástica pode ser induzido no atuador.

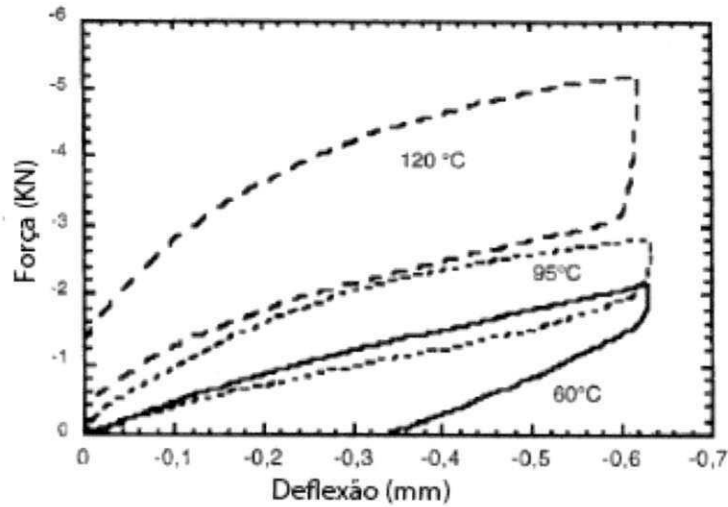


Figura 35 – Ensaio de compressão do AMF_{CON} de Cu-Al-Ni-Mn-Ti nas temperaturas 60°C, 95°C e 120°C (Adaptado de Labrecque *et al*, 1996).

A Figura 36 apresenta dados experimentais e teóricos de força-deflexão para esse AMF_{CON} em diferentes temperaturas.

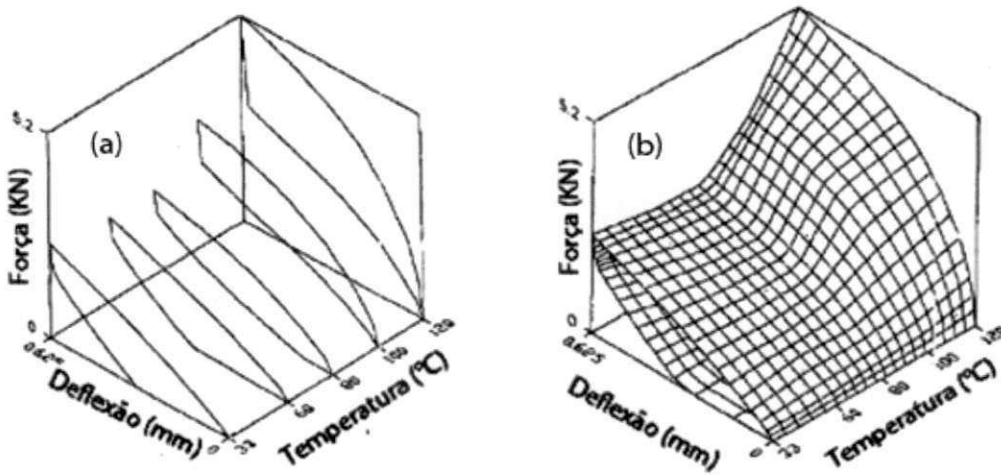


Figura 36 - Comportamento da arruela Belleville de Cu-Al-Ni-Mn-Ti em um diagrama tridimensional de força-deflexão-temperatura. (a) Curvas isotérmicas experimentais. (b) Curvas obtidas a partir da relação clássica (Adaptado de Labrecque *et al*, 1996).

A Figura 37 apresenta uma comparação entre uma curva de compressão calculada a partir da Equação (13) e uma curva experimental para o AMF_{CON} de Cu-Al-Ni-Mn-Ti a uma temperatura de 90 °C.

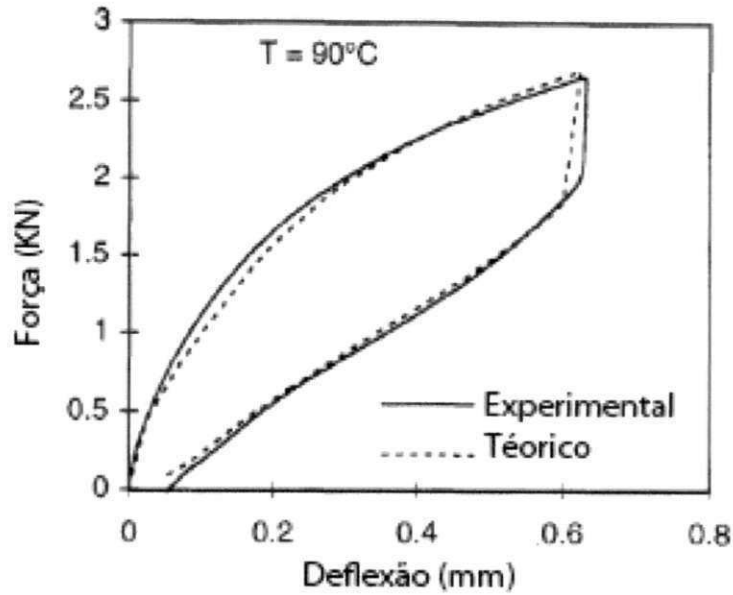


Figura 37 - Comparação do comportamento experimental e teórico para o AMF_{CON} de Cu-Al-Ni-Mn-Ti a uma temperatura de 90°C, no estado austenítico (Adaptado de Labrecque *et al*, 1996).

A Figura 38 mostra o comportamento teórico para o carregamento e geração de força do AMF_{CON} de LMF Cu-Al-Ni-Mn. O atuador, que está inicialmente a uma temperatura 32 °C, é então comprimido com uma carga de 2 kN. Em seguida com aquecimento até uma temperatura de 120 °C e posterior resfriamento até 35 °C, observa-se um pico de carga de aproximadamente 3,8 kN durante o aquecimento e uma carga residual de aproximadamente de 1 kN após resfriamento.

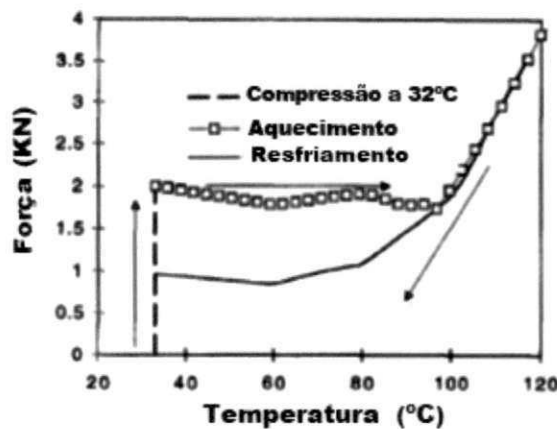


Figura 38 – Curva teórica do comportamento da arruela Belleville de LMF Cu-Al-Ni-Mn-Ti. (Adaptado de LABRECQUE *et al*, 1996).

SPEICHER *et al* (2009) desenvolveram dois dispositivos de LMF tração-compressão para aplicações como elementos de recentragem de

edifícios. Os dispositivos que foram desenvolvidos utilizaram molas helicoidais de LMF, e arruelas Belleville de LMF, conforme mostrado na Figura 39. Os testes apresentaram bons resultados iniciais.



Figura 39 - Dispositivos para recentragem de edifícios submetidos a abalos sísmicos. (a) Dispositivo com mola helicoidal de LMF. (b) Dispositivo com arruela Belleville de LMF. (Adaptado de SPEICHER *et al*, 2009).

As respostas das molas helicoidais de Ni-Ti se mostraram promissoras devido à boa Superelasticidade (como observado pela recentralização), amortecimento e repetibilidade. No entanto, os autores frisaram que mais pesquisas precisam ser realizadas nas molas helicoidais para determinar se a carga de escala e os níveis de rigidez podem ser alcançados.

O sistema com arruelas Belleville de Ni-Ti, também levaram a resultados que exigem mais pesquisas, pois existe a necessidade de se desenvolver arruelas com melhores características de força-deformação individuais. Estas melhorias devem incluir a criação de arruelas que não têm a tendência a inverter o sentido de deformação e também não tenha redução da capacidade de carga quando a deformação é aumentada. As dimensões dos AMF_{CON} Ni-Ti utilizadas neste sistema foram: diâmetro de 55 mm, espessura de 3,1 mm e uma altura livre de 6 mm. A Figura 40 mostra a montagem utilizada para o teste individual dos AMF_{CON} da Figura 39(b) e a curva característica obtida no ensaio de compressão no seu estado Superelástico.

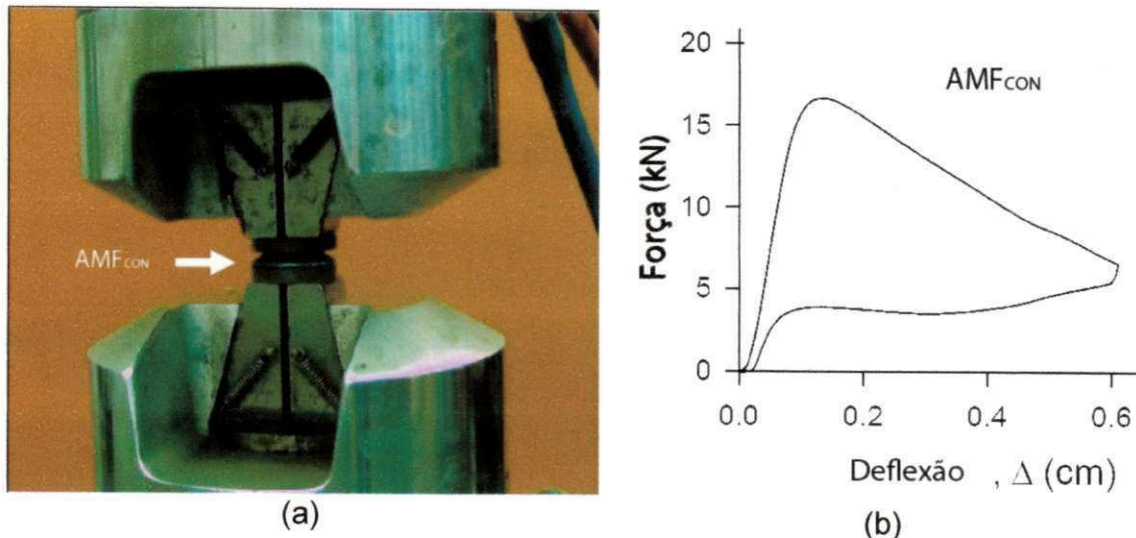


Figura 40 – Teste de compressão do AMF_{CON} da Figura 39(b). (a) Montagem nas garras da máquina de ensaio. (b) Resposta em compressão do AMF_{CON} de Ni-Ti no estado superelástico. (Adaptado de SPEICHER, 2010).

As curvas do ensaio cíclico do AMF_{CON} mostrado na Figura 40(a) são apresentadas na Figura 41.

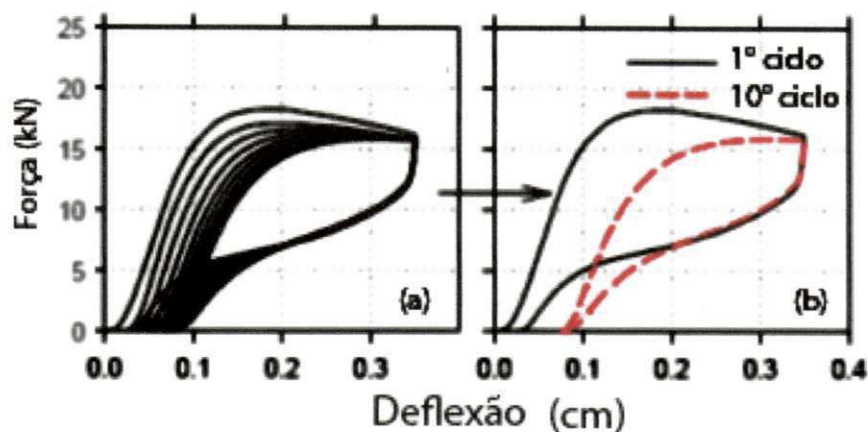


Figura 41 – Resposta de um AMF_{CON} submetido a ciclos de compressão. (a) Superposição de 10 ciclos. (b) Destaque do 1º (primeiro) e 10º(décimo) ciclos. (Adaptado de SPEICHER, 2010).

A partir da análise da Figura 41, percebe-se que após o 10º(décimo) ciclo o comportamento Superelástico do atuador foi estabilizado para um carregamento máximo pouco superior a 15 kN, destacando-se a redução do laço de histerese entre o 1º (primeiro) e 10º(décimo) ciclo, conforme visualizado na Figura 40(b).

3.0 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa de caráter experimental foi realizada no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Mecânica (UAEM) do CCT/UFCG. O trabalho consistiu no projeto, fabricação e caracterização termomecânica de atuadores Belleville de Ligas com Memória de Forma (AMF_{CON}) do sistema Ni-Ti para geração de força em uniões aparafusadas em função da temperatura.

A metodologia utilizada está resumida no fluxograma mostrado na Figura 42, o qual indica a sequência das etapas realizadas durante a execução da pesquisa.

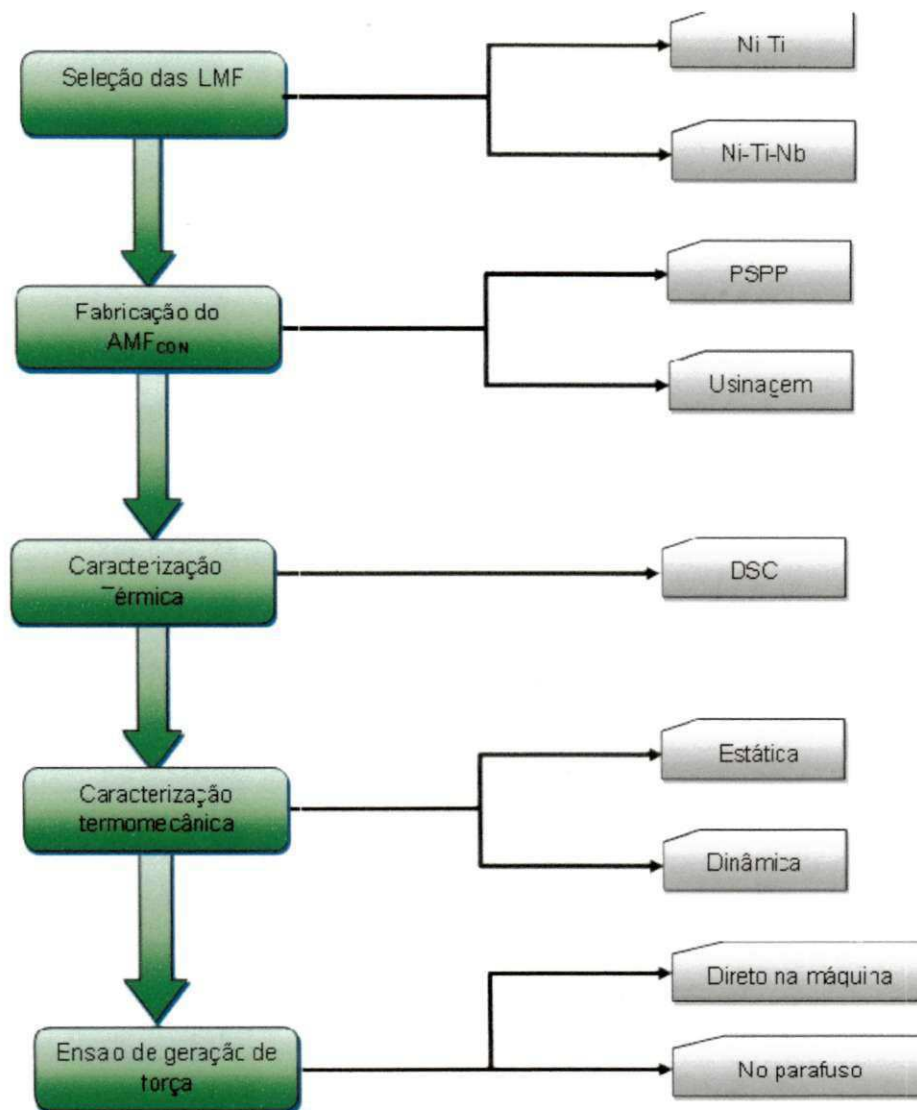


Figura 42 – Fluxograma da metodologia empregada durante a realização do trabalho.

No fluxograma da Figura 42, para o ensaio de geração de força direto na máquina, o atuador é deformado e posteriormente submetido a tendência de recuperação de forma quando aquecido. Essa tendência, sendo bloqueada, gera diretamente na máquina de ensaio universal uma força de forma direta. Já no caso do ensaio de geração de força no parafuso, usa-se a máquina de ensaio para promover a deformação no atuador resfriado em nitrogênio líquido, o qual é posteriormente transportado para uma montagem com um parafuso. A recuperação de forma através do aquecimento até a temperatura ambiente gera uma força medida de forma indireta usando um sensor de deslocamento para medir a elongação do parafuso.

3.1 SELEÇÃO DAS LMF

Para o projeto e fabricação dos AMF_{CON} , foram selecionadas duas Ligas com Memória de Forma de composições químicas distintas, ambas do sistema Ni-Ti. O principal critério de seleção foi a obtenção de uma temperatura de final de ativação (A_f) próxima da temperatura ambiente ($\sim 27^\circ C$). Assim, foi escolhida uma LMF Ni-Ti mais rica em Ni, de composição 55,3Ni-44,7Ti (% em peso) e uma segunda LMF de Ni-Ti com adição de Nb e composição nominal de 48Ni-38Ti-14Nb (% em peso) que, segundo ZHAO *et al* (2006), apresenta maior histerese térmica em comparação com aquelas binárias de Ni-Ti. Ambas as LMF apresentam a característica de terem propriedades Superelásticas à temperatura ambiente.

As LMF com essas características proporcionam atuadores bifuncionais. Esses atuadores devem ser capazes de gerar forças se deformados a baixa temperatura e ligeiramente aquecidos com restrição à recuperação de uma deformação imposta e, alternativamente, podem ainda apresentar Superelasticidade quando carregados mecanicamente em temperaturas ligeiramente superiores a do ambiente.

3.2 DESENVOLVIMENTO DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DOS AMF_{CON}

3.2.1 Fabricação das LMF Ni-Ti

Os elementos químicos comercialmente puros (Ni, Ti e Nb) foram fundidos em uma máquina que utiliza o processo de fusão a plasma seguida de injeção do metal líquido em molde metálico. A sequência de fusão e conformação é apresentada de forma simplificada na Figura 43.

A fusão foi realizada com os elementos empilhados em um cadinho de cobre e sob um eletrodo de tungstênio, através do processo de conformação acima mencionado, também denominado de *Plasma Skull Push-Pull* (PSPP). Nesse processo, o metal é fundido sobre uma fina camada dele mesmo, em atmosfera protetora de argônio, e depois injetado em um molde metálico, levando a obtenção da forma desejada.

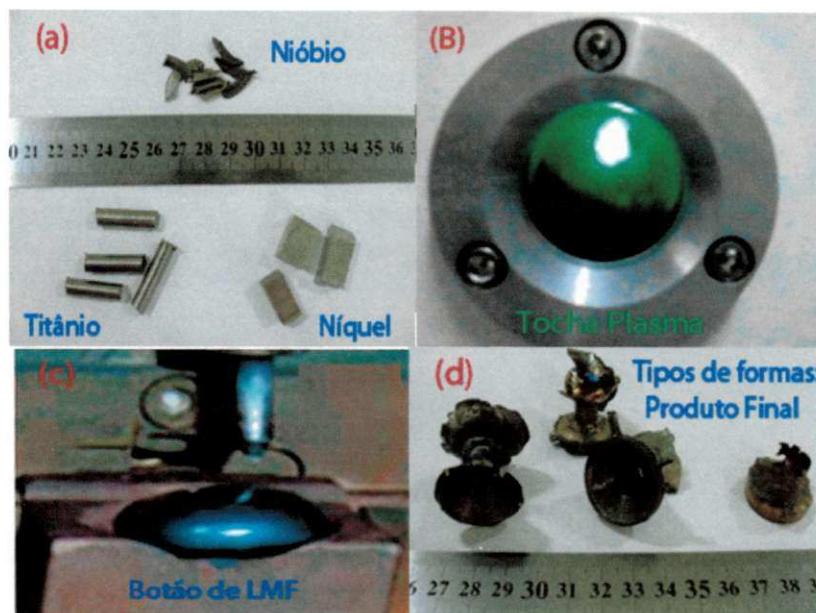


Figura 43 - Sequência de fabricação da LMF Ni-Ti-Nb pela técnica PSPP. (a) Níquel, titânio e nióbio puros. (b) Tocha rotativa de plasma. (c) Botão de Ni-Ti-Nb homogeneizado. (d) Formas obtidas após injeção em molde metálico (não mostrado).

3.2.2 Fabricação do AMF_{CON} via Processo PSPP adaptado

Para obter a forma cônica de arruela Belleville desejada para o AMF_{CON} foi preciso realizar adaptações ao processo PPSP original. Assim, utilizou-se um molde auxiliar em alumínio (M_A), mostrado na Figura 44, para receber um segundo molde metálico bipartido em aço (M_{BEL}), conforme mostra a Figura 45, responsável por dar forma ao AMF_{CON}. Esse molde bipartido responsável por

foi projetado usando a ferramenta computacional CAD Autodesk Inventor Student.



Figura 44 – Molde auxiliar (M_A) utilizado para adaptação do processo PSPP.

O projeto do molde M_{BEL} para a fabricação do AMF_{CON} , ilustrado na Figura 45, foi desenvolvido tendo como objetivo economia de material e também redução de etapas de usinagem no produto final. Portanto, planejou-se obter este dispositivo atuador em uma única etapa de fusão e conformação, com suas dimensões o mais próximas possível da forma final especificada.

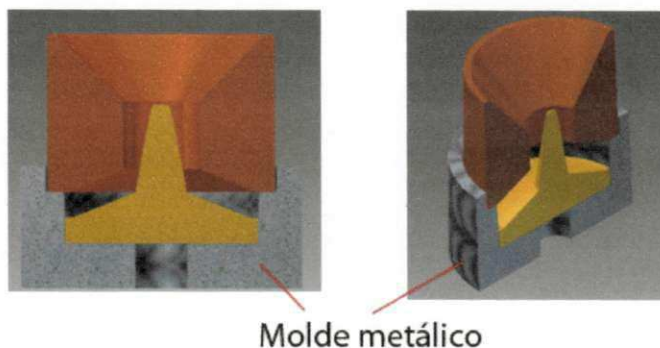


Figura 45 - Vista em corte do molde M_{BEL} concebido no programa Autodesk Inventor, para fabricação do AMF_{CON} .

No projeto do molde buscaram-se dimensões padronizadas para os AMF_{CON} . Isso foi realizado com base no comportamento força - deflexão apresentado na Figura 18. Nessa figura são mostradas as curvas de resposta da carga aplicada em função da deflexão de achatamento para diversas razões h/t para arruelas Belleville.

Para a fabricação do referido atuador, escolheu-se uma razão h/t de aproximadamente 1,20, que pode ser útil em aplicações que necessitem de grandes forças com pequenas deflexões (NORTON, 2006).

As dimensões adotadas para o AMF_{CON} de acordo com os principais parâmetros de uma arruela Belleville, apresentados na Figura 20, são resumidos na Tabela 2.

Tabela 2 – Dimensões para os AMF_{CON} de LMF Ni-Ti deste trabalho.

Diâmetro externo (D_o)	$21,00 \pm 0,50$ (mm)
Diâmetro interno (D_i)	$10,00 \pm 0,25$ (mm)
Altura livre (h)	$2,00 \pm 0,20$ (mm)
Espessura (t)	$2,00 \pm 0,20$ (mm)

Uma vez definidas as dimensões do AMF_{CON} , partiu-se para a fabricação do molde ilustrado na Figura 45, que foi confeccionado por um processo de usinagem convencional. O material escolhido para a fabricação do mesmo foi o aço inoxidável por ter uma alta condutividade térmica quando comparado com os aços comuns.

O arranjo das partes componentes mostradas na Figura 45 é tal que quando ocorre o acoplamento das mesmas origina-se uma cavidade cônica que é preenchida pela LMF em estado líquido. O molde obtido após a usinagem das partes é apresentado na Figura 46.



Figura 46 – Molde em aço inox (M_{BEL}) para obtenção do AMF_{CON} .

No processo de fabricação o molde M_{BEL} é instalado no interior do molde auxiliar da Figura 44. Antes do procedimento de fusão das LMF Ni-Ti

para posterior injeção, o M_A foi pré-aquecido a uma temperatura de 300°C e o M_{BEL} a 850°C , contribuindo assim para a redução dos gradientes de temperatura entre o metal líquido e o molde, melhorando o acabamento do produto e favorecendo um melhor preenchimento da forma do AMF_{CON} .

Assim, após o processo de desmoldagem, origina-se o atuador em forma preliminar, necessitando apenas de um acabamento para remoção das rebarbas oriundas do processo de fusão e conformação. A Figura 47 mostra as etapas do processo desde a desmoldagem até o acabamento que origina o AMF_{CON} em seu formato final, com as dimensões da Tabela 2.

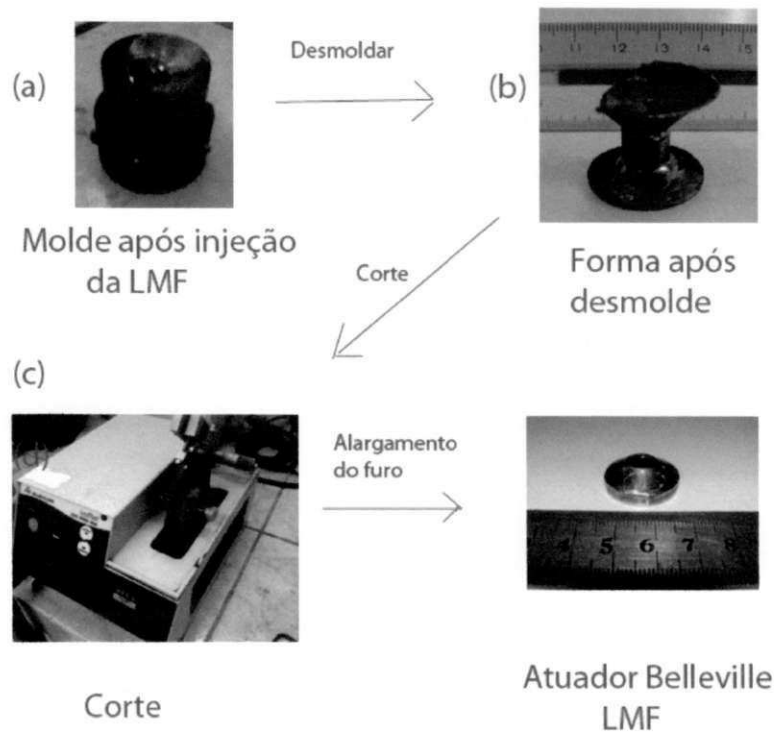


Figura 47 - Esquema fotográfico do processo de desmoldagem e acabamento do AMF_{CON} .

3.2.3 Fabricação do AMF_{CON} via usinagem convencional

Devido às dificuldades inerentes da obtenção do AMF_{CON} pelo processo PSPP de forma direta e da falta de literatura para comparação dos resultados obtidos com esse tipo de atuador, optou-se por fabricá-los também a usando um processo de usinagem convencional, mesmo sabendo que estes materiais são de difícil usinagem e os estudos referentes a este processo de fabricação para as LMF ainda ser pouco explorado.

Assim, inicialmente foi fabricado, pelo processo PSPP, um tarugo de LMF com as dimensões de 22 mm de diâmetro e altura de 20 mm. Esse tarugo, obtido também pelo processo de fusão e injeção direta, e posteriormente usinado, originou o AMF_{CON} com as mesmas dimensões apresentadas na Tabela 2. Na Figura 48 é mostrado o AMF_{CON} que foi fabricado em Ni-Ti e Ni-Ti-Nb, via usinagem convencional.



Figura 48 - AMF_{CON} obtido a partir do processo de usinagem convencional.

Todos os atuadores obtidos pelo processo de usinagem convencional, assim como os obtidos pelo processo direto PSPP, foram submetidos aos mesmos ensaios termomecânicos.

3.2.4 Tratamento térmico dos AMF_{CON}

Todos os AMF_{CON} foram submetidos a um tratamento térmico de homogeneização a uma temperatura de 850°C durante 30 minutos, com subsequente resfriamento em água a temperatura ambiente (~27°C).

No caso dos AMF_{CON} de Ni-Ti-Nb, este tratamento faz aparecer a transformação de fase responsável pelo Efeito Memória de Forma. Já nos AMF_{CON} de Ni-Ti, espera-se que após o tratamento térmico ocorra uma ligeira diminuição das temperaturas de transformação da liga, deixando sua temperatura A_f próxima da temperatura ambiente.

3.3 CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA

A caracterização térmica dos AMF_{CON} foi realizada usando a técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), utilizando-se do calorímetro modelo

Q20 da TA Instruments. Com o intuito de determinar as temperaturas de transformação dos AMF_{CON} e ainda avaliar os efeitos do tratamento térmico, foram realizados ciclos térmicos para todos os atuadores, antes e após tratamento térmico. Os ensaios foram feitos na faixa de temperatura de $70^{\circ}C$ à $-70^{\circ}C$, com uma taxa de aquecimento e resfriamento de $5^{\circ}C/min$.

3.4 CARACTERIZAÇÃO TERMOMECÂNICA PRELIMINAR

3.4.1 Estabilização cíclica dos AMF_{CON}

Antes da realização dos testes de geração de força, rigidez em função da temperatura e Superelasticidade, os atuadores foram submetidos inicialmente a uma estabilização do comportamento Superelástico. Essa estabilização consiste na realização de 50 ciclos de carregamento e descarregamento a uma frequência de 0,1Hz na temperatura ambiente ($\sim 27^{\circ}C$). Ressalta-se que nesta temperatura a estrutura dos atuadores é totalmente austenítica. Esta estabilização foi realizada usando a máquina de ensaios dinâmicos Electropulse E10000, marca INSTRON, mostrada na Figura 49. Essa máquina possui uma célula de carga com capacidade de 10 kN e resolução de 0,10 N.

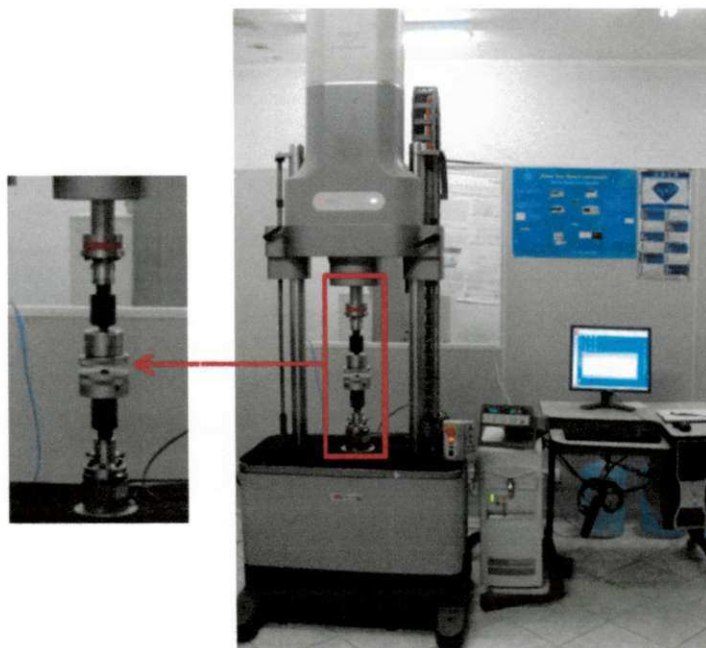


Figura 49 – Máquina eletrodinâmica de ensaios INSTRON, Electropulse E10000.

Para cada AMF_{CON} testado, primeiramente foi imposta uma pré-carga de 300N, com o objetivo de eliminar as folgas devido à diferença de rugosidade entre as superfícies. Em seguida, o atuador foi comprimido até 2% de sua altura livre a uma taxa de 0,1 mm/min e, então, comprimido até o seu limite superior de deformação, de aproximadamente 14% (que foi determinado pelo limite da célula de carga da máquina E10000). Uma vez atingindo o limite superior de deformação, se faz o descarregamento até o limite inferior de aproximadamente 2% para os AMF_{CON} injetados e 4% para os usinados.

Após o termino desse processo de estabilização cíclica, cada AMF_{CON} foi aquecido a uma temperatura um pouco superior a A_f , visando recuperar alguma deformação residual existente.

3.4.2 Ensaios de rigidez em função da temperatura

Para os ensaios de rigidez em função da temperatura em cada AMF_{CON} , foi utilizada a máquina universal de ensaios eletromecânica, INSTRON 5582, equipada com uma câmara de aquecimento controlado, conforme mostrado na Figura 50.



Figura 50 – Máquina de ensaios INSTRON 5582, equipada com câmara de aquecimento controlado.

Para cada ensaio um microtermopar tipo K é instalado no atuador e outro na garra de compressão da máquina, com o objetivo de aferir a temperatura do AMF_{CON} com aquela da câmara de aquecimento. Durante os testes foi verificada uma variação entre a temperatura da garra e do atuador de aproximadamente 1°C. Após a estabilização na temperatura desejada para o ensaio, cada atuador foi submetido ao mesmo método usado nos testes de estabilização, isto é, a uma pré-carga de 300N seguida de deformação até 14% em relação a sua altura livre, a uma taxa de 5 %/min, e descarregamento até 2% com a mesma taxa. Esse ciclo é repetido por 5 vezes.

Os testes foram realizados para as seguintes temperaturas: 25°C, 35°C, 45°C e 55°C.

3.5 ENSAIOS DE GERAÇÃO DE FORÇA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

3.5.1 Geração de força direta na máquina de ensaios

Os AMF_{CON} confeccionados a partir das adaptações do processo PSPP e por usinagem convencional foram analisados através de testes de geração de força em função da temperatura. Para esse tipo de teste utilizou-se a mesma máquina de ensaios universal mostrada na Figura 50.

No teste de geração de força é necessário primeiramente deformar o atuador em compressão, a temperaturas muito inferiores a 273K (0 °C), isto é, o AMF_{CON} precisa ser resfriado para temperaturas em que se encontre no estado martensítico, e assim poder ser submetido a deformações residuais termicamente reversíveis. Este procedimento é indispensável para obter a posterior tendência de expansão do atuador através do EMFS durante o aquecimento.

Para possibilitar esse ensaio, foi utilizado um recipiente para receber nitrogênio líquido (N₂) usado para o resfriamento do atuador para o estado martensítico antes de impor o carregamento de compressão. Um microtermopar tipo K foi instalado no atuador em teste, para o acompanhamento de sua temperatura durante o resfriamento e o aquecimento.

As etapas do ensaio de geração de força podem ser resumidas no desenho esquemático da Figura 51.

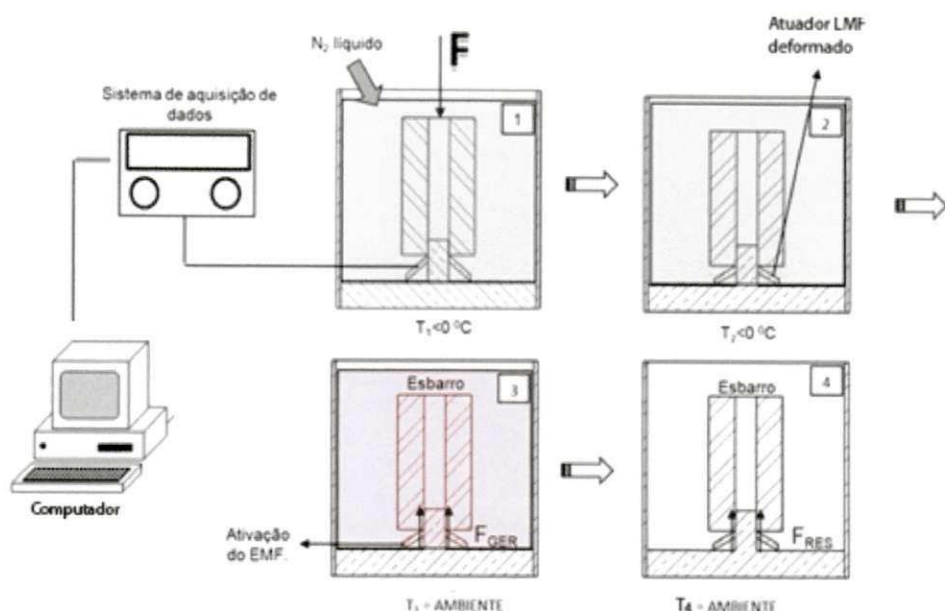


Figura 51 - Diagrama esquemático do experimento para geração de força nos AMF_{CON}.

Como se pode verificar, no esquema 1, tem-se que o microtermopar soldado no atuador é conectado a um sistema de aquisição de dados, que faz a leitura dos valores correspondentes a temperatura durante o ensaio. Então, deposita-se N₂ no recipiente, para que o AMF_{CON} atinja temperaturas inferiores a M_f . O atuador é assim submetido ao carregamento mecânico de compressão, e quando é atingida a deformação desejada cessa-se a alimentação do recipiente por N₂ (esquema 2), mantendo a deformação até que o aquecimento natural para a temperatura ambiente esteja estabelecido. No esquema 3 é representada a ativação da tendência de Efeito Memória de Forma até a temperatura do AMF_{CON} atingir a temperatura ambiente. Nesse intervalo de temperatura, o AMF_{CON} começa a gerar força pela tendência de expansão por Efeito Memória de Forma. A partir daí se mede continuamente a geração de força total (F_{TOT}), e após 60 minutos, a força residual (F_{AT}) é obtida.

Todos os testes foram realizados para deformações correspondentes a 10%, 15% e 20% da altura livre do atuador. Limitou-se a deformação máxima em 20% da altura livre para preservar os atuadores quanto a possíveis falhas prematuras devido a presença de possíveis defeitos oriundos do processo de fabricação.

3.5.2 Geração de força em parafuso de aço carbono

Nessa etapa deseja-se obter a deformação que o AMF_{CON} confere a um parafuso de aço carbono comum durante a ativação do EMFS. Para isso, foi realizada a montagem ilustrada na Figura 52.

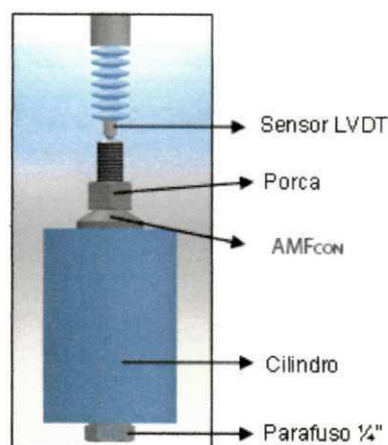


Figura 52 - Montagem para medição da deformação induzida em um parafuso pelo AMF_{CON} .

Como se pode observar no esquema da Figura 52, foi utilizado um cilindro de aço para servir como dispositivo de compressão para a deformação, de modo que a carga gerada pelo AMF_{CON} seja transferida integralmente para o parafuso. Segundo Shigley (2006) este cilindro de aço deve ter seu diâmetro externo maior do que quatro vezes o diâmetro do parafuso, para assegurar uma configuração suficientemente rígida, garantindo a não interferência de uma possível deformação do cilindro na montagem.

O procedimento experimental adotado para o ensaio está esquematizado na Figura 53. Nesse experimento, o conjunto foi montado utilizando-se um parafuso de diâmetro 1/4" (6,35 mm) e comprimento 2" (52,60 mm), um cilindro de aço inoxidável de diâmetro 30 mm, o AMF_{CON} a ser testado, uma porca, um sensor de deslocamento LVDT, um microtermopar tipo K e um sistema de aquisição de dados.

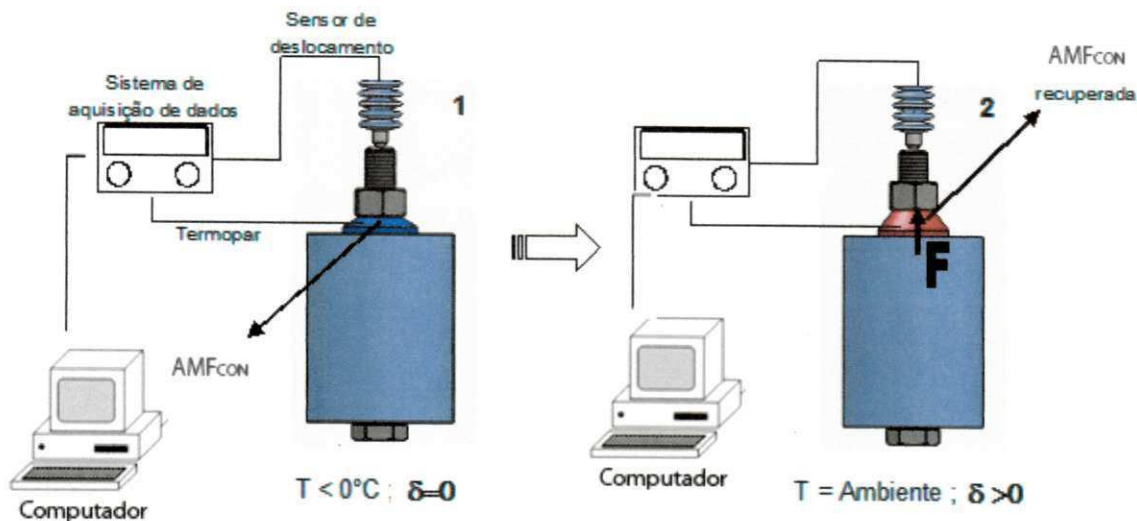


Figura 53 - Esquema experimental para monitoramento da deformação no parafuso induzida pelo AMF_{CON} .

Primeiramente, utilizou-se o arranjo da Figura 51 para promover uma deformação no AMF_{CON} . Assim, utilizando a máquina INSTRON 5582, o atuador a ser testado é submetido a uma deformação de 20% em relação à sua altura livre. Uma vez deformado em N_2 , o atuador é levado para a montagem com o parafuso e os demais componentes da Figura 52. O AMF_{CON} é instalado entre o cilindro e a porca aplicando-se um torque de 20 N.m para eliminar eventuais folgas e garantir que toda a deformação gerada no parafuso seja propiciada pela tendência de recuperação de forma do atuador.

O AMF_{CON} deformado está mostrado em azul no esquema 1 da Figura 53. Após a montagem, instala-se o sensor de deslocamento LVDT na ponta do parafuso, de modo a medir o seu alongamento em função do tempo. A partir daí, espera-se que o atuador atinja, naturalmente, a temperatura ambiente. Durante esse processo, ocorre a geração de força no parafuso ocasionado pela recuperação de forma do AMF_{CON} , devido à restrição do EMFS. O AMF_{CON} "recuperado" é mostrado em vermelho na Figura 53.

A força gerada pelo AMF_{CON} sobre o parafuso é calculada usando a Equação (25):

$$\delta = \frac{P.L}{A_{ST}.E} \quad (25)$$

Onde: δ é o alongamento sofrido pelo parafuso e medido pelo LVDT, P é a carga gerada sobre o parafuso pelo atuador, L é o comprimento útil do parafuso, A_{ST} é a área da seção transversal do parafuso e E é o módulo de elasticidade do material do parafuso.

3.6 RESPOSTA SUPERELÁSTICA DOS AMF_{CON}

Para avaliar a resposta Superelástica dos AMF_{CON} foram realizados, na máquina de ensaios INSTRON 5582 mostrada na Figura 50 testes nos quais os atuadores foram submetidos a carregamento e descarregamento compressivo até uma deformação máxima de 40%, a uma taxa de 5%/min. Os testes foram realizados nas temperaturas de 25 °C, 35° C e 45 °C.

Para avaliar esse comportamento Superelástico de forma preliminar, foi realizada uma comparação entre a resposta experimental durante o carregamento e a curva teórica para arruelas Belleville obtida a partir da Equação (13). Para aplicação dessa formulação, o módulo de elasticidade (E) foi obtido experimentalmente a partir de ensaios das LMF pela técnica de análise dinâmico-mecânica (DMA) usando um analisador comercial da TA Instruments, modelo DMA Q800 (SILVA, 2009).

4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ATUADORES CÔNICOS DE LMF NI-TI E NI-TI-NB

Na Figura 54 são apresentadas fotografias dos AMF_{CON} de Ni-Ti-Nb e Ni-Ti fabricados pelos processos de PSPP adaptado (injetados) e de usinagem.

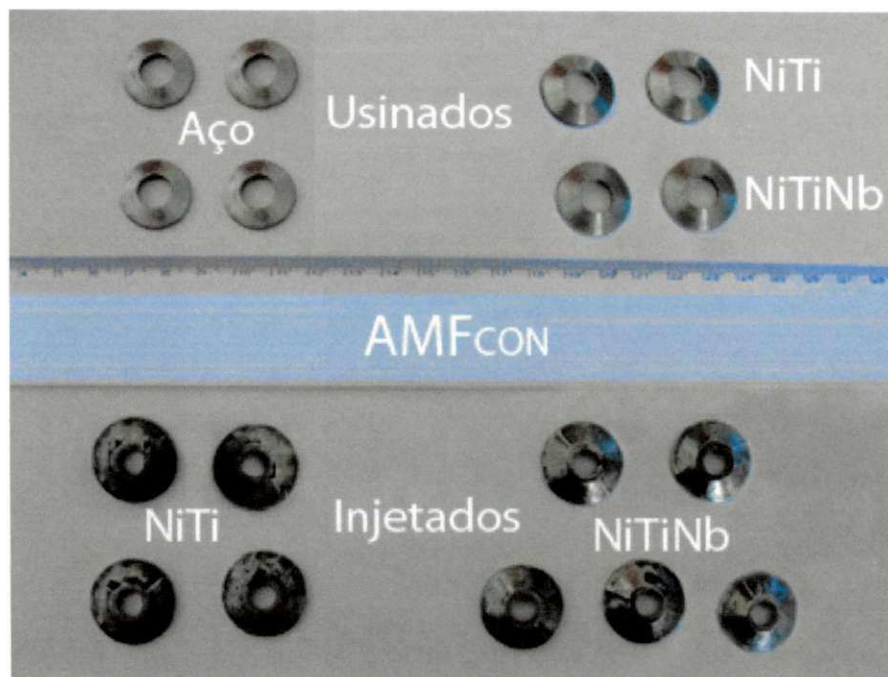


Figura 54 – Aspectos gerais dos AMF_{CON} diretamente injetados via PSPP, usinados e de aço.

Observou-se na Figura 54 que os AMF_{CON} injetados apresentaram algumas imperfeições superficiais inerentes ao processo de fusão e conformação, mas que não comprometem o funcionamento do atuador. Já os AMF_{CON} usinados a partir de cilindros das LMF injetadas, se mostraram com bom acabamento superficial. As arruelas cônicas de aço produzidas tiveram um papel importante na comparação dos resultados obtidos, pois se pode avaliar a influência da dilatação térmica do conjunto durante os testes de geração de força em função da temperatura.

4.2 TEMPERATURAS DE TRANSFORMAÇÃO E HISTERESE TÉRMICA

A Figura 55 apresenta termogramas DSC obtidos para os AMF_{CON} injetados e usinados, antes e após tratamento térmico de homogeneização (850 °C por 30 minutos). A partir do método das tangentes aplicados aos picos de transformação (Figura 6), definido pelas normas internacionais ASTM F2004, F2005 (ASTM, 2005) e F2082 (ASTM, 2006), foram obtidos os resultados das temperaturas de transformação dos atuadores.

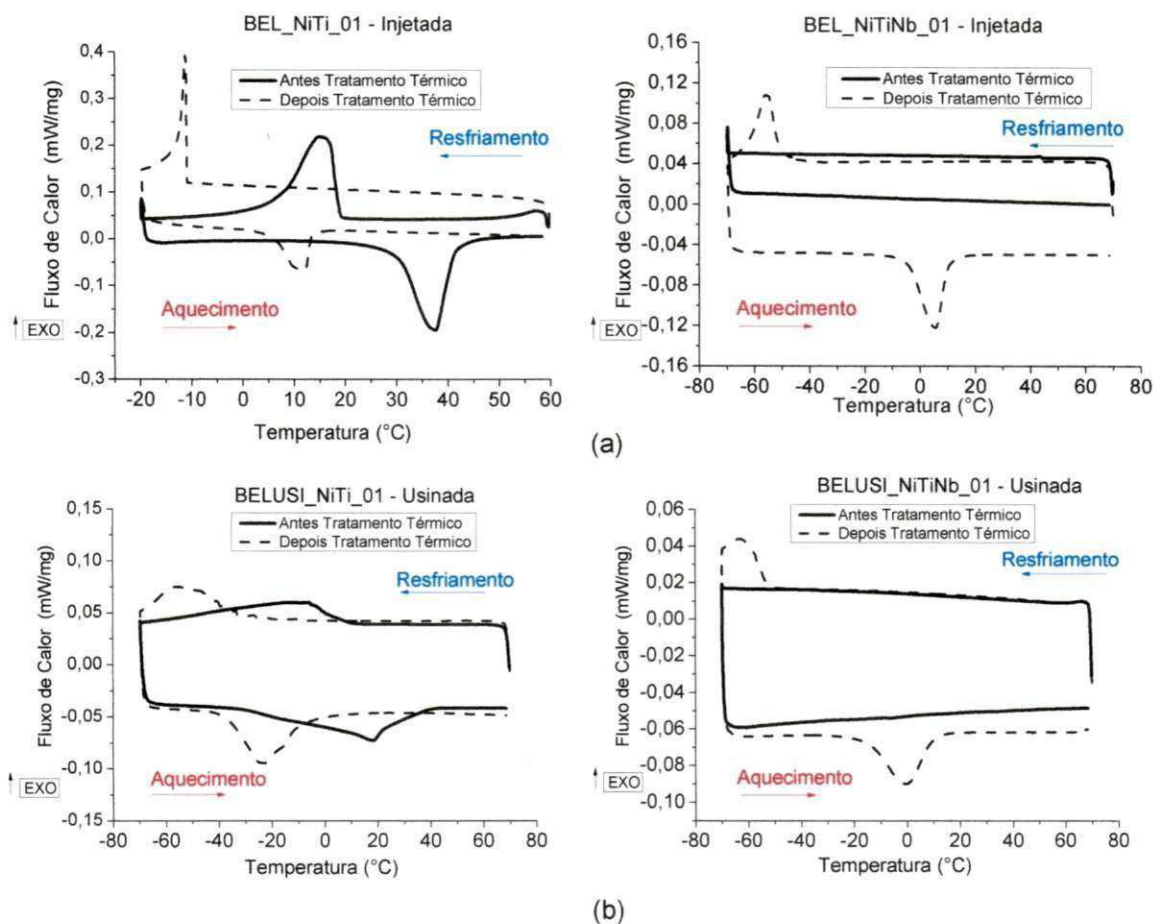


Figura 55 – Termogramas DSC dos AMF_{CON}. (a) Atuadores Injetados. (b) Atuadores Usinados.

Comprando as Figuras 55(a) e 55(b) nota-se que os tratamentos térmicos realizados nos atuadores proporcionaram uma mudança na transformação de fase dos mesmos. Para os AMF_{CON} de Ni-Ti, de uma maneira geral houve uma diminuição nas temperaturas de transformação como resultado do tratamento térmico, independentemente do fato do atuador ter sido obtido por injeção direta para a forma cônica ou por usinagem a partir de

um cilindro injetado. Esse comportamento indica que provavelmente os processos de fabricação utilizados causam o aparecimento de um forte campo de tensões internas que é aliviado após o tratamento térmico. Como as tensões internas tendem a aumentar as temperaturas de transformação (DE ARAÚJO, *et al*, 2000), estas são reduzidas pelo tratamento de homogeneização. De toda forma, essa redução propiciou que a temperatura A_f ficasse próxima da temperatura ambiente, conforme requerido durante a seleção das composições químicas dos atuadores.

HESSE *et al* (2004), estudando Atuadores Cilíndricos de LMF, obtiveram um resultado oposto para uma LMF de Ni-Ti submetida a um tratamento térmico diferente do utilizado neste trabalho e que promoveu um aumento nas temperaturas de transformação, e não uma diminuição. Porém, nesse estudo os autores não detalham o método de fabricação dos atuadores.

No caso dos atuadores fabricados a partir de ligas Ni-Ti-Nb, o mecanismo é diferente e verifica-se que a transformação de fase somente aparece após tratamento térmico. Conforme pode ser visto a partir da Figura 55, antes do tratamento térmico nenhuma transformação é detectada no intervalo de temperatura da medição por DSC. É notório também que após a realização do tratamento térmico a transformação aparece claramente e os atuadores tendem a apresentar características Superelásticas à temperatura ambiente.

As Tabelas 3 e 4 apresentam as temperaturas de transformação (M_s , M_p , M_f , A_s , A_p , A_f) característica de cada atuador, bem como sua histerese térmica (H_t), para os atuadores injetados e usinados, respectivamente. Como se pode observar nessas tabelas, a histerese térmica presente na liga Ni-Ti-Nb é maior que aquela observada na liga binária de Ni-Ti. Ressalta-se que essa histerese foi aqui definida como a diferença entre as temperaturas dos picos de transformação durante o aquecimento (A_p) e resfriamento (M_p).

As temperaturas correspondentes à região de ativação dos AMF_{CON} (A_s – A_f) estão destacadas em negrito nas tabelas. Assim sendo, constata-se que a maioria dos atuadores são Superelásticos em temperaturas acima de 10 °C.

Tabela 3 – Temperaturas de transformação e histerese térmica dos AMF_{CON} - Injetados

CODIGO DO ATUADOR		M _f (°C)	M _p (°C)	M _s (°C)	A _s (°C)	A _p (°C)	A _f (°C)	H _t (°C)
BEL_NiTiNb_01	st	-	-	-	-	-	-	-
	ct	-63,32	-56,00	-49,98	-4,65	50,74	10,56	61,74
BEL_NiTiNb_02	st	-	-	-	-	-	-	-
	ct	-64,36	-47,58	-27,53	-8,32	90,24	21,61	56,82
BEL_NiTi_01	st	6,89	15,09	18,66	29,93	37,69	41,81	22,60
	ct	-19,88	-11,22	-10,84	5,97	11,74	13,14	22,96
BEL_NiTi_02	st	13,34	18,26	24,22	39,10	44,74	48,80	25,48
	ct	-2,89	4,52	4,70	21,33	28,49	33,27	23,97
BEL_NiTi_03	st	-12,28	-4,15	2,90	10,12	20,29	28,74	24,44
	ct	-19,88	10,06	10,48	16,62	22,80	28,56	12,74
BEL_NiTi_04	st	-6,87	-7,07	20,96	21,16	32,90	43,75	39,97
	ct	4,71	14,42	14,65	28,56	34,98	38,14	20,56

st: sem tratamento; ct: com tratamento;

Tabela 4 – Temperaturas de transformação e histerese térmica dos AMF_{CON} – Usinados.

CÓDIGO DO ATUADOR		M _f (°C)	M _p (°C)	M _s (°C)	A _s (°C)	A _p (°C)	A _f (°C)	H _t (°C)
BELUSI_NiTiNb_01	st	-	-	-	-	-	-	-
	ct	-69,78	-63,12	-51,99	-14,13	-0,46	9,34	62,66
BELUSI_NiTiNb_02	st	-	-	-	-	-	-	-
	ct	-69,90	-53,35	-42,95	-19,39	-1,24	13,94	52,11
BELUSI_NiTi_01	st	-69,78	-11,52	-7,16	-9,34	17,60	28,04	29,12
	ct	-69,78	-56,08	-34,58	-37,19	-23,36	-11,52	32,72
BELUSI_NiTi_02	st	-44,85	-17,24	-2,65	-37,25	20,62	34,55	37,86
	ct	-69,61	-36,67	-8,00	-44,45	-8,3	22,57	28,37

st: sem tratamento; ct: com tratamento.

4.3 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA CÍCLICA

Antes da realização dos ensaios de geração de força em função da temperatura, todos os atuadores foram submetidos a um processo de estabilização cíclica que consistiu da realização de 50 ciclos de carregamento e descarregamento a temperatura ambiente usando a máquina Instron Electropulse E10000. As curvas características dessa ciclagem mecânica realizada nos AMF_{CON} são apresentadas na Figura 56. Os AMF_{CON}

apresentaram tendência de estabilização da curva característica de força – deflexão, que é acompanhada de uma diminuição da carga de compressão.

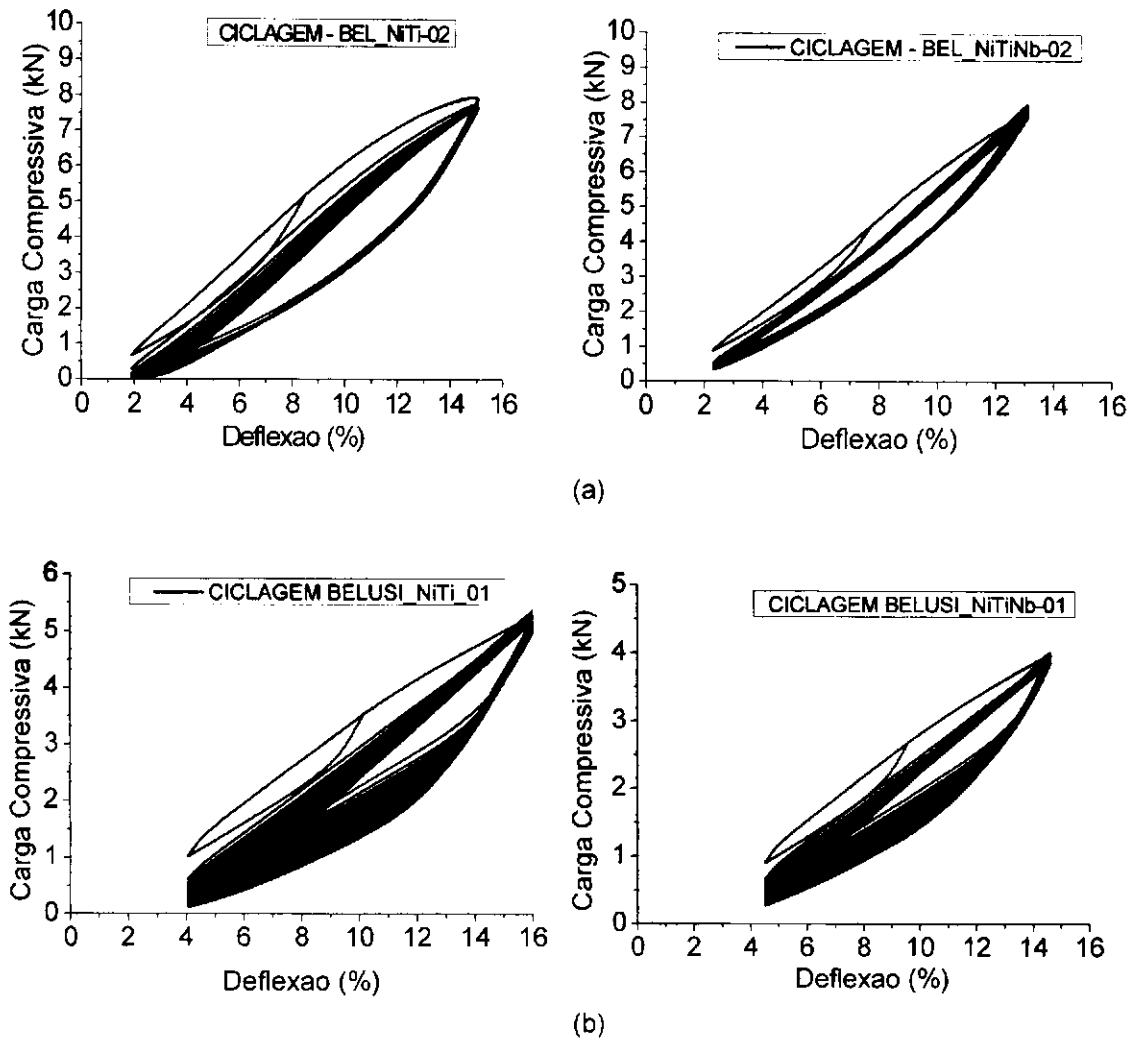


Figura 56 – Ciclagem mecânica dos AMF_{CON} a temperatura ambiente. (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usinados.

No espaço força-deformação, o laço de histerese presente, que fornece a medida da capacidade de dissipação de energia do atuador, é diminuído. Esse comportamento fica mais evidente para os atuadores usinados. Um resultado semelhante também foi observado no trabalho de SPEICHER (2010).

Observa-se ainda que os AMF_{CON} injetados apresentam uma maior resistência a compressão em relação aqueles usinados. Esse comportamento se deve ao atrito ocasionado por uma irregularidade geométrica presente nos AMF_{CON} injetados, que é outra característica associada ao processo de fabricação dos mesmos. Na realidade, os AMF_{CON} usinados se apoiam em uma linha circular, semelhantemente ao esquema mostrado na Figura 20, enquanto

os injetados se apoiam sobre uma pequena área anelar, aumentando o atrito e a resistência à deformação compressiva.

Nas Tabelas 5 e 6 são apresentados os valores para as cargas de compressão para atingir a deformação máxima durante o 1º ciclo e o 50º ciclo. Verifica-se que ocorre uma redução de 5 a 10% nessa carga, ao final do último ciclo.

Tabela 5 – Valores da carga para atingir a deformação máxima no 1º e 50º ciclo durante a ciclagem dos AMF_{CON} injetados.

Código do atuador	Carga (kN) 1ºCiclo	Carga (kN) 50ºCiclo
BEL_NiTi-01	9,40	8,20
BEL_NiTi-02	8,00	7,60
BEL_NiTi-03	9,55	8,60
BEL_NiTi-04	6,90	6,00
BEL_NiTiNb-01	9,45	9,20
BEL_NiTiNb-02	8,00	7,60

Tabela 6 – Valores da carga para atingir a deformação máxima no 1º e 50º ciclo durante a ciclagem dos AMF_{CON} usinados.

Código do atuador	Carga (kN) 1ºCiclo	Carga (kN) 50ºCiclo
BELUSI_NiTi-01	4,00	3,80
BELUSI_NiTi-02	4,00	3,70
BELUSI_NiTiNb-01	5,40	5,00
BELUSI_NiTiNb-02	4,90	4,60

4.4 GERAÇÃO DE FORÇA EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Para a realização dos ensaios de geração de força em função da temperatura, foi importante verificar inicialmente o efeito da dilatação térmica de toda a montagem. Para tanto, o efeito dessa influência foi avaliado realizando o mesmo ensaio dos AMF_{CON} numa arruela Belleville de aço. Os resultados mostraram que, em comparação com força gerada pelos atuadores de LMF observados na literatura (PEAIRS *et al*, 2004; HESSE *et al*, 2004; ANTONIOS *et al*, 2006), os efeitos da dilatação térmica do conjunto podem ser considerados desprezíveis. Na realidade, como mostra a Figura 57, a força

tende a relaxar completamente com o tempo, não existindo nenhuma geração de força adicional mesmo com o aumento da temperatura.

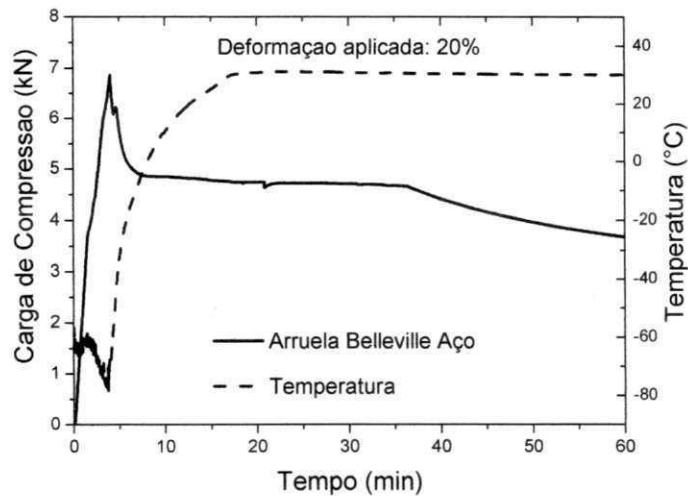


Figura 57 – Ensaio de geração de força em arruela Belleville de aço.

4.4.1 Geração de força direta

Para avaliar os resultados obtidos nos ensaios de geração de força, foi preciso definir alguns parâmetros que são característicos do teste. Estes parâmetros de força são apresentados na Figura 58: F_{\square} , F_0 , F_{A_s} , F_{PICO} , F_R .

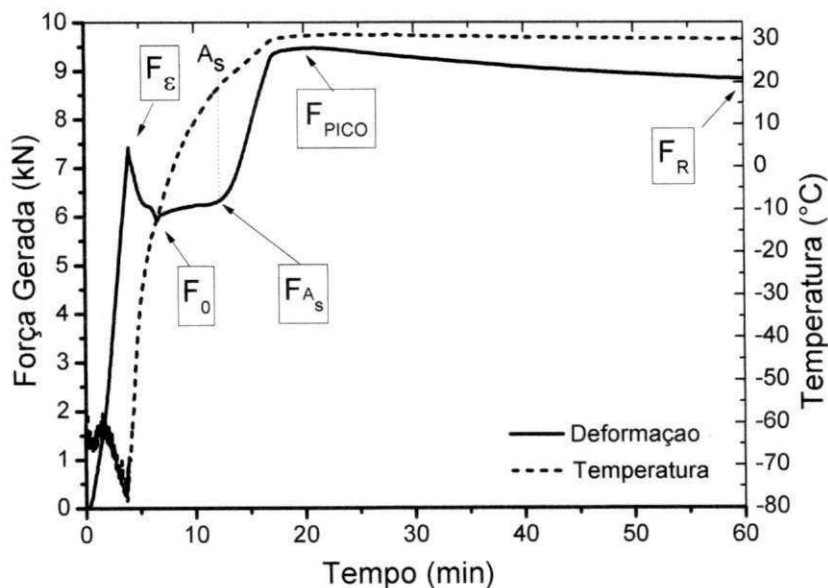


Figura 58 – Curva característica tipicamente obtida do ensaio de geração de força dos AMF_{CON} e seus principais parâmetros.

Os parâmetros presentes na Figura 58 são definidos da seguinte forma:

- F_{ϵ} é o ponto correspondente a força necessária para promover a deformação desejada no atuador. O índice ϵ representa a deformação compressiva imposta ao atuador;
- F_0 é o ponto que marca o início da geração de força após a deformação ou após a relaxação da carga (se houver);
- F_{As} é o ponto que marca o início de geração de força a partir da tendência de recuperação da forma, definido pela temperatura de transformação A_s ;
- F_R é o ponto que marca a força residual proveniente da geração de força;
- F_{PICO} é o ponto que marca o pico de geração de força. Em alguns casos esse ponto pode coincidir com o ponto F_R .

A partir dos pontos F_{PICO} e F_0 pode-se calcular força pico total gerada (F_{TOT}) durante o ensaio de geração de força, que é definida pela Equação (26):

$$F_{TOT} = F_{PICO} - F_0 \quad (26)$$

A força pico gerada diretamente pela tendência de EMFS (F_{AT}) é obtida a partir dos pontos F_{PICO} e F_{As} , sendo definida pela Equação (27):

$$F_{AT} = F_{PICO} - F_{As} \quad (27)$$

Ainda é possível definir a força residual gerada (F_{FRG}) a partir do ponto F_0 , no qual se iniciou o aumento da força quando do aumento da temperatura. Essa força pode ser calculada a partir da Equação (28):

$$F_{FRG} = F_R - F_0 \quad (28)$$

A força residual gerada diretamente pela tendência de EMFS (F_{EMFS}), que representa quanto de carga seguirá promovendo o aperto a partir da ativação do EMFS, pode ser calculada a partir da Equação (29):

$$F_{EMFS} = F_R - F_{AS} \quad (29)$$

As curvas de geração de força características dos AMF_{CON} são apresentadas na Figura 59. Adicionalmente, nas Tabelas 7 e 8 os valores dos parâmetros definidos pelas Equações (26) a (29), são apresentados para cada deformação correspondente, sendo os atuadores divididos em injetados e usinados, respectivamente.

Constata-se facilmente que quanto maior a deformação imposta, maior é a força gerada pelo atuador. Nota-se também que, de uma maneira geral, uma maior força para deformar o atuador é necessária quanto maior é a deformação imposta, até o nível de deformação ensaiado de 20% como pode ser observado nas Tabelas 7 e 8. Esse fato é esperado tendo em vista o comportamento das arruelas Belleville apresentado na Figura 18, para o mesmo nível de deformação.

A maioria dos trabalhos presentes na literatura refere-se a Atuadores Cilíndricos (AMF_{CIL}), com seus autores apresentando a força gerada em função do tempo, não mostrando a carga de compressão necessária para deformação dos atuadores, nem o nível de deformação imposta para cada geração, muito menos o comportamento da força gerada após a estabilização da temperatura. A forma das curvas de força em função do tempo para os AMF_{CIL} , a exemplo daquelas apresentadas por HESSE *et al* (2004) e FARIA *et al* (2011), são semelhantes as que foram obtidas nesse trabalho para os AMF_{CON} (Figura 59), muito embora as cargas e deformações envolvidas sejam diferentes, assim como as dimensões, geometria e propriedades mecânicas. Isso demonstra um potencial e a necessidade da reprodução do comportamento mecânico via análise computacional, o que facilitaria a especificação dos parâmetros necessários que se desejaria que o atuador apresentasse em uma determinada aplicação, de maneira precisa em um curto espaço de tempo.

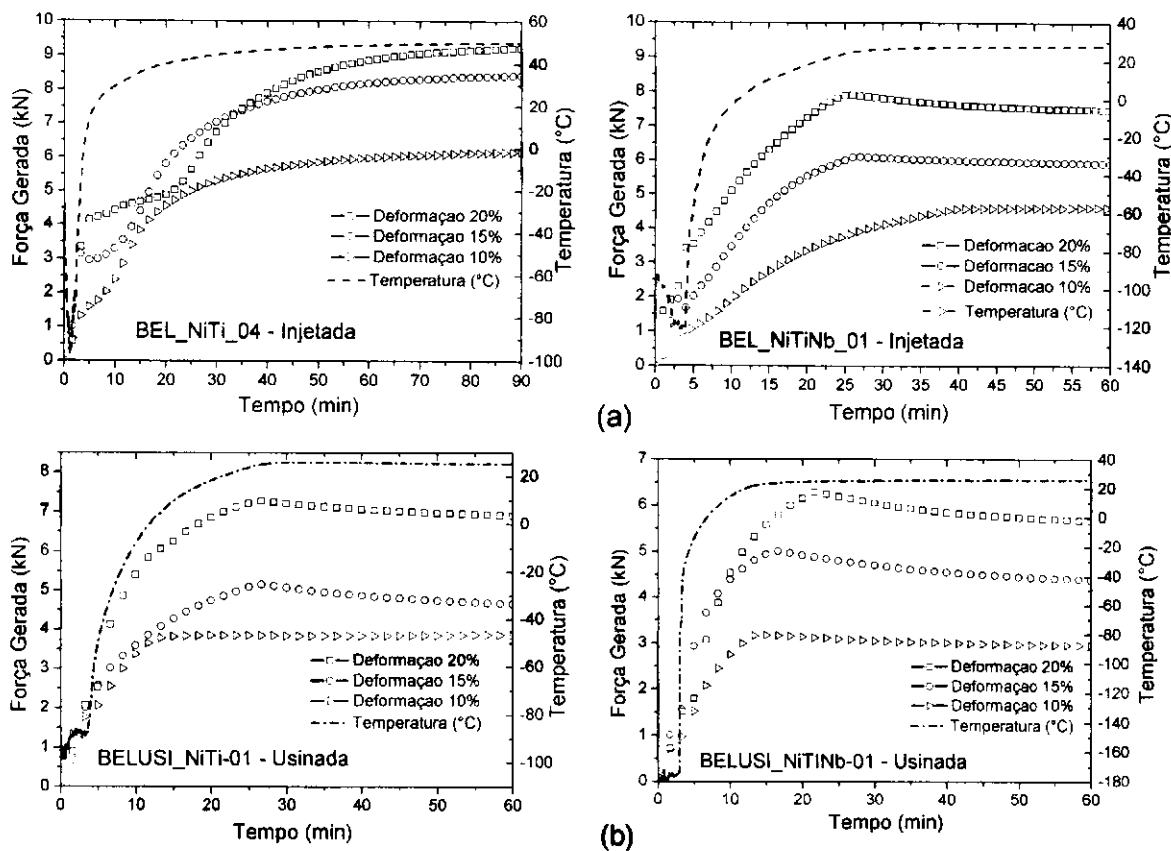


Figura 59 – Geração de força para AMF_{CON} em função do tempo a diferentes deformações. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usinados.

Na Figura 59, percebe-se a presença de uma relaxação da força gerada. Para explicar esse fenômeno são levantadas as seguintes hipóteses: a) acomodação do material inerente ao aperto; b) dilatação térmica dos componentes da montagem, já que todo o conjunto é resfriado; c) possibilidade de alguma região do atuador ter sofrido plastificação em seu estado martensítico durante a deformação, comprometendo a tendência de recuperação por EMFS. Mesmo com a presença da relaxação, consideráveis forças foram geradas a partir desses AMF_{CON} , apresentando uma estabilização de carga satisfatória.

O trabalho de ANTONIOS *et al* (2006) é o único estudo experimental para AMF_{CIL} que apresenta e menciona claramente a força gerada em função da temperatura. É importante atentar para esse aspecto, pois no trabalho de HESSE *et al* (2004), além de não se apresentar quanto de força pôde ser gerado efetivamente pelo EMFS, não é mostrado se essa geração se estabilizaria após um tempo suficientemente longo. Na realidade, os resultados apresentados por esses autores (Figura 28) mostram uma queda abrupta da

força gerada após um curto espaço de tempo, sem mencionar a influência direta da dilatação térmica dos componentes da montagem. Isso seria importante devido ao fato do aquecimento ter sido realizado em uma câmara e não ao ambiente como ocorre nesse trabalho, com o intuito de minimizar essa influência da dilatação, conforme indicado na Figura 57.

Conforme mencionado anteriormente, nas Tabelas 7 e 8 os valores dos parâmetros definidos na Figura 58 e pelas Equações (26) a (29), são apresentados para cada deformação imposta, sendo os atuadores divididos em usinados e injetados, respectivamente.

Tabela 7 - Força Gerada para AMF_{CON} usinados.

CÓDIGO DO ATUADOR	ϵ (%)	F_{ϵ} (kN)	F_{TOT} (kN)	F_{AT} (kN)	F_{FGR} (kN)	F_{EMFS} (kN)
BELUSI_NiTiNb_01	10	1,0	2,3	1,7	2,1	1,5
	15	1,4	3,5	2,5	2,8	1,9
	20	3,9	4,6	3,3	4,0	2,7
BELUSI_NiTiNb_02	10	1,3	2,2	2,1	1,6	1,5
	15	2,0	3,5	3,5	2,8	1,2
	20	3,4	3,0	2,6	2,0	2,4
BELUSI_NiTi_01	10	1,7	2,3	1,6	2,3	1,6
	15	2,1	3,1	1,8	2,7	1,3
	20	4,0	5,7	2,5	2,2	2,1
BELUSI_NiTi_02	10	1,1	2,3	1,5	2,2	1,5
	15	2,1	3,3	3,2	2,9	2,7
	20	4,0	3,1	3,1	2,8	2,9

Tabela 8 – Força Gerada para AMF_{CON} injetados.

CÓDIGO DO ATUADOR	ϵ (%)	F_{ϵ} (kN)	F_{TOT} (kN)	F_{AT} (kN)	F_{FGR} (kN)	F_{EMFS} (kN)
BEL_NiTiNb_01	10	1,4	3,7	2,9	3,7	2,9
	15	1,9	4,5	2,5	4,4	2,3
	20	3,4	4,7	3,0	4,2	2,6
BEL_NiTiNb_02	10	2,0	4,0	2,8	2,4	2,4
	15	3,5	4,7	4,2	4,7	4,2
	20	4,9	4,1	4,0	4,0	3,7
BEL_NiTi_01	10	2,5	4,0	3,3	3,8	3,0
	15	4,1	4,7	4,2	4,2	3,7
	20	4,6	3,7	3,7	3,7	3,7
BEL_NiTi_03	10	2,7	3,1	2,8	2,8	2,5
	15	5,0	4,0	3,4	3,1	2,5
	20	7,4	3,5	3,2	2,9	2,6
BEL_NiTi_04	10	1,4	4,9	4,9	4,9	4,1
	15	3,5	5,3	5,3	5,4	4,7
	20	4,6	5,2	5,2	5,2	4,5

A Figura 60 mostra as curvas de geração de força anteriores traçadas em função do tempo, agora em função da temperatura. Essas curvas são características do ensaio de geração de força em função da temperatura que não foram encontradas na literatura para efeito de comparação. De maneira geral essa curva mostra que quanto maior a deformação imposta existe tendência de ser gerada uma maior força. Para cada caso a temperatura de ativação A_s é destacada em uma reta vertical de referência. Nesse mesmo

contexto, LABRECQUE *et al* (1996) apresentaram uma curva da força gerada em função da temperatura (Figura 38) de um AMF_{CON} fabricado de uma LMF de Cu-Al-Ni-Mn-Ti. Apesar de apresentar uma força gerada de aproximadamente 4 kN, e ao final do resfriamento apenas 1 kN de força residual, os resultados daqueles pesquisadores mostram-se semelhantes aos apresentadas na Figura 60.

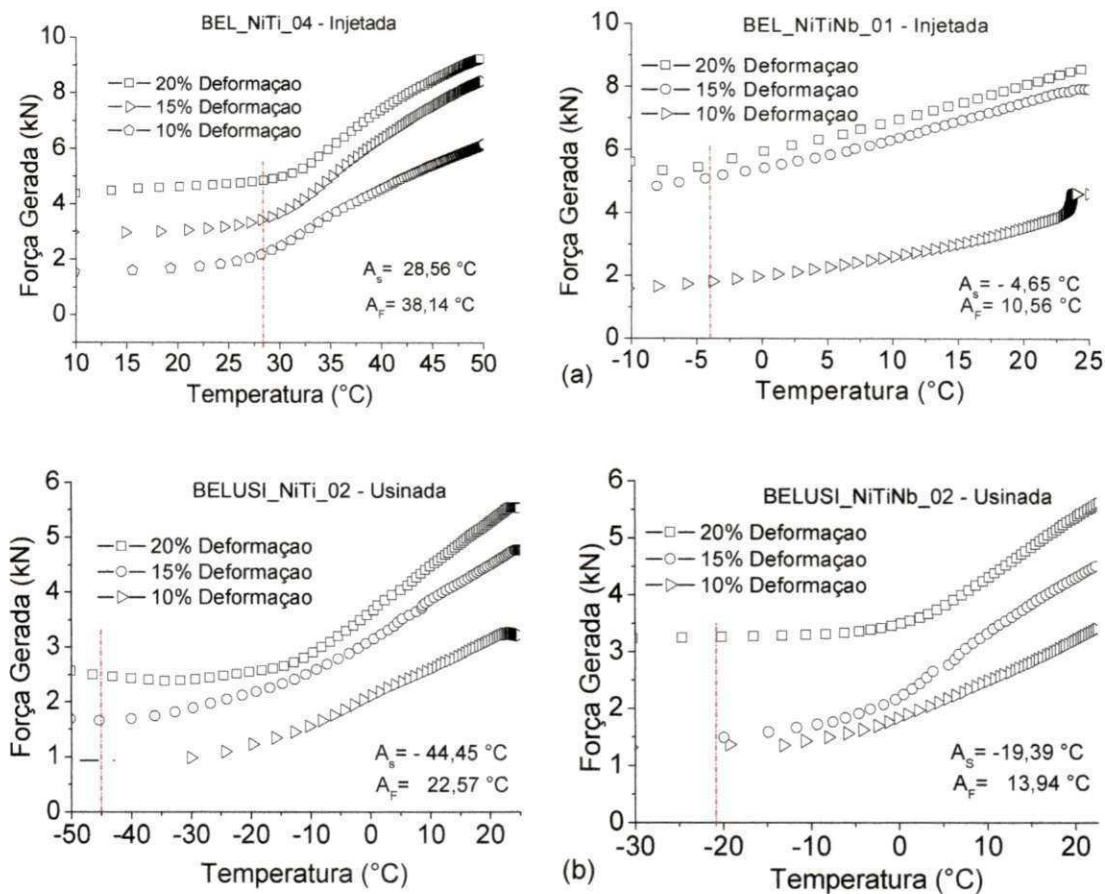


Figura 60 – Força gerada pelos AMF_{CON} em função da temperatura para diferentes deformações: 10%, 15% e 20%. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usinados.

A Figura 61 mostra o comportamento da força gerada em função da deformação imposta aos AMF_{CON} em estado martensítico. De uma maneira geral, percebe-se que os AMF_{CON} injetados apresentam uma dispersão maior dos resultados, ou seja, não se pode afirmar que existe nesse caso uma relação linear entre a deformação imposta e a força gerada. Essa dispersão pode ser explicada pelo problema de geometria já mencionado anteriormente.

Já para os AMF_{CON} usinados os pontos se mostram mais concentrados, indicando uma relação quase linear entre a deformação e a força gerada que pode ser obtida.

A análise da geração de força não pode apenas ser realizada de modo isolado, dependendo apenas da temperatura de ativação, pois a mesma é influenciada diretamente pelo nível de carregamento e deformação. Um AMF_{CON} pode gerar força pela recuperação do Efeito Memória e ainda continuar gerando força pelo aumento da rigidez, como foi observado anteriormente na curva característica do ensaio de geração de força.

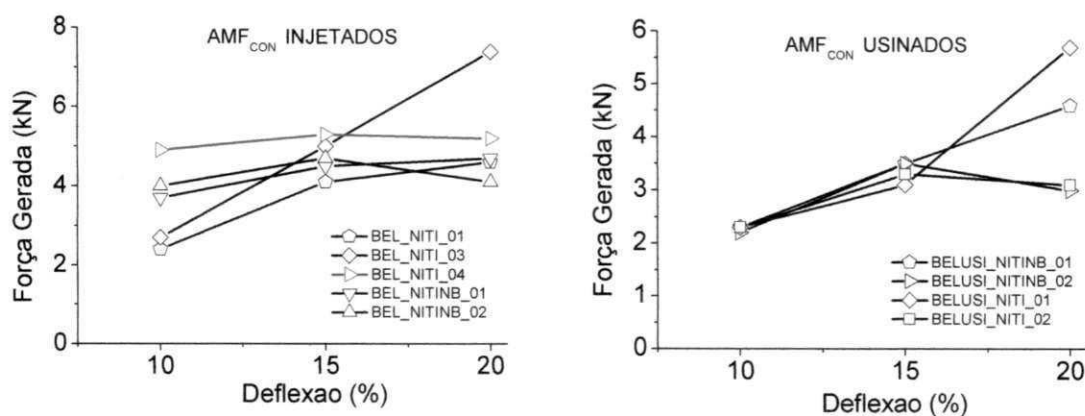


Figura 61 – Força gerada em função da deformação para AMF_{CON} . (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usinados.

4.4.2 Geração de força em parafuso

Para estimar a geração de força em função da temperatura diretamente sobre um parafuso, conforme ilustrado na Figura 52, a elongação do mesmo em função da temperatura foi medida. Vale lembrar que cada atuador a ser testado no parafuso é submetido a uma deformação de 20% em relação à sua altura livre, a uma temperatura criogênica bastante inferior a temperatura M_f . A partir dos resultados obtidos e inseridos na Equação (25), obteve-se a força gerada pelo AMF_{CON} sobre o parafuso. Ressalta-se aqui que a elongação máxima que o atuador promoveria se transferisse toda a recuperação da forma para o parafuso não chega a ultrapassar seu limite elástico. A curva característica desse ensaio pode ser visualizada na Figura 62.

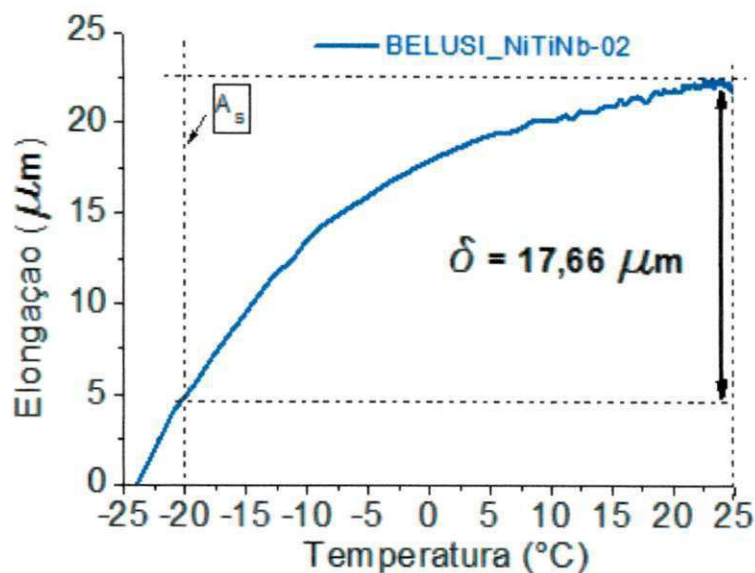


Figura 62 – Elongação do parafuso em função da temperatura para um teste típico com um AMF_{CON} de Ni-Ti-Nb usinado.

Para comparar a força proveniente da deformação do parafuso com a força direta obtida na máquina de ensaios Instron, foi definido que apenas seria considerada a força proveniente da tendência de recuperação por EMFS, ou seja, a força gerada na máquina e no parafuso seria contabilizada a partir da temperatura de ativação inicial (A_s) até a sua estabilização à temperatura ambiente, conforme mostrado Figura 62.

As Tabelas 9 e 10 apresentam os resultados comparativos para os AMF_{CON} injetados e usinados.

Tabela 9 – Resultados obtidos para a força gerada (FG) direta e no parafuso com relação ao EMFS. AMF_{CON} Injetados.

CÓDIGO DA AMOSTRA	FG- DIRETA (INSTRON), (N)	FG - PARAFUSO (LVDT), (N)	Diferença (%)
BEL_NiTiNb-01	2203	2540	13,26%
BEL_NiTi-02	1877	1810	-3,70%
BEL_NiTi-03	2580	2802	7,92%
BEL_NiTi-04	3246	4470	27,38%

Tabela 10 – Resultados obtidos para a força gerada (FG) direta e no parafuso com relação ao EMFS. AMF_{CON} usinados.

CÓDIGO DA AMOSTRA	FG- DIRETA (INSTRON), (N)	FG - PARAFUSO (LVDT), (N)	Diferença (%)
BELUSI_NiTiNb-01	2710	3264	16,97%
BELUSI_NiTiNb-02	2320	2796	17,02%
BELUSI_NiTi-02	2850	3103	8,15%

Tendo em vista a particularidade de cada método, a partir dos dados das Tabelas 9 e 10 verifica-se que quando se compara os resultados obtidos nos dos dois métodos os mesmos se apresentam com diferenças aceitáveis, não chegando a 500N. O fato de a força gerada direta ser geralmente menor na máquina de ensaios pode ser explicado pela acumulo de acessórios presentes na montagem que influência na deformação, e que pode e deve ser melhorada em trabalhos futuros para que não haja essa interferência. A amostra BEL_NiTi-04 apresentou uma diferença maior em relação as demais, devido a utilização de um soprador térmico para que esse atuador, que necessita atingir 50°C, pudesse ser completamente ativado. Essa foi a mesma temperatura do ensaio de geração direta realizado para esse AMF_{CON}, o que proporcionou um aquecimento de todo o conjunto e não apenas localmente no atuador, conforme desejado. Os demais AMF_{CON} foram aquecidos pelo próprio ambiente a partir da temperatura criogênica inferior a M_f , não sofrendo qualquer aquecimento complementar.

Os resultados demonstram a eficácia e potencialidade dos AMF_{CON} produzidos no LaMMEA/UFCG para geração de força em uniões aparafusadas, devendo apenas ter seu desempenho melhorado através da otimização dos parâmetros geométricos visando o nível de carga desejado, que neste trabalho foi limitado devido as limitações existentes na fabricação dos atuadores injetados.

4.5 VARIAÇÃO DA RIGIDEZ EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Para avaliar o aumento da rigidez em função da temperatura a partir das curvas características da força em função da deflexão, definiu-se uma constante de mola (k), aqui denominada simplesmente de rigidez. Portanto, a

rigidez dos atuadores foi determinada pela inclinação da reta da curva Força-Deflexão durante o carregamento, conforme ilustrado na Figura 63.

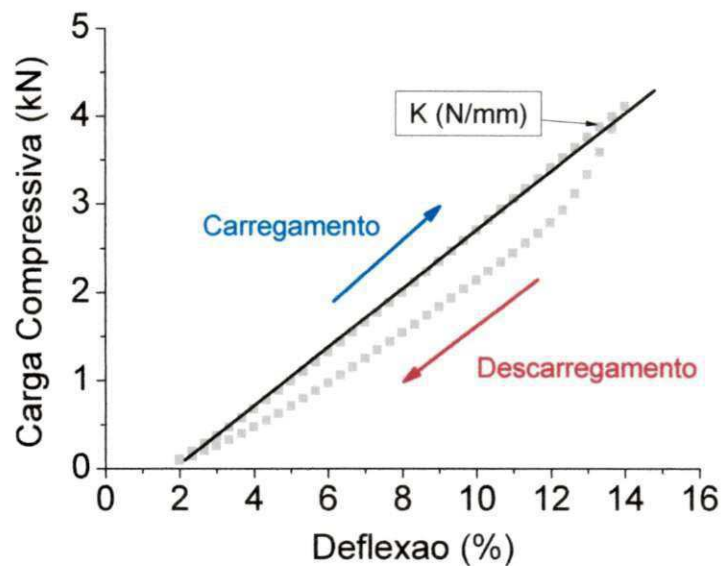


Figura 63 – Curva experimental Força-Deflexão para determinação da rigidez de um AMF_{CON}.

A Figura 64 mostra os resultados dos ensaios de compressão dos AMF_{CON} em função da temperatura, acima do ambiente (~25 °C). Nesse caso, o coeficiente de rigidez (k) dos atuadores é definido pela inclinação da reta Força-Deflexão durante o carregamento. Esse ensaio é importante, pois permite avaliar a evolução da rigidez do atuador quando submetido a esforços mecânicos no seu regime Superelástico, quando ocorre aumento da temperatura. Verifica-se que a resposta força – deflexão durante o carregamento é aproximadamente linear para todos os atuadores e temperaturas de teste, de modo que a rigidez pode ser facilmente calculada

Qualitativamente, observa-se da Figura 64 que a rigidez aumenta com a temperatura e os valores de rigidez calculados são mostrados na Figura 65.

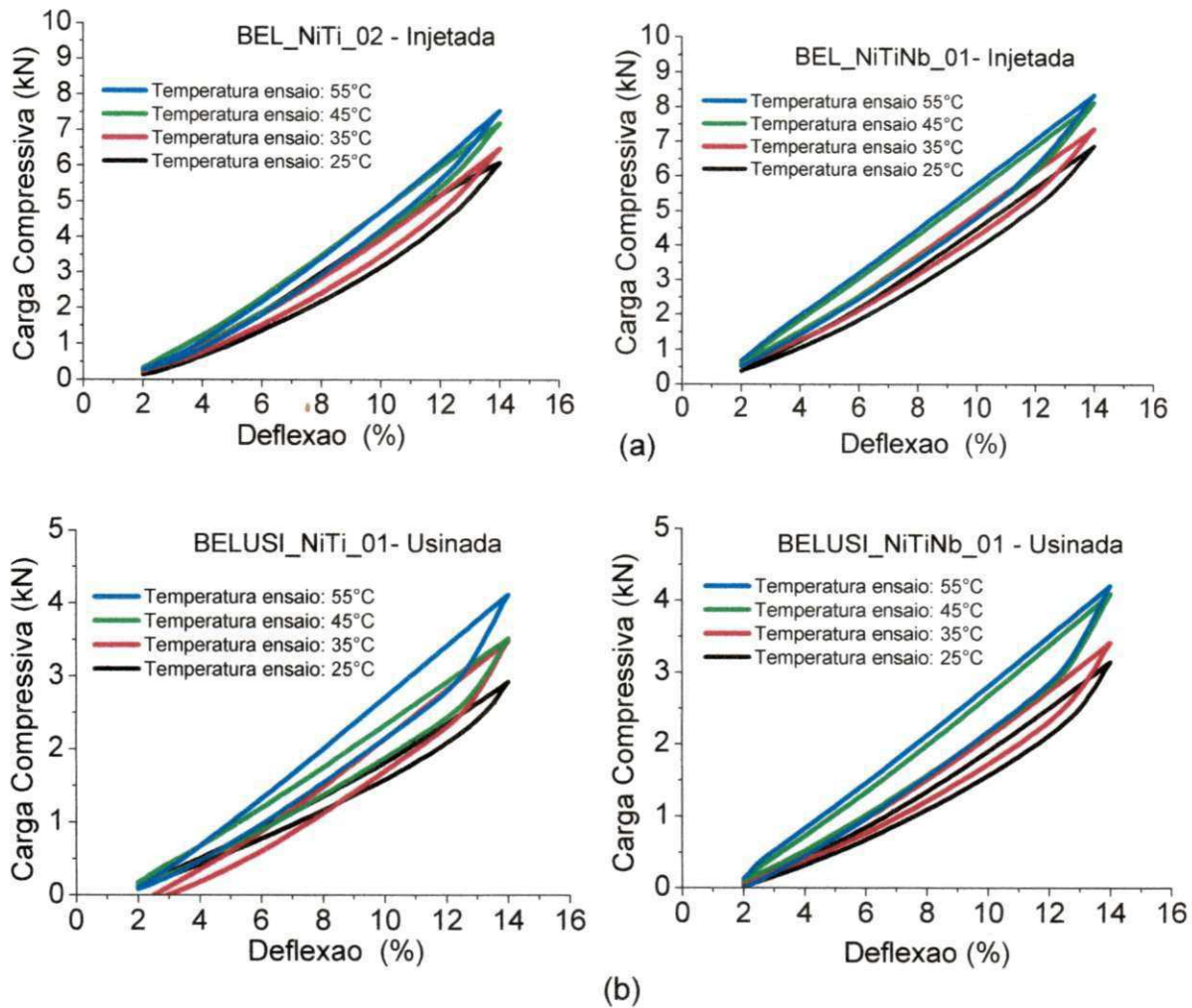


Figura 64 – Evolução do comportamento força – deflexão dos AMF_{CON} a temperatura crescente de teste: 25°C, 35°, 45° e 55°C. (a) Atuadores injetados (b) Atuadores usados.

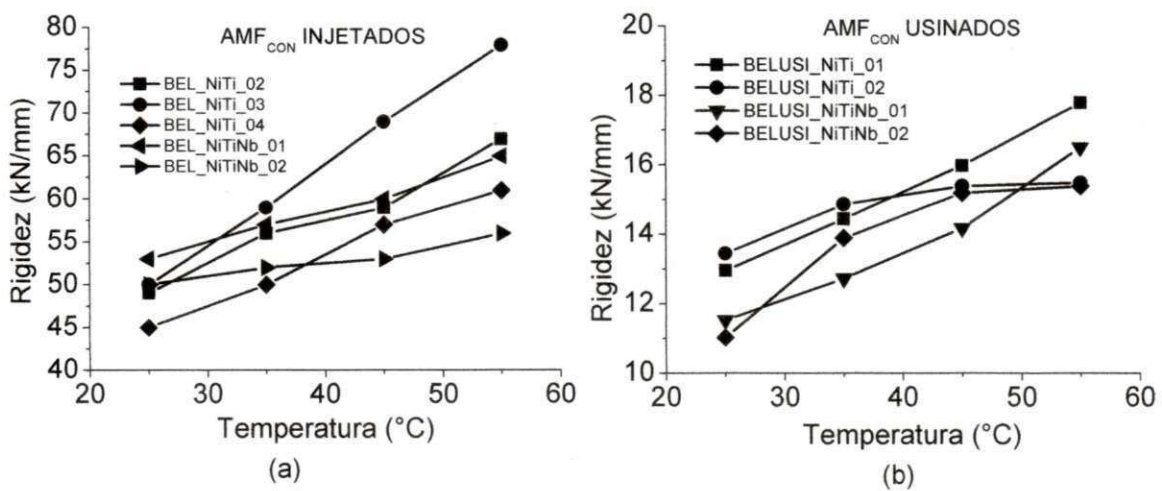


Figura 65 – Comportamento da rigidez em função da temperatura dos AMF_{CON} . (a) Atuadores injetados. (b) Atuadores usados.

Ao observar os valores da rigidez em função da temperatura para os AMF_{CON} na Figura 65, fica evidente que existe uma relação aproximadamente linear entre a temperatura e a rigidez. Esse efeito favorece a aplicação desses atuadores em uniões aparafusadas onde o aperto pode evoluir com o acréscimo da temperatura, pois a rigidez aumenta dificultando o afrouxamento da junta. Um caso típico para essa aplicação seria o de rodas automotivas, que devido às frenagens sofrem um aumento na sua temperatura, que se torna superior a ambiente. Segundo INMAN e GHORASHI (2004) esse problema chegou a ser relatado como motivador para o aumento de reclamações de garantias na indústria automotiva americana em 1995.

Ainda analisando os resultados da rigidez em função da temperatura, percebe-se que a rigidez dos atuadores injetados é aproximadamente quatro vezes maior que a dos usinados. Este fato ser explicado pelos mesmos motivos relativos à diferença no contato dos AMF_{CON} injetados e usinados com o apoio plano, mencionados anteriormente. Nada se pode afirmar em relação a qual atuador apresentou uma maior rigidez, muito embora aqueles de Ni-Ti tenham apresentado valores maiores na maior parte dos casos.

4.6 RESPOSTA SUPERELÁSTICA DOS AMF_{CON}

4.6.1 Análise Experimental

As características das curvas de Superelasticidade dos AMF_{CON} e os resultados dos ensaios de carregamento e descarregamento dos atuadores podem ser observados na Figura 66. Como observado na seção 4.5, constata-se que com o aumento da temperatura a carga de compressão aumenta, assim como a rigidez do atuador. É perceptível também que quanto maior a temperatura do ensaio menor a deformação residual e a histerese apresentada para cada AMF_{CON} .

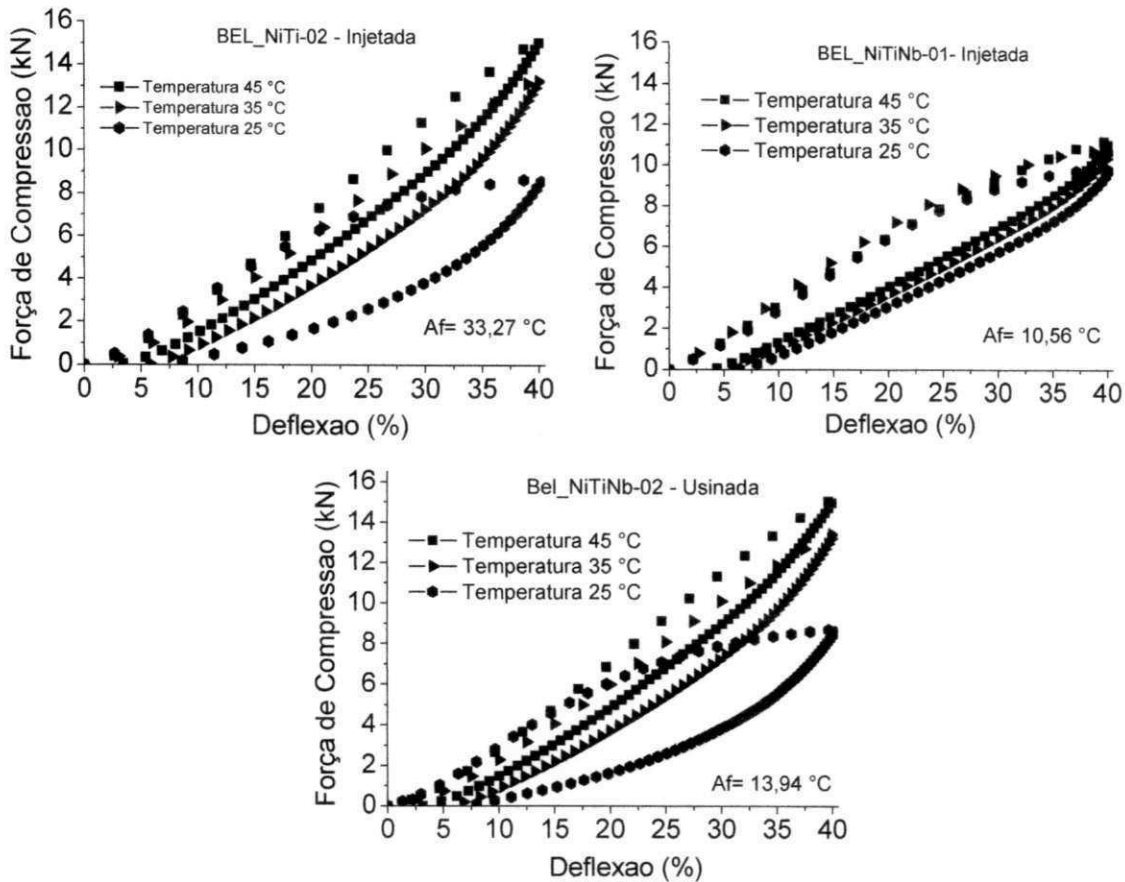


Figura 66 – Curvas Superelásticas para os AMF_{CON} deformados até 40%.

Comparando as formas das curvas Superelásticas obtidas para os AMF_{CON} da Figura 66, com as apresentadas por SPEICHER (2010), mostradas na Figura 40, percebe-se que estas são bastante diferentes. As curvas obtidas por SPEICHER (2010) mostram um pico de força seguido de queda da carga formando uma curva tipo “cara de pato”, não presente nas curvas da Figura 65. Apesar de essas curvas apresentarem níveis de deformações finais diferentes, de 40 % no caso deste trabalho e 100% no caso de SPEICHER (2010), essa diferença pode ser explicada através das razões h/t distintas utilizadas nos dois estudos. Como se mostrou na Figura 18, esse parâmetro define a forma da curva. Como se poder verificar na Figura 67, o mesmo pico presente na Figura 41 pode ser observado para o atuador de SPEICHER (2010) quando submetido a uma deformação menor. Isso mostra claramente que a característica da curva independe da deformação imposta, mas da razão h/t conforme mostrado na Figura 18.

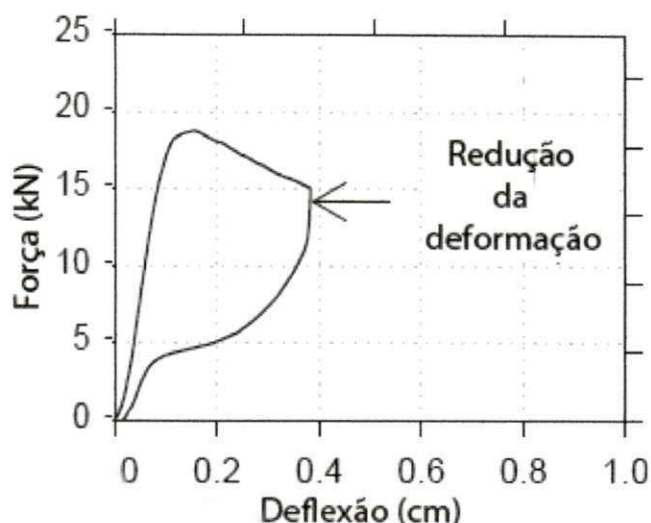


Figura 67 – Comportamento de um AMF_{CON} Superelástico de razão $h/t = 2$ submetido a uma deformação de aproximadamente 50%. (Adaptado de SPEICHER, 2010).

Por outro lado, em comparação com as curvas Superelásticas apresentadas por LABRECQUE (1996) também para um AMF_{CON} (Figura 37), as curvas desse trabalho apresentadas na Figura 66 se mostram semelhantes. Isto ocorre por que as razões h/t utilizadas em ambos os trabalhos levam a uma resposta Superelástica correspondentes a razões situadas entre 0,4 e 1,2 na Figura 18.

Esse fato mostra a versatilidade desses atuadores, que associando o EMFS e a Superelasticidade com as características marcantes das arruelas Belleville podem proporcionar um AMF_{CON} capaz de promover mudanças consideráveis no desenvolvimento de novos dispositivos, a exemplo de uniões aparafusadas inteligentes ou de auto-aperto, como também desenvolver atenuadores de abalos sísmicos, dentre outra aplicações que poderão ser desenvolvidas a partir desses resultados.

4.6.2 Análise Teórica

O comportamento do carregamento mecânico Superelástico dos AMF_{CON} foi avaliado para a temperatura de 27 °C (ambiente) a partir da Equação (13) substituindo os parâmetros correspondentes para cada atuador. O módulo de elasticidade utilizado, obtido através de ensaio em DMA, foi de 40 GPa.

O resultado obtido desse comparativo teórico-experimental é mostrado na Figura 68. O descarregamento mecânico não foi aqui abordado por não haver na literatura equações correspondentes ao descarregamento de arruelas Belleville fabricadas em LMF Superelásticas, assim como não foi objetivo desse trabalho desenvolvê-las.

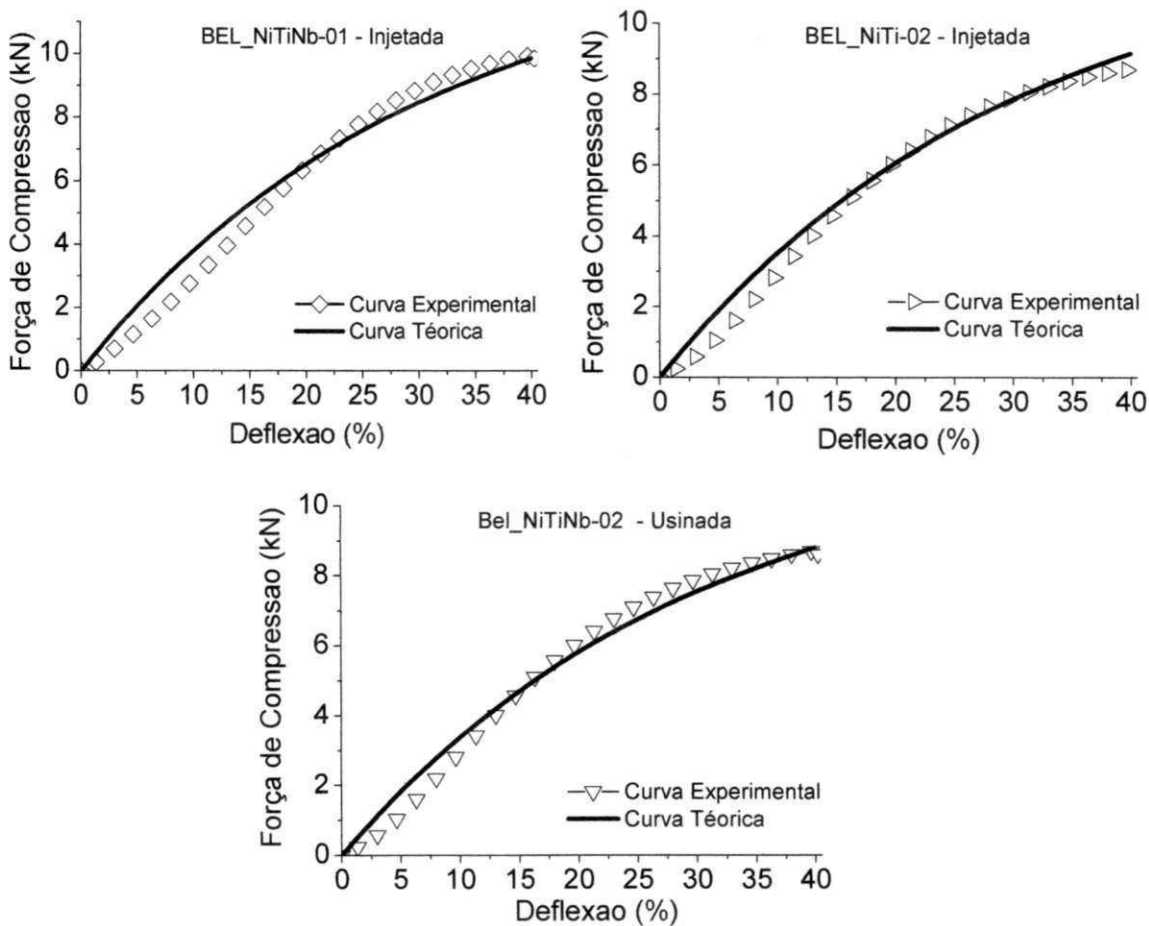


Figura 68 – Comparação teórico-experimental do comportamento força – deflexão dos AMF_{CON} a temperatura ambiente durante carregamento.

Como se pode observar na Figura 68, as curvas teóricas calculadas a partir da Equação (13) para esse nível de deformação e parâmetros usados na simulação apresentaram uma boa aproximação com as curvas experimentais do carregamento mecânico dos AMF_{CON} .

LABRECQUE *et al* (1996), a partir da mesma equação e usando um método de interpolação conhecido como *Kriging*, fez uma comparação simplificada dos resultados teóricos e experimentais para um AMF_{CON} com o carregamento e descarregamento. Apesar de apresentar semelhanças nas curvas com excelente aproximação, como mostrado na Figura 37, não se pode

dizer que estes autores conseguiram reproduzi-las, tendo em vista que utilizaram um módulo de elasticidade do material de aproximadamente 3 a 4 vezes o valor comumente observado na literatura para uma LMF de Cu-Al-Ni-Mn-Ti. Esse fato foi mencionado pelos próprios autores, em uma autocrítica a própria simulação realizada pelo grupo.

Isso revela que ainda há muito a ser estudado quanto ao comportamento desses atuadores em regime Superelástico e ainda desenvolver modelos que sejam capazes de reproduzir o comportamento de AMF_{CON} , o que pode não ser uma tarefa simples. Sendo assim, os resultados deste trabalho mostraram-se promissores quanto ao desenvolvimento para consolidação destes atuadores, que podem se tornar elementos importantes, seja para aplicações estáticas (uniões aparafusadas) e/ou dinâmicas (elementos de absorção de energia).

5.0 CONCLUSÕES

Este trabalho de pesquisa abordou a fabricação e caracterização termomecânica de Atuadores Cônicos (Belleville) de LMF de Ni-Ti e Ni-Ti-Nb, quando submetidos aos fenômenos associados ao EMF e Superelasticidade. As principais conclusões que podem ser destacadas a partir dos resultados obtidos são apresentadas como segue:

- Os Atuadores Cônicos (AMF_{CON}) de Ni-Ti e Ni-Ti-Nb podem ser fabricados com sucesso por dois processos distintos: injeção do metal fundido em molde metálico (PSPP adaptado) e usinagem convencional;
- Os termogramas DSC dos AMF_{CON} permitiram verificar que os processos de fabricação utilizados influenciam diretamente nas temperaturas de transformação devido à presença de tensões internas;
- O tratamento térmico de homogeneização dos AMF_{CON} de Ni-Ti promoveu uma diminuição do campo de tensões internas inerente aos processos de fabricação, reduzindo as temperaturas de transformação e deixando-as próximas ao ambiente. Já para os AMF_{CON} de Ni-Ti-Nb esse tratamento térmico proporcionou o aparecimento da transformação de fase associada ao fenômeno EMF, não existente antes do mesmo;
- O método utilizado nesse trabalho para realizar a medição da geração de força dos AMF_{CON} em função do tempo e da temperatura, se mostrou mais eficiente que os apresentados na literatura, por utilizar o aquecimento natural a partir de temperaturas criogênicas até à temperatura ambiente, minimizando a influência da dilatação térmica da montagem, como pode ser comprovado pelo ensaio usando uma arruela Belleville de aço;
- As curvas características de geração de força em função do tempo dos AMF_{CON} se assemelharam bastante com aquelas apresentadas nos trabalhos presentes na literatura para Atuadores Cilíndricos de Ni-Ti (AMF_{CIL});

- A partir dos tratamentos das curvas de geração de força em função do tempo e da temperatura foi possível constatar picos médios de geração de força para os AMF_{CON} injetados da ordem de 5 kN e seguidos de forças residuais da ordem de 3,85 kN. Já para os AMF_{CON} usinados a geração média da força de pico foi de 3,90 kN e a força residual média foi da ordem de 2,90 kN. Esses níveis de força residual média foram superiores aos apresentados no único trabalho existente na literatura sobre geração de força via AMF_{CON}.
- A comparação entre as forças geradas no parafuso de aço de 6,35 mm de diâmetro com aquelas obtidas nos ensaios de geração de força direta na máquina de ensaios permitiu constatar uma aproximação aceitável entre os valores medidos, com uma diferença máxima de 500 N entre os dois métodos. Esse fato comprova a eficiência dos atuadores para uma eventual utilização real em juntas aparafusadas;
- Durante a análise da rigidez dos atuadores em função da temperatura, comprovou-se que a rigidez aumenta com a temperatura. Verificou-se que existe uma relação linear entre a temperatura e a rigidez, que ficou mais evidenciada nos AMF_{CON} usinados. Esse efeito favorece a aplicação desses atuadores em uniões aparafusadas onde a pré-carga de aperto e a rigidez podem evoluir simultaneamente com o acréscimo da temperatura.

Finalmente, esse trabalho teve um caráter pioneiro por se tratar de Atuadores Cônicos (Belleville) de LMF com caráter bifuncional, que pode ser aplicado tanto em regime de Efeito Memória para geração de força e ainda em regime Superelástico. Além disso, pode-se afirmar que foi dada uma contribuição importante para os estudos de atuadores de LMF submetidos a carregamentos compressivos, já que a grande maioria dos trabalhos existentes na literatura são voltados para a utilização de Atuadores Cilíndricos.

6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho sugerem-se os seguintes estudos:

- Analisar o comportamento dos AMF_{CON} para geração de força e Superelasticidade, variando os parâmetros dimensionais, tais como inclinação, diâmetro e razão h/t ;
- Realizar simulação do comportamento não linear dos AMF_{CON} ;
- Avaliar o comportamento desses atuadores associados em série e em paralelo;
- Realizar um estudo prospectivo para aplicações potencial desses atuadores nas mais diversas áreas para confecção de dispositivos termomecânicos especiais;
- Analisar um maior número de parâmetros de ensaios: nível de deformação, temperatura, composição química e processos de fabricação dos atuadores.
- Realizar um estudo comparativo entre os Atuadores Cônicos e Cilíndricos com dimensões geométricas, tais como espessura e diâmetros, assim como composições químicas semelhantes.
- Avaliar os ensaios de geração de força por um período de tempo maior, para avaliar sua efetiva aplicação.

7.0 REFERÊNCIAS

ANSYS Inc. **Ansys 12.1 Help**. Canonsburg, Pennsylvania, 2009.

ANTONIOS C.; INMAN D. J.; SMAILI, A.. Experimental and theoretical behavior of self-healing bolted joints. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 17, p. 499 -509, 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), F2004-5 - **Standard Test Method for Transformation Temperature of Nickel-Titanium Alloys by Thermal Analysis**. Annual book of ASTM standards, v. 13.01, p. 1-4, West Conshohocken, United States, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), F2005-5 - **Standard Terminology for Nickel-Titanium Shape Memory Alloys**. 2005. Annual book of ASTM Standards, v. 13.01, p. 1-3, West Conshohocken, United States, 2005.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM), F2082-5 - **Standard Test Method for Determination of Transformation Temperature of Nickel-Titanium Shape Memory Alloys by Bend and Free Recovery**. 2006. Annual book of ASTM Standards, v. 13.01, p. 1-7, West Conshohocken, United States, 2006.

AURICCHIO, F.; SACCO, E.. A.. Superelastic SMA beam model. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 8, p. 489-501, 1997.

BORN, R. M.. **Aplicação de ligas com memória de forma magnéticas em atuadores lineares**. 2007. 91f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

BRINSON, L. C.; LAMMERING, R.. Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. **International Journal of Solids and Structures**. v. 30, p. 3261-3280, 1993.

BUNDHOO, V.; HASLAM, E.; BIRCH, B.; PARK, E. J. A shape memory alloy based tendon-driven actuation system for biomimetic artificial fingers, part I: design and evaluation. **Robotica**, v. 28, p.1-16, 2008.

COUTINHO NETO, J. F.; LIMA, I. S. T.; DE ARAUJO, C. J.; VILAR, Z. T.; TRAVASSOS, G. D.; RODRIGUES, L. F. A.. Estudo experimental do comportamento eletrotermomecânico de atuadores lineares de Ni-Ti com memória de forma. 2008, Salvador. **Anais. I CONGRESSO NACIONAL EM ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM**, 2008. 10p.

DANIELI, F.. **Reconhecimento da fala com e sem ruído competitivo em crianças usuárias de implantes coclear utilizando dois processadores de fala**. 2010. 124f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos/ Escola de Medicina Ribeirão Preto/Instituto de Química da Universidade de São Carlos de São Paulo, São Carlos.

DAVET, G. P.. **HANDBOOK: Using Belleville Springs to Maintain Bolt Preload**. Disponível em: <<http://www.solonmfg.com/index.cfm>>, acessado em: 10 de outubro de 2011 às 17:35.

DE ARAÚJO, C. J.; MORIN, M.; GUÉNIN, G.. Estimation of internal stresses in shape memory wires during thermal cycling under constant load: A macromechanical approach. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 11, p. 516-524, 2000.

DUERIG, T. M.; PELTON, A.; STOCKEL, D.. An overview of nitinol medical applications. **Material Science and Engineering**. v. 273-275, p.149-160, 1999.

FARIA, C. T.; JUNIOR, V. L.; INMAN, D. J.. Modeling and experimental aspects of self-healing bolted joint through shape memory alloy actuators. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 22, p.1581-1594, 2011.

FERNANDES, F. M. B.. **Ligas com Memória de Forma**. Departamento de Ciência dos Materiais / CENIMAT, Universidade Nova de Lisboa, 2006. 35p.

GHORASHI, M.; INMAN, D. J.. Shape memory alloy in tension and compression and its application as clamping force actuator in a bolted joint: Part 2 – Modeling. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, v. 15, p. 589-602, 2004.

HESSE, T.; GHORASHI, M.; INMAN, D. J.. Shape memory alloy in tension and compression and its application as clamping-force actuator in a bolted joint: Part 1 – Experimentation. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 15, p. 577-587, 2004.

INTRINSIC DEVICES INC. **Use of shape memory alloys in high reliability fastening applications**. 2003. Disponível em: <<http://www.intrinsicdevices.com/history.html>>. Acesso em: 15 de dezembro de 2011.

JANOCHA, H.. **Adaptronics and smart structures: basics, materials, design and applications**, Springer, New Work, United States, 2007.

KARDAS, D.; RUST, W.; POLLEY, A.; FABIAN, T.. The use of shape memory alloys offers the promise of better functioning in cochlear implants. Spotlight on engineering simulation in the biomedical industry. **ANSYS Advantage: Excellence in engineer simulation**, v. 1, 2007.

LA CAVA, C. A. P. L.; SILVA, E. P.; MACHADO, L. G.; PACHECO, P. M. C. L.; SAVI, M. A.. Modelagem de um dispositivo de pré-carga com memória de forma para juntas flangeadas. 2000, Rio de Janeiro. **Anais. V CONGRESSO NACIONAL EM ENGENHARIA MECÂNICA – CONEM**, 2000. 8p.

LABRECQUE, C.; BRAUNOVIC, M.; TERRIAULT, P.; TROCHU, F.; SCHETKY, M.. Experimental and theoretical evaluation of the behavior of a shape memory alloy Belleville washer under different operating conditions. **42nd IEEE Holm Conference on Electrical Contacts Joint with the 18th International Conference on Electrical Contacts**, Chicago, United States, p. 195-204, 1996.

LAGOUDAS, D. C.. **Shape Memory Alloys: Modeling and Engineering Applications**. Texas: Springer, 2008. 446p.

LIANG, C.; ROGERS, CA.. One dimensional thermomechanical constitutive relations for shape memory materials. **Journal of Intelligent Materials Systems and Structures**. v. 1, p. 207-234, 1990.

SILVA, N. J. . **Estudo do Comportamento Termomecânico de uma Liga Ni-Ti com Memória de Forma Usando Análise Dinâmico-Mecânica (DMA)**. 2009. 113f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

NORTON, R. L.. **Projetos de Máquinas: uma abordagem integrada**. 2 ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora S. A., 2006. 738-742p.

OLIVEIRA, B. A.. **Desenvolvimento de um Isolador de Vibração Pseudoelástico**. 2008. 95f. Dissertação (Mestrado) – Departamento de

Engenharia Mecânica da Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília - UnB, Brasília.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M.. **Shape Memory Materials**. 1ª ed. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1998. 284p.

PAIVA, A.. **Modelagem do Comportamento Termomecânico das Ligas com Memória de Forma**. 2004. 113f. Tese. Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro.

PAIVA, A.; SAVI, M. A.. **An overview of constitutive models for shape Memory alloys**, Mathematical Problems in Engineering, Hindawi Publishing Corporation, v. 2005, p.1-30, 2005.

PEAIRS D. M.; PARK G.; INMAN D. J.. Practical issues of activating self-repairing bolted joints. **Smart Materials and Structures**, v. 13, p. 1414–1423, 2004.

REIS, R. P. B.. **Desenvolvimento de um equipamento para caracterização térmica de atuadores de Ligas com Memória de Forma usando o efeito termoelétrico**. 2010. 57 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

ROGERS, C. A.. **Intelligent Materials**. Scientific American, 1995. 122-127p.

ROGERS, C. A.; LIANG, C.. Design of Shape Memory Alloy Springs with Applications in Vibration Control. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**. v. 8, p. 314-322, 1997.

SCHNORR. **Handbook for Disc Springs**, 2003. Disponível em: <<http://www.schnorr.com>> acesso em: 11 de novembro de 2011 às 12:03.

SEMIÃO, L. A. P.. **Utilização de Ligas com Memória de Forma no controle de vibrações em Estruturas Inteligentes de Engenharia Civil**. 2010. 63f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Civil - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa.

SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R.; BUDYNAS, R. G.. **Projeto de Engenharia Mecânica**. 7 ed. São Paulo: Bookman Companhia Editora S. A., 2006. 526p.

SKF Equipaments. **Bolt-tightening Handbook**. Linear Motion & Precision Technologies. France, April 2001.

SILVA, A. F. C.. **Desenvolvimento de um dedo robótico acionado Com Memória de Forma por atuador de liga**. 2011. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

SILVA, J. A. B.. **Análise de sistema de controle de vibração em máquinas rotativas utilizando atuadores formados por Ligas com Memória de Forma**. 2009. 151f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Tecnologia, Universidade Federal do Pará, Belém.

SINTEF, PETROLEUM RESEARCH. **Flanges (bolted connections): pre-force control, leakage control and increased performance**. PROJECT PROPOSAL, 2000.

SODERBERG O., KETO-TOKOI J., HAIMI E., ANTTILA J., LINDROOS V.K.. Compressive Training of the Shape Memory Alloy Washer. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 6, p. 517-520, 1997.

SPEICHER M.; HODGSON D. E.; DESROCHES R.; LEON R. T. Shape Memory Alloy Tension/Compression Device for Seismic Retrofit of Buildings. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, p.746–753, 2009.

SPEICHER , M.. **Cyclic testing and assessment of shape memory alloy recentering systems**. 2010. 271f Thesis (Doctor) - Philosophy in the School of Civil and Environmental Engineering, Georgia Institute of Technology, EUA.

STOECKEL, D.; BONSIGNORE, C.; DUDA, S. A.. Survey of stent designs. **Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies**, v.11, p.137-147, 2002.

TANAKA, K., KOBAYASHI, S., SATO, Y.. Thermomechanics of transformation pseudoelasticity and shape memory effects in alloys. **International Journal of Plasticity**, v. 2, p. 59-72, 1986.

TRAVASSOS, G. D.. **Desenvolvimento de um Parafuso Superelástico**. Trabalho de conclusão de Curso (TCC). 2010. 17f. Unidade Acadêmica de

Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Campina Grande, VI Jornada de trabalho de conclusão curso, Campina Grande.

VILLARINHO, D. J.; SCHAEFFER, L.; SAUERESSIG, M. G.; DE MACEDO, B. R.; BALDISSERA, D.; MACEDO NETO, A. V.. Liga com memória de forma: estudo preliminar do grampo de judet de nitinol e sua possível aplicação em tórax instável. **Revista Científica Hospital de Clínicas de Porta Alegre e Faculdade de Medicina da Universidade Federal do Rio Grande do SUL – HCPA**, v. 30, p.43-48, 2010.

WILLIAMS E. A.; SHAW, G.; ELAHINIA, M.. Control of an automotive shape memory alloy mirror actuator, **Mechatronics**, v. 20, p. 527–534, 2010.

ZHANG X; NIE J.; HOU, G.. Development of anti-loosening nuts using shape memory alloys. **Materials Science Forum**, v. 327-328, p. 35-38, 200.

ZHAO, X.; YAN, X.; YANG, Y.; XU, H.. Wide hysteresis Ni-Ti (Nb) shape memory alloys with low Nb content (4.5 at.%). **Materials Science and Engineering A**, v. 438–440, p. 575–578, 2006.

ZURBITU, J., KUSTOV, S., ZABALETA, A., CESARI, E., URREKOETXEA, J.. Thermo-mechanical behavior of Ni-Ti at impact. **Journal Physical Sciences, Engineering and Technology**, v. 2, p. 5-15 , 2010.

YAHIA L. **Shape Memory Implants**. Texas: Springer, 2000. 349p.