



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMIÁRIDO  
CAMPUS CARAÚBAS  
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RODRIGO RODRIGUES NOGUEIRA

**FABRICAÇÃO DE UM ATUADOR DE LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA  
TIPO PORCA CASTELO**

CARAÚBAS - RN  
2014

RODRIGO RODRIGUES NOGUEIRA

**FABRICAÇÃO DE UM ATUADOR DE LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA  
TIPO PORCA CASTELO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado a Universidade Federal Rural  
do Semiárido – UFRSA, Campus  
Caraúbas para obtenção do título de  
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Msc. Jackson de Brito  
Simões – UFRSA

CARAÚBAS - RN  
2014

**O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade de seus autores**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
**Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)**  
**Setor de Informação e Referência**

N778f Nogueira, Rodrigo Rodrigues.

Fabricação de um atuador de ligas com efeito memória de forma tipo porca castelo./ Rodrigo Rodrigues Nogueira -- Mossoró, 2014.

42f.: il.

Orientador: Prof. Me. Jackson de Brito Simões

Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Pró-Reitoria de Graduação.

1. Engenharia mecânica. 2. Atuador tipo porca. 3. Porca castelo. 4. Ligas de memória de forma. I. Título.

RN/UFERSA/BCOT /390-14

CDD: 620

Bibliotecária: Vanessa Christiane Alves de Souza Borba  
CRB-15/452

RODRIGO RODRIGUES NOGUEIRA

**FABRICAÇÃO DE UM ATUADOR DE LIGAS COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA  
TIPO PORCA CASTELO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado a Universidade Federal Rural  
do Semiárido – UFRSA, Campus  
Caraúbas para obtenção do título de  
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

APROVADO EM: 06 / 03 / 2014

BANCA EXAMINADORA

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Jackson de Brito Simões - UFRSA  
Presidente

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Ana Claudia de Melo Caldas Batista - UFRSA  
Primeiro Membro

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Msc. Walber Medeiros Lima - UFRSA  
Segundo Membro

A **Deus**, por estar sempre ao meu lado, me guiando mesmo quando estou me distanciando, Reforçando minha fé e renovando minhas forças.

A **Maria Rosalina**, minha mãe, que sempre me apoiou incondicionalmente, fazendo tudo para que eu atinja minhas metas.

A **Francisco Rodrigues**, meu pai, por ser o maior exemplo de perseverança, trabalho e coragem que se pode ter.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus, Pai Celestial, pelo discernimento e oportunidades concebidos a mim. Tuas bênçãos e graças durante todo o caminho.

Aos meus pais, Maria Rosalina e Francisco Rodrigues, que sempre me incentivaram em minha formação, durante tempo integral.

Aos meus irmãos Ricardo e Roberta, que sempre me deram suporte, estando sempre ao meu lado durante esses anos.

À minha família, tios, primos, avós, em especial à Kaiser Henrique, que sempre torceram por meus estudos.

À Jackson Simões, meu orientador, por todo o suporte, trabalho, disponibilidade, apoio, incentivo, críticas construtivas e elogios que contribuíram de forma direta para com este trabalho.

Aos amigos Carlos Augusto, Junior Miranda, Paulo Victor, Thiago Rocha, Yolli Nunes e Isabel Samara, companheiros de estudos durante todos esses semestres e presentes em vários momentos importantes nesse período de graduação.

À todos os amigos com quem compartilhei momentos de estudo.

À todos os professores da UFERSA, que me passaram conhecimentos, contribuindo assim para minha formação acadêmica.

Aos professores de Engenharia Mecânica, que sempre estimulam seus alunos, com entusiasmo e satisfação.

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica:  
a vontade”.*

*Albert Einstein*

## RESUMO

O presente trabalho trata do desenvolvimento e fabricação de um tipo atuador autotravante, modelo Porca Castelo, de Ligas de Memória de Forma (LMF) de Cu-Al-Ni, objetivando prevenir o afrouxamento. A força de aperto transversal das porcas fabricadas a partir de LMF nos parafusos será mantida através dos fenômenos associados a estas previne o afrouxamento de uniões aparafusadas devido a vibrações. LMF possuem um comportamento completamente diferente dos materiais clássicos. Uma vez que as ligas convencionais de aço apresentam deformações elásticas da ordem de 0,20%, nas LMF essa deformação pode chegar a 10% no estado austenítico em tração uniaxial. Neste projeto foi considerado para melhores resultados de força antiafrouxamento, a geometria da porca, que já é utilizada na literatura com a finalidade de prevenir falhas oriundas da perda de aperto, como também os benefícios proporcionados pelos fenômenos associados às LMF. A partir da definição da LMF à base de Cu-Al-Ni e da geometria da porca sextavada tipo Castelo, foi obtido por meio de processos de fundição e usinagem respectivamente, o atuador LMF tipo Porca Castelo com efeito autotravante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Atuador, Porca Castelo, Ligas de Memória de Forma, Liga Cu-Al-Ni.

## **ABSTRACT**

The present paper comes to the development of a self-locking actuator type, model Castle Nut, of Shape Memory Alloys (SMA) Cu-Al-Ni, aiming to prevent loosening. The transversal clamping force of the SMA nuts on the bolts will be kept from the phenomena associated with these prevents loosening of bolted joints due to vibration. The SMA possess a completely different behavior of classical material. Once the conventional alloys exhibit elastic deformation of 0.20%, in LMF deformation can reach 10% in the austenitic state in uniaxial stress. This project were considered for better results from anti-loosening force, the geometry of the nut, which is already used in the literature in order to prevent failures arising from loss of grip as well as the benefits provided by the phenomena associated with Shape Memory Alloys. From the definition of LMF-based Cu-Al-Ni and the hex nut Castle geometry was obtained by means of casting processes of foundry and grind respectively, the actuator type LMF Castle Nut with self-locking effect.

**KEY WORDS:** Actuator, Castle Nut, Shape Memory Alloys, Cu-Al-Ni Alloy.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 – Estrutura cristalina de Ligas com Efeito de Memória de Forma. ....                                                                                                                                                                         | 16 |
| Figura 2 – Aspectos estruturais das Ligas com Efeito Memória de Forma. ....                                                                                                                                                                           | 16 |
| Figura 3 – Estruturas cristalinas associadas às fases (a) Austenita e (b) Martensita vista segundo o plano (001). ....                                                                                                                                | 17 |
| Figura 4 – Diagrama tensão-deformação do fenômeno de Superelasticidade.....                                                                                                                                                                           | 18 |
| Figura 5 – Diagrama tensão-deformação do Efeito de Memória de Forma Simples. ....                                                                                                                                                                     | 20 |
| Figura 6 – Fios de aparelho ortodôntico. ....                                                                                                                                                                                                         | 21 |
| Figura 7 – Esquema do funcionamento de Stent de LMF para desobstrução de artéria. ....                                                                                                                                                                | 22 |
| Figura 8 – Modelo básico de uma asa de avião com flap. ....                                                                                                                                                                                           | 23 |
| Figura 9 – Flaps com fios de Ligas com Efeito Memória de Forma.....                                                                                                                                                                                   | 23 |
| Figura 10 – Tipos de Porcas. ....                                                                                                                                                                                                                     | 25 |
| Figura 11 – (a) Porca Castelo sem Coroa. (b) Porca Castelo com Coroa Baixa.....                                                                                                                                                                       | 25 |
| Figura 12 – Tabela com valores de dimensões máximas e mínimas da porca tipo Castelo M6 segundo a norma DIN 935-1 – 1987. ....                                                                                                                         | 26 |
| Figura 13 – Porca Castelo com cupilha.....                                                                                                                                                                                                            | 27 |
| Figura 14 – (a) vista superior de uma Porca Castelo. (b) vista superior de uma Parafuso. (c) Porca Castelo, deformada após imposição de temperatura, aplicada no parafuso. (d) Recuperação da forma da porca gerando a força $\sigma$ de aperto. .... | 28 |
| Figura 15 – Sequência metodológica empregada no desenvolvimento do trabalho. ....                                                                                                                                                                     | 29 |
| Figura 16 – Porca Castelo M6 sem coroa de LMF e suas dimensões. ....                                                                                                                                                                                  | 30 |
| Figura 17 – Balança de precisão <i>Shimadzu</i> . ....                                                                                                                                                                                                | 31 |
| Figura 18 – Fluxograma do processo de fabricação empregado para obtenção dos atuadores de LMF. ....                                                                                                                                                   | 32 |
| Figura 19 – Tarugo cilíndrico de Cu-Al-Ni. ....                                                                                                                                                                                                       | 32 |
| Figura 20 – Atuador de LMF tipo porca Castelo após falha durante o processo de Usinagem. ....                                                                                                                                                         | 35 |

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dimensões do tarugo para fabricação do atuador LMF tipo porca Castelo.

.....33

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

|                    |                                                             |
|--------------------|-------------------------------------------------------------|
| Cu                 | Cobre                                                       |
| Al                 | Alumínio                                                    |
| Ni                 | Níquel                                                      |
| Mn                 | Manganês                                                    |
| Ti                 | Titânio                                                     |
| LMF                | Liga de Memória de Forma                                    |
| EMF                | Efeito Memória de Forma                                     |
| CCC                | Cúbica de Corpo Centrado                                    |
| CFC                | Cúbica de Face Centrada                                     |
| TCC                | Tetragonal de Corpo Centrado                                |
| EMFS               | Efeito Memória de Forma simples                             |
| EMFD               | Efeito Memória de Forma Duplo                               |
| $A_i$              | Temperatura inicial da fase Austenita                       |
| $A_f$              | Temperatura final da fase Austenita                         |
| $M_i$              | Temperatura inicial da fase Martensita                      |
| $M_f$              | Temperatura final da fase Martensita                        |
| $M^+$              | Forma variante da Martensita, quando submetida à tração     |
| $M^-$              | Forma variante da Martensita, quando submetida à compressão |
| $\varepsilon_R^T$  | Deformação plástica residual                                |
| $\varepsilon_{rc}$ | Deformação residual                                         |

## SUMÁRIO

|                                                                   |           |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>                                        | <b>12</b> |
| 1.1. JUSTIFICATIVA.....                                           | 13        |
| 1.2. OBJETIVO GERAL .....                                         | 13        |
| 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                  | 14        |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                              | <b>15</b> |
| 2.1. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA.....                               | 15        |
| 2.1.1. FENÔMENOS ASSOCIADOS À LMF .....                           | 18        |
| 2.1.2. APLICAÇÕES .....                                           | 20        |
| 2.2. TIPOS DE PORCAS .....                                        | 24        |
| 2.3. ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO .....                         | 27        |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>                                        | <b>29</b> |
| 3.1. SELEÇÃO DA GEOMETRIA DO ATUADOR TIPO PORCA.....              | 29        |
| 3.2. SELEÇÃO DA LMF .....                                         | 30        |
| 3.3. FABRICAÇÃO DO ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO .....           | 31        |
| 3.4. USINAGEM DO ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO M6 SEM COROA..... | 33        |
| <b>4. RESULTADOS .....</b>                                        | <b>35</b> |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                         | <b>37</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                          | <b>38</b> |
| <b>ANEXOS .....</b>                                               | <b>40</b> |

## 1. INTRODUÇÃO

As Ligas de Efeito de Memória de Forma (LMF) são um grupo de materiais metálicos que possuem a capacidade de recuperar uma forma previamente definida e/ou seu tamanho inicial após imposição de um campo de temperatura ou tensão. A fase de alta temperatura, mais quente, denomina-se austenita e a fase de baixa temperatura, mais fria, denomina-se martensita (LAGOUDAS, et al. 2008). Esses metais quando submetidos a uma deformação aparentemente plástica, numa temperatura relativamente baixa (fase martensítica), e posteriormente expostos a uma temperatura mais alta (fase austenítica) retornam uma sua configuração inicial. Apesar de existir uma grande variedade de LMF apenas as ligas a base de Ni-Ti, Ni-Ti-Cu e Cu-Al-Ni possuem interesse comercial, por apresentam propriedades e características mais expressivas (OTSUKA e WAYMAN, 1998). As ligas Cu-Al-Ni, devido a seu baixo custo e ainda por apresentar características expressivas, também possuem interesse comercial relevante.

O fenômeno associado à transformação martensítica que ocorre devido a um carregamento mecânico, é chamada de superelasticidade (SIMÕES, 2012) esse termo se dá, devido à capacidade que as LMF possuem de apresentarem deformações elásticas da ordem de 10% em tração uniaxial. As ligas tradicionais de aço, por exemplo, deformam em regime elástico 0,2% aproximadamente. Esse efeito superelástico não linear presente nas LMF apresentam transformação martensítica termoelástica reversível. As características e propriedades das LMF fazem com que esses materiais possam ser vislumbrados na utilização de elementos de fixação tais como: porcas, arruelas e parafusos. Sendo assim, a investigação do potencial em diversas aplicações se faz necessário.

Na engenharia uma forma de fixação comumente utilizada é a tipo porca e parafuso, estando presentes em diversas aplicações, muitas delas, submetidas a vários tipos de carregamentos tais como: tração, torção, flexão e carregamentos combinados, que favorecem falhas neste tipo de união. Uma falha muito comum em uniões aparafusadas é o afrouxamento ao longo do tempo, devido a carregamentos cíclicos e vibrações, o que ocasionam perdas, dentro das mais diversas aplicações. Uma alternativa para minimizar o efeito de afrouxamento provocado por vibrações

mecânicas, por exemplo, seria a utilização de atuadores LMF tipo porca, que promete reduzir o afrouxamento, e consequentemente a falha, neste tipo de união.

### 1.1. JUSTIFICATIVA

As falhas por afrouxamento em juntas aparafusadas devido a cargas cíclicas, vibrações, perda de torque e de aperto são identificadas de forma constante em mecanismos das mais diversas aplicações que utilizam este tipo de união. Essas falhas podem causar prejuízos financeiros, como perda de desempenho, gastos com manutenção frequente e até paralisação de uma produção fabril. Dependendo do meio em que se está trabalhando pode provocar danos ao meio ambiente devido a percas de pressão em tubulações, vazamento fluidos, dentre outros. Além disso, falhas devido a afrouxamento de juntas podem ainda promover sérios acidentes pondo em risco inclusive a vida de pessoas. Para ter-se uma ideia, a grande maioria dos *recalls* promovidos pelas montadoras automotivas está relacionada a este tipo de união, como os feitos pela *General Motors do Brasil*® (UOL CARROS, 2014) e pela *Volkswagen*® (FOLHAUOL, 2013), no *Agile* e *Classic* e na *Amarok*, respectivamente. O estudo e projeto de um atuador inteligente tipo porca (fabricado a partir de ligas de efeito de memória de forma), pode minimizar de forma significativa o afrouxamento, uma vez que o elemento atuador, pode interagir com o meio, adaptando-se a aplicação e consequentemente mantendo o aperto.

### 1.2. OBJETIVO GERAL

As uniões aparafusadas são dimensionadas e projetadas para manter a força de aperto que foi aplicada inicialmente até o fim de sua vida útil, com mínimas variações. Entretanto, carregamentos mecânicos como tração, torção, flexão, cisalhamento e carregamentos combinados provocam falhas nessas juntas, provocando assim o afrouxamento da mesma, e consequentemente a falha. As falhas em uniões parafusadas são decorrentes devido à cargas estáticas (pouco frequente) e a cargas variáveis (responsáveis por 90% do total das falhas), que são facilitadores da concentração de tensões. Sendo assim, minimizar falhas neste tipo de união é extremamente necessário uma vez que se pode para aumentar a vida útil

da junta. Este trabalho tem como objetivo geral a fabricação de um atuador LMF tipo porca objetivando manter o aperto de juntas aparafusadas e diminuindo assim falhas por afrouxamento através do efeito memória de forma e superelasticidade.

### 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definição da composição química LMF utilizada;
- Definição do tipo da porca para fabricar o atuador, buscando os tipos convencionais existentes na literatura;
- Fabricação da LMF no departamento de engenharia mecânica da Universidade Federal de Campina Grande via processo de fundição *Plasma Skull Push Pull, PSPP*, que é um processo de fundição que se dá por fusão dos materiais via tocha de plasma aplicada;
- Fabricação do atuador tipo porca na oficina mecânica da engenharia mecânica da Universidade Federal Rural do Semiárido campus Mossoró.

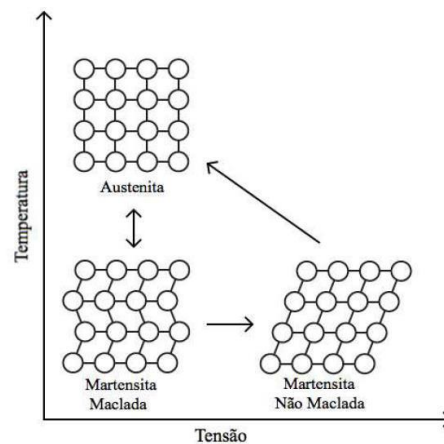
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é realizada uma breve revisão dos conhecimentos mais relevantes para o entendimento desse trabalho.

### 2.1. LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA

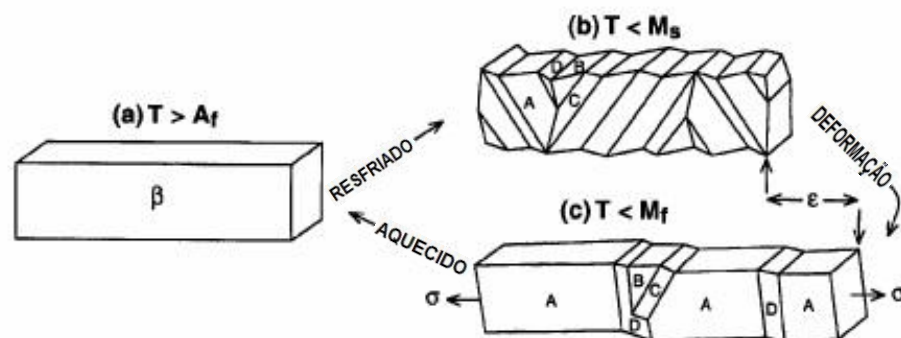
O termo Liga de Efeito de Memória de Forma (LMF) foi designado a um grupo de materiais metálicos que possuem a capacidade de recuperação da sua forma ou tamanhos originais, após uma deformação “pseudoplástica”, quando a imposição de um campo de temperatura (LAGOUDAS, *et al.* 2008). As transformações de fases induzidas no interior do material são responsáveis pelo fenômeno do efeito memória de forma (EMF). Fisicamente, o EMF está relacionado à transformação martensítica cristalograficamente reversível (MINETTO, 2010). As LMF também podem ser definidas como materiais onde existe formação da fase martensite termoelástica. Nesse caso a liga sofre uma transformação martensítica em sua estrutura cristalina que viabiliza a deformação por maclagem, abaixo da temperatura de transformação de fase austenítica ( $A_f$ ), para a fase martensítica ( $M_s$ ), onde em temperatura baixa ou sob estado de tensões, a fase martensite é estável. Tal fenômeno pode ser observado na Figura 1. Quando aquecida até uma temperatura maior que a temperatura máxima da fase Martensítica ( $T > M_f$ ), a estrutura maclada passa a fase ausenita, onde a deformação sofre um processo de reversão á alta temperatura, e retorna a sua forma inicial, conforme o processo ilustrado na Figura 2.

Figura 1 – Estrutura cristalina de Ligas com Efeito de Memória de Forma.



Fonte: REIS, 2013.

Figura 2 – Aspectos estruturais das Ligas com Efeito Memória de Forma.



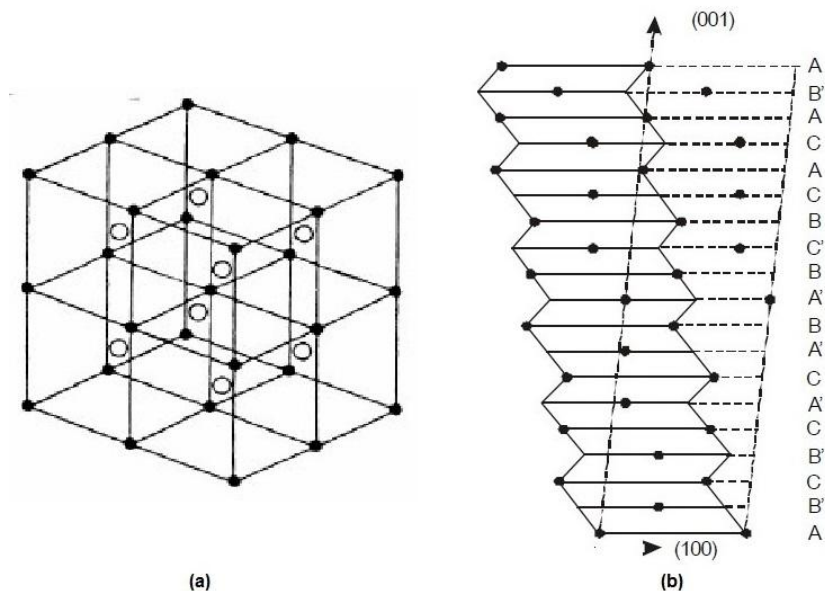
Fonte: Adaptado de FERNANDES, 2003.

O sistema Cu-Al-Ni apresenta temperaturas termoelásticas altas, que podem atingir 200°C (GAMA, 2003). O desenvolvimento de tratamentos térmicos apropriados para a obtenção das características de memória de forma requer um estudo detalhado, pois influi consideravelmente nas propriedades das LMF e muitos trabalhos vêm sendo realizados nesse sentido.

As duas fases cristalográficas distintas, austenita e martensita, apresentam propriedades distintas. A austenita, de estrutura cristalina cúbica de corpo centrado (CCC), tem como característica grande estabilidade e consequentemente um elevado módulo de elasticidade. Tal estrutura é representada na Figura 3 (a). A

martensita é dependente do tipo de transformação ocorrida, podendo transforma-se em domínios com estrutura cristalina: monoclínica (martensita não maclada ou induzida por temperatura) ou ortorrômbica (martensita maclada ou induzida por tensão), onde esta última é mais explorada comercialmente (GAMA, 2003). Tal estrutura, que pode ser visualizada na Figura 3 (b) no plano (001), apresenta-se sob forma lenticular ou de plaquetas alongadas e é denominada martensíte (Fernandes, 2003).

Figura 3 – Estruturas cristalinas associadas às fases (a) Austenita e (b) Martensita vista segundo o plano (001).



Fonte: Adaptado de GAMA, 2003.

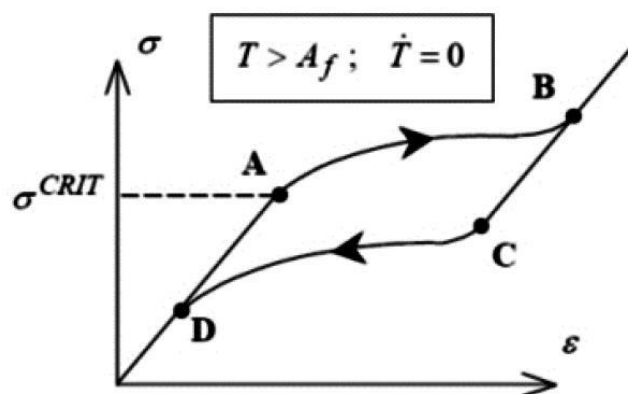
As transformações cristalográficas que lhes dão origem estão associadas a uma transformação martensítica particular que possui a característica de ser termoelástica e reversível (OTSUKA e WAYMAN, 1998) onde, tanto essa deformação (martensita-austenita) quanto à deformação austenita-martensita ocorrem não devido à difusão de átomos, mas por deformações cisalhantes na rede cristalina, envolvendo pequenos deslocamentos atômicos ou distorção da rede. As fases de martensite termoelástica são caracterizadas pela baixa energia das interfaces de suas redes cristalinas e elevada mobilidade das mesmas quando sujeitas a pequenas variações de temperatura e/ou tensões.

### 2.1.1. FENÔMENOS ASSOCIADOS À LMF

O comportamento associado à transformação austenita-martensita-austenita das LMF envolve três fenômenos termomecânicos: A superelasticidade ou efeito pseudoelástico ou ainda pseudoelasticidade, o efeito memória de forma simples (EMFS) e o Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD).

A superelasticidade é a capacidade que uma LMF tem de recuperar sua forma após sofrer deformações a partir de carregamento mecânico a uma temperatura acima da temperatura final de transformação austenítica ( $A_f$ ). Quando uma tensão (de tração, por exemplo) é aplicada atinge um valor de tensão crítica ( $\sigma_{crit}$ ), a estrutura apresenta um platô de deformação onde a LMF passa a apresentar fase martensítica, como ilustrado na Figura 4. Quando a tensão é retirada, é iniciado o processo inverso, onde a estrutura cristalina volta à fase austenita. Segundo Paiva, acima da temperatura ( $A_f$ ) a fase martensítica é instável (2004, *apud* SIMÕES, 2012).

Figura 4 – Diagrama tensão-deformação do fenômeno de Superelasticidade.



Fonte: PAIVA, 2004.

As deformações no regime superelástico podem chegar ao patamar de 10% (Ni-Ti) e acontecem a temperatura constante (MINETTO, 2010). Se a LMF não se encontrar numa  $T > A_f$ , mas em uma temperatura intermediária  $A_i < T < A_f$  o fenômeno

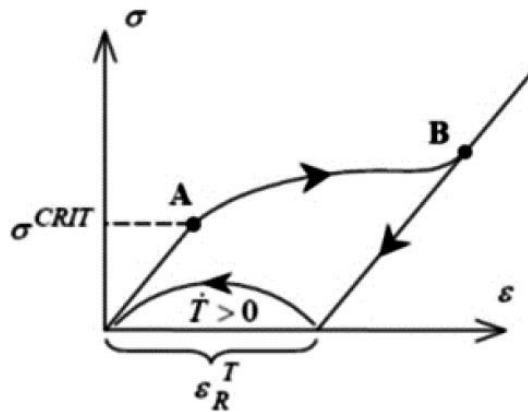
observado seria chamado de pseudoelasticidade parcial, pois a estas temperaturas o material não se encontra 100% austenítico, contendo frações martensíticas em sua rede cristalina (REIS, 2013). Outra propriedade importante que está associada diretamente ao fenômeno de mudança de fase é o aumento de rigidez com o aumento da temperatura (SIMÕES, 2012).

O Efeito Memória de Forma Simples (EMFS), também conhecido por efeito memória de forma “*one-way*” ou efeito de memória de forma unidimensional, consiste na capacidade que as LMF possuem de recuperar de uma deformação “aparentemente plástica”. (OTSUKA e WAYMAN, 1998). Este fenômeno ocorre quando uma deformação é induzida na fase martensítica, abaixo de uma temperatura crítica de transformação martensítica final ( $M_f$ ), na qual a LMF é estável e extremamente maleável. A recuperação se inicia quando o material é aquecido acima da temperatura crítica de transformação austenítica inicial ( $A_s$ ), induzindo a mudança da microestrutura da rede cristalina do material para a fase austenita, que é bem mais rígida. O EMFS recebe essa denominação devido a sua característica de não apresentar, durante a fase de resfriamento, nenhuma alteração em sua forma, ainda que a estrutura sofra uma transformação martensítica direta (SIMÕES, 2012). Quando a LMF sofre a imposição de um novo resfriamento, a liga não irá alterar sua forma espontaneamente.

A Figura 5 ilustra a representação da curva tensão-deformação característica do efeito memória de forma simples (EMFS). Considerando uma amostra submetida a uma temperatura inferior a  $M_f$  e aplicando um carregamento mecânico, tem-se inicialmente uma resposta elástica até que uma tensão crítica  $\sigma_{crit}$  seja alcançada (ponto A), dando início à reorientação da martensita resultando em uma única variante associada à tração  $M^+$  (ou compressão,  $M^-$ ). Durante o processo de reorientação ( $M \rightarrow M^+$ ) o material experimenta grandes deformações (Trecho AB). A partir de B, é observada a resposta elástica da estrutura  $M^+$ . Ao se retirar a carga aplicada a LMF, não há uma nova conversão da estrutura em diversas variantes, mas numa única que é termodinamicamente estável para temperaturas  $T < M_f$  havendo apenas uma pequena recuperação elástica e uma deformação plástica residual  $\epsilon_R^T$ . Para o corpo retornar a sua forma inicial faz-se necessário aquecê-lo a uma temperatura superior à  $A_f$ , onde ocorre a recuperação da deformação residual  $\epsilon_R^T$ . Quando a amostra sofre um resfriamento com temperatura abaixo de  $M_f$ , a

diferença entre a geometria obtida acima da temperatura  $A_f$  e abaixo da temperatura  $M_f$  é insignificante, pois a deformação induzida durante o resfriamento é ordens de grandeza menor que a deformação  $\varepsilon_R^T$  induzida por tensão e recuperada durante o aquecimento (SIMÕES, 2012).

Figura 5 – Diagrama tensão-deformação do Efeito de Memória de Forma Simples.



Fonte: PAIVA, 2004.

O Efeito Memória de Forma Duplo (EMFD) ou Efeito Memória de Forma Reversível envolve a mudança de forma da LMF devido a alterações apenas na temperatura. Este fenômeno proporciona à liga a memorização da forma da estrutura, tanto em baixas quanto em altas temperaturas, que é obtida através de carregamentos cíclicos de carga-descarga acima da temperatura  $A_f$ , ou através de centenas de ciclagens térmicas através do EMFS. Com esse efeito o material pode associar uma geometria previamente estabelecida e distinta a cada temperatura submetida (REIS, 2013).

### 2.1.2. APLICAÇÕES

As características particulares das LMF, como seu comportamento termomecânico e os fenômenos associados a este conferem às ligas grande potencial de utilização que vai desde a área da saúde, como a biomédica e a ortodôntica, até a engenharia, na área aeroespacial e indústria automotiva.

Devido a excelente compatibilidade biomédica das ligas de Ni-Ti, que evita que estas quando em interação com o corpo humano sofram rejeição pelo mesmo, sua excelente resistência à corrosão e devido ainda aos fenômenos da Superelasticidade e EMF, as LMF têm sido utilizadas dentro da indústria de dispositivos médicos, terapêuticos e odontológicos.

Devido a essa compatibilidade, surgiu a primeira aplicação com LMF, datada em 1975, que foram os fios de aparelhos ortodônticos (REIS, 2013), que fios utilizados para correção do posicionamento dentário, que exploram o efeito da Pseudoelasticidade do material. Durante a instalação esses fios são deformados de maneira que haja uma transformação de fase austenita para martensita. Depois de aplicados, em contato com a temperatura bucal, tendem a retornar a fase austenítica original e, portanto, retornar a forma de origem. Como a recomposição da forma original é restrita pela arcada dentária, uma força constante e com mínimo incômodo é aplicada de forma a alinhar os dentes do paciente. A Figura 6 mostra um exemplo desses fios em sua forma original e o fio de LMF já em sua aplicação.

Figura 6 – Fios de aparelho ortodôntico.

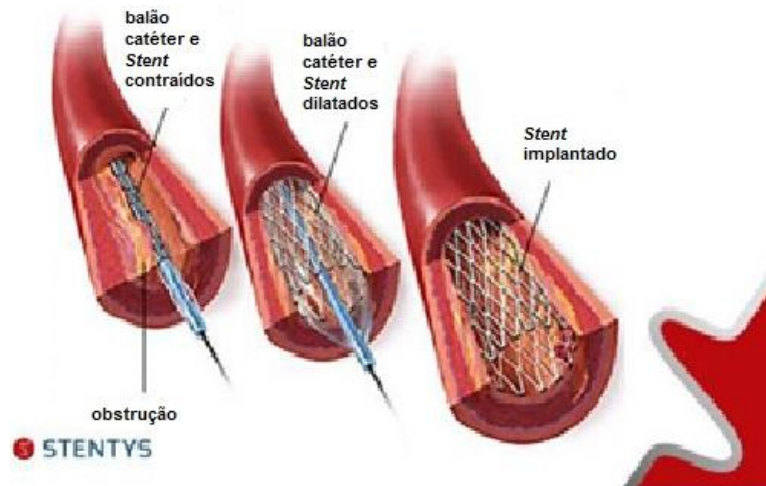


Fonte: Adaptado de DENTALUNICAEORTODONTIA.COM.BR, 2014.

Ainda na área Biomédica, em termos do fenômeno do EMFS das LMF, há a fabricação de *Stents* (termo técnico que indica microestruturas autoexpansíveis) para desobstrução de artérias, como esquematizado na Figura 7. O *Stent* de LMF sofre um tratamento termomecânico em sua fabricação para assumir uma determinada forma, e posteriormente é deformado à baixa temperatura e inserido na

artéria obstruída. Com a temperatura “alta” do corpo humano, o *Stent* retorna a sua forma pré-definida (SIMÕES, 2012).

Figura 7 – Esquema do funcionamento de Stent de LMF para desobstrução de artéria.



Fonte: Adaptado de STENTYS.COM, 2014.

As LMF possuem características que as tornam mais eficientes e eficazes em suas aplicações do que os materiais convencionais. Gerar grandes forças e esforços com um baixo consumo de energia é um fator que despertou bastante interesse nas áreas de engenharia a cerca de tais ligas.

Na indústria aeronáutica a busca por aeronaves mais leves, velozes e a custo menor são prioridades para o avanço, sendo levado em consideração pontos críticos tanto no sentido de redução de custos, quanto na diminuição do consumo de combustível visando à sustentabilidade. Os *flaps*, que são estruturas móveis inseridas nas asas responsáveis por ganho e perda de altitude ou mudança de direção da aeronave, são acionados por extensos sistemas hidráulicos que necessitam de bombas e atuadores, assim elevando o custo da aeronave e o peso. Ligas com EMF são potenciais soluções para tal problema uma vez que suas características poderiam vir a substituir esses elementos, desempenhando a função de forma mais eficiente. A Figura 8 mostra a forma básica dos *flaps*, com sistema hidráulico conectado a um atuador.

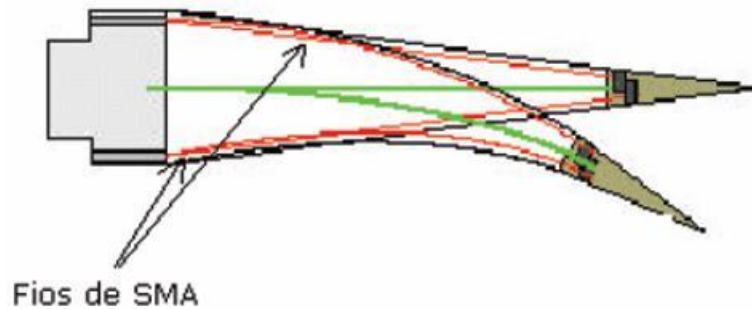
Figura 8 – Modelo básico de uma asa de avião com flap.



Fonte: adaptado de CASTILHO E SILVA, 2011.

Com o uso das LMF, as asas teriam uma nova configuração, com fios de Ligas EMF inseridos nas partes superior e inferior dos *flaps*, como mostra a Figura 9. Assim, com um sistema de aquecimento por corrente elétrica dos fios de LMF a geometria dos *flaps* pode ser controlada (CASTILHO e SILVA, 2011).

Figura 9 – Flaps com fios de Ligas com Efeito Memória de Forma.



Fonte: adaptado de CASTILHO E SILVA, 2011.

Na indústria automotiva, as aplicações de LMF vão desde fatores de segurança de veículos da indústria bélica, como atuador para absorção de impactos em veículos militares. O comportamento da histerese em regime de superelasticidade torna a LMF um sistema eficaz para dissipar impactos e vibrações (LAGOUDAS, 2008). Na área veicular, os atuadores LMF não estão presentes apenas em transportes especiais e militares. Veículos normais, presentes no dia-a-dia, fazem a utilização de Ligas EMF na forma de atuadores como sensores, como por exemplo, para o controle e ajuste de espelhos retrovisores.

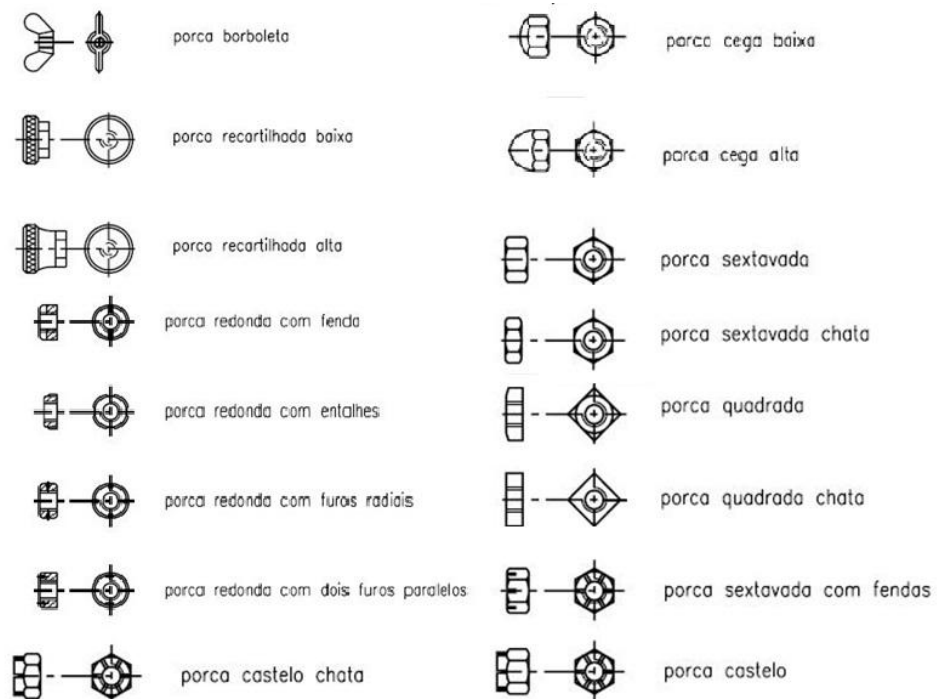
## 2.2. TIPOS DE PORCAS

Porcas são elementos mecânicos de forma prismática ou cilíndrica, geralmente metálicas, com um furo roscado no qual se encaixa um parafuso ou uma barra roscada, estando sempre ligada a estes elementos. Em conjunto com o parafuso, a porca é um acessório amplamente utilizado na união de peças, podendo apresentar vários formatos de acordo com sua aplicação. Existem porcas que servem tanto como elemento de fixação como elemento de transmissão (SOUZA e RAFULL, 2006).

O tipo de rosca também varia de acordo com a aplicação, onde as porcas usadas para fixação possuem rosca com perfil triangular. Porcas com intuito de transmissão podem ter rosca dos tipos trapezoidal, dente-de-serra e redondo. A rosca trapezoidal é utilizada a fim de se obter transmissão de movimento suave e uniforme, sendo bastante utilizada nos órgãos de comando de máquinas operatrizes. A rosca dente-de-serra é usada quando o parafuso exerce grande esforço em um sentido só, como em macacos mecânicos e morsas. A rosca do tipo redondo é utilizada na aplicação parafusos de grande diâmetro e que devem suportar grandes esforços. Ainda há a rosca do tipo quadrada, que caiu em desuso, onde esta era aplicada em parafusos de peças sujeitas a choques e grandes esforços.

As porcas tem sua geometria definida a partir de sua aplicação e utilização, variando de acordo com a necessidade, limitações e resultados requeridos. As porcas mais utilizadas são as porcas do tipo sextavadas, podendo ser encontradas em um vasto campo de aplicações. Porcas que são aplicadas via aperto manual, podem ser do tipo Borboleta ou Recartilhada (alto ou baixo), por exemplo. Certos tipos de porcas apresentam ranhuras próprias para o uso de cupilhas, que são utilizadas para evitar que a porca solte-se quando submetidas a vibrações. As porcas do tipo Castelo são recomendadas quando a porca está sendo submetida a vibrações em sua fixação. A Figura 10 ilustra alguns dos vários tipos de porcas encontrados na literatura.

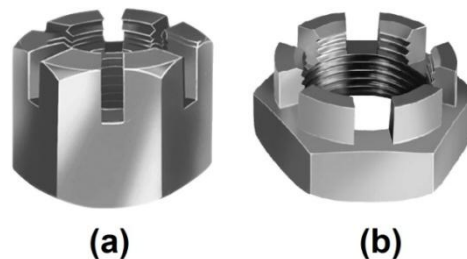
Figura 10 – Tipos de Porcas.



Fonte: Adaptado de FRM TELECURSO 2000, 1995.

As porcas Castelo são porcas hexagonais com seis entalhes radiais, coincidentes dois a dois, que se alinham com um furo no parafuso, de modo que uma cupilha, que é um tipo de grampo de metal, possa ser passada para travar a porca. As porcas Castelo podem ser do tipo Com Coroa ou Sem Coroa. A Figura 11 ilustra tais configurações de porca.

Figura 11 – (a) Porca Castelo sem Coroa. (b) Porca Castelo com Coroa Baixa.

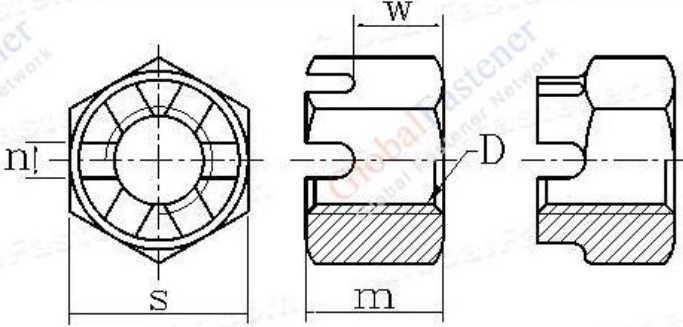


Fonte: Adaptado de CISER.COM.BR, 2014.

Este tipo de porca é utilizado para fixação de parafusos, indicado para linhas automotivas, industriais e uso doméstico. O eixo ou parafuso de aplicação da porca pode possuir um orifício, que no alinhamento com uma das ranhuras da porca Castelo irá transpassar uma cupilha. Esse tipo de porca é bastante utilizada em terminais de direção de alguns carros e nos eixos dianteiro e traseiro das motos.

Como todo elemento já existente na literatura, existe normas que regem a fabricação de tais peças, que tem por objetivo manter um padrão na produção destes elementos garantindo assim, que determinada peça com determinados padrões seja aplicável de acordo com suas especificações. A Figura 12 ilustra a tabela contendo os padrões definidos. A tabela completa pode ser verificada em anexo.

Figura 12 – Tabela com valores de dimensões máximas e mínimas da porca tipo Castelo M6 segundo a norma DIN 935-1 – 1987.



unidade: mm

| Tamanho da rosca<br>D | P | m   |      | n    |     | s   |      | w   |     | Peso t<br>(7.85kg/dm <sup>3</sup> )<br>kg/1000 pieces |
|-----------------------|---|-----|------|------|-----|-----|------|-----|-----|-------------------------------------------------------|
|                       |   | max | min  | max  | min | max | min  | max | min |                                                       |
| M6                    | 1 | 7.5 | 7.14 | 2.25 | 2   | 10  | 9.78 | 5   | 4.7 | 3.16                                                  |

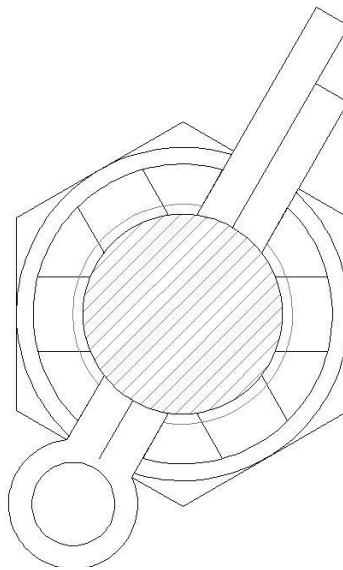
Fonte: Adaptado de GLOBALFASTENER.COM, 2014.

A DIN ou Instituto Alemão para Normatização é a organização nacional da Alemanha para padronização e representante da Organização Internacional para Padronização (ISO) no país.

### 2.3. ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO

O atuador LMF tipo porca Castelo foi escolhido visando explorar o efeito de memória de forma e fixar/manter um pré-aperto da junta pelo EMFS e explorar após o aquecimento o fenômeno da Superelasticidade. A definição da geometria se deu a partir do estudo dos tipos de porcas convencionais existentes na literatura, buscando o tipo mais eficaz quando está se tratando da aplicabilidade de uniões aparafusadas submetidas a vibrações e carregamentos cíclicos combinados que venham a causar o afrouxamento. A porca Castelo convencional com o auxílio da cupilha que transpassa os entalhes característicos da porca é o tipo empregado com mais frequência quando se trata de aplicações de porcas travantes. A Figura 13 esquematiza a aplicação da porca Castelo com o auxílio da cupilha.

Figura 13 – Porca Castelo com cupilha.

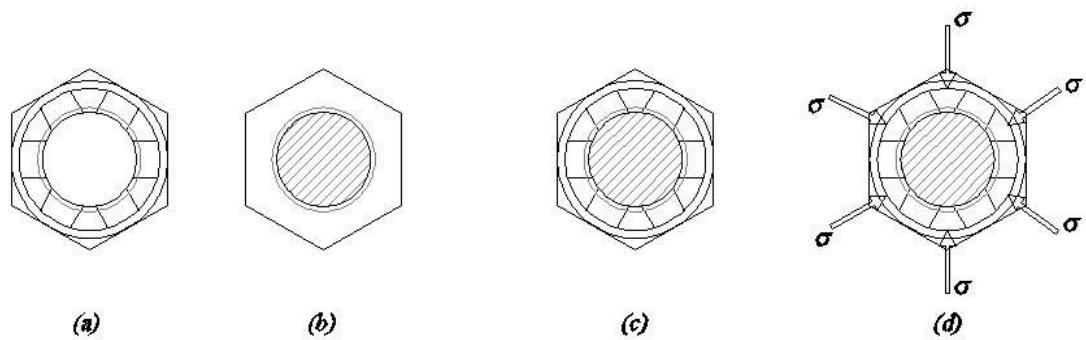


Fonte: Autoria Própria.

Com os efeitos proporcionados a partir dos fenômenos de Memória de Forma e Superelasticidade, tais entalhes serão responsáveis pelo efeito autotravante da porca. Uma vez que a porca é resfriada, sofre a deformação e é aplicada. Quando retorna à fase aquecida (temperatura ambiente) recupera-se da deformação, retornando a sua forma original e mantendo o aperto, assim dispensando a utilização de cupilhas, que por vezes tem sua utilização limitada devido ao difícil

acesso. Uma representação do efeito travante desse atuador é ilustrado na sequência que pode ser observada na Figura 14.

Figura 14 – (a) vista superior de uma Porca Castelo. (b) vista superior de uma Parafuso. (c) Porca Castelo, deformada após imposição de temperatura, aplicada no parafuso. (d) Recuperação da forma da porca gerando a força  $\sigma$  de aperto.



Fonte: Autoria Própria.

Desta forma pode-se obter uma força de aperto nas roscas do parafuso através do EMF evitando o afrouxamento da junta aparafusada.

### 3. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido tendo sua 1ª etapa no laboratório provisório de matérias e processos de fabricação da UFERSA/Caraúbas, uma 2ª etapa ocorreu no Laboratório Multidisciplinar de Materiais e Estruturas Ativas (LaMMEA) da UFCG, e última etapa na oficina mecânica da UFERSA/Mossoró. A metodologia empregada seguiu o fluxograma ilustrado na Figura 15.

Figura 15 – Sequência metodológica empregada no desenvolvimento do trabalho.



Fonte: Autoria Própria.

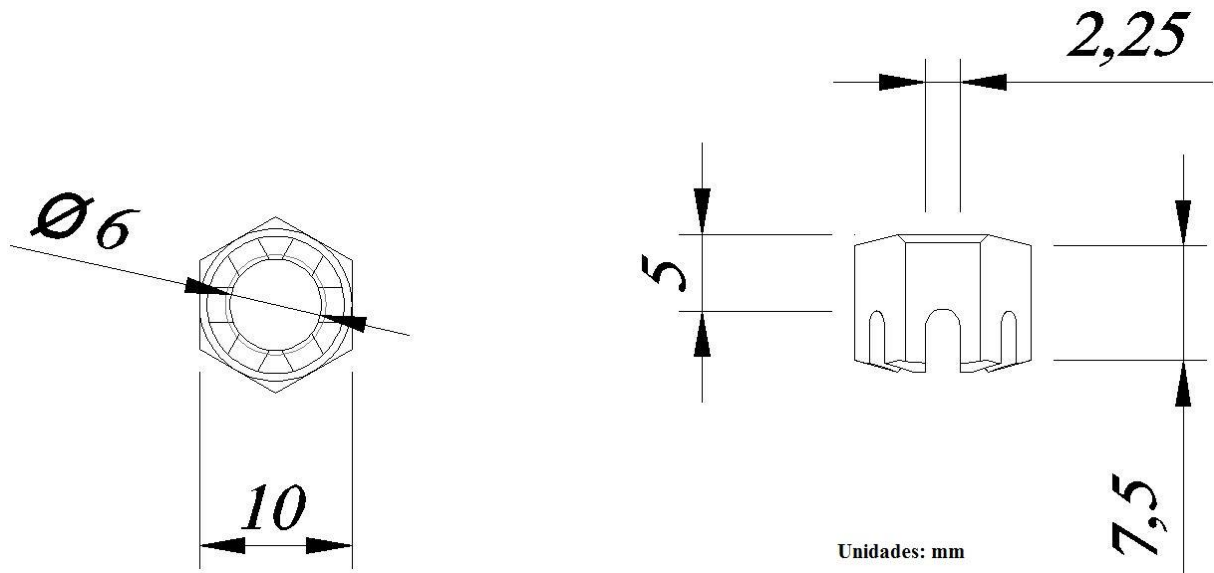
#### 3.1. SELEÇÃO DA GEOMETRIA DO ATUADOR TIPO PORCA

A partir da necessidade de se obter um elemento de fixação constituído por uma liga com propriedades de EMF, objetivando minimizar as falhas por afrouxamento, foi escolhida uma geometria que fosse propícia à aplicação, tendo também como função, de ser eficiente quando se trata em manter a força de aperto requerida aplicada inicialmente. Analisando os tipos de porcas convencionais já existentes na literatura, as porcas tipo Castelo exercem em sua aplicação, o papel de minimizar e até impedir o movimento entre porca e parafuso, sendo muitas vezes usada com o auxílio da cupilha que transpassa o parafuso, evitando assim o afrouxamento.

Para o projeto e a fabricação do atuador foi escolhido um atuador LMF do tipo Porca Castelo M6 sem coroa, que possui uma base com geometria sextavada. A união das características associadas à Porca Castelo M6 com as propriedades das

LMF proporcionará um atuador inteligente que poderá ser utilizado em uniões que utilizam parafuso com elemento de fixação. Ainda a geometria escolhida possibilitará uma fabricação mais fácil devido ao processo de usinagem. A Figura 16 apresenta o projeto do atuador a ser fabricado.

Figura 16 – Porca Castelo M6 sem coroa de LMF e suas dimensões.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2. SELEÇÃO DA LMF

Para o projeto e fabricação do atuador tipo porca Castelo M6 sem coroa, o principal critério de seleção da LMF foi a escolha de uma LMF de fácil usinabilidade e que tivesse uma temperatura de final de ativação ( $A_f$ ) próxima da temperatura ambiente ( $\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) e ainda ser uma liga com elementos de baixo custo. Assim, foi escolhida uma LMF de Cu-Al-Ni, de composição 82.5Cu–13.5Al–4.0Ni (% em peso). Segundo Otsuka et al. (1997) essa LMF apresenta característica superelásticas à temperatura ambiente.

### 3.3. FABRICAÇÃO DO ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO

Para a fabricação do atuador LMF tipo porca Castelo M6, primeiramente foram selecionados e preparados os metais constituintes da LMF e afim se obter as quantidades precisas de massas, os mesmos foram cortados com o auxílio de morsa e arco-de-serra no laboratório provisório de matérias e processos de fabricação da UFERSA/Caraúbas. Antes dos cortes as amostras de Cu, Al e Ni receberam limpeza mecânica com lixa e posteriormente álcool. Ainda na UFERSA, Campus Caraúbas, foi realizada a pesagem e aferição das massas de cada elemento utilizando uma balança de precisão da marca *Shimadzu*, com precisão de 3 casas decimais mostrada na Figura 17.

Figura 17 – Balança de precisão *Shimadzu*.



Fonte: SHIMADZU.COM.BR, 2014.

Posteriormente em posse dos elementos químicos comercialmente puros (Cu, Al, Ni) pesados e lixados foram fundidos em uma máquina que utiliza o processo de fusão a plasma seguida de injeção do metal líquido em molde metálico, denominado *Plasma Skull Push Pull* (De Araújo et al, 2009). A sequência de fusão é apresentada de forma simplificada na Figura 18.

Figura 18 – Fluxograma do processo de fabricação empregado para obtenção dos atuadores de LMF.



Fonte: Adaptado de DE ARAÚJO *et al*, 2009.

A fusão é realizada com os elementos empilhados em um cadinho de cobre e sob um eletrodo de tungstênio sob efeito de uma tocha de plasma. Nesse processo, o metal é fundido sobre uma fina camada dele mesmo, em atmosfera protetora de argônio, e depois injetado em um molde metálico com a forma desejada (item 4). Neste trabalho desejava-se obter uma pequena barra cilíndrica de LMF mostrada na Figura 19, com dimensões aproximadas de 12 mm de diâmetro e 19 mm de altura, para posterior usinagem do atuador LMF proposto.

Figura 19 – Tarugo cilíndrico de Cu-Al-Ni.



Fonte: Autoria Própria.

### 3.4. USINAGEM DO ATUADOR LMF TIPO PORCA CASTELO M6 SEM COROA

Em posse do tarugo de LMF Cu-Al-Ni, obtido pelo processo *PSPP* diretamente, ou seja, sem a realização de um tratamento térmico específico, partiu-se para fabricação do Atuador LMF Tipo Porca Castelo M6 propriamente dito, através do processo de usinagem convencional. As dimensões da do atuador estão mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Dimensões do tarugo para fabricação do atuador LMF tipo porca Castelo.

| Tamanho da rosca | Passo (mm) | Altura do atuador (m) (mm) | Largura dos entalhes (n) (mm) | Distância entre faces paralelas do atuador (s) (mm) | Altura do entalhe (w) (mm) |
|------------------|------------|----------------------------|-------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------|
| M6               | 1          | 7,5                        | 2,25                          | 10                                                  | 5                          |

Fonte: Autoria Própria.

A usinagem do tarugo de LMF foi realizada na oficina mecânica do curso de Engenharia Mecânica da UFERSA/Mossoró. Primeiramente foi utilizada uma fresadora Clark<sup>®</sup>, para realizar cortes de 1mm em 6 lados radiais pré-definidos do tarugo, com velocidade de rotação de 600 rpm, onde foi dada a geometria sextavada M6 ao atuador.

Após o processo de fresagem para se definir a forma sextavada, o atuador LMF foi levado à morsa para ser feita a verificação precisa de seu centro, que com o auxílio de régua graduada e paquímetro foi definido e, marcado através de uma força mecânica aplicada com a utilização de um punção. Com o centro da geometria do atuador bem definido, o mesmo foi levado à furadeira de bancada Clark<sup>®</sup> e com o auxílio de uma broca M5, foi realizado um furo transpassante do atuador a uma velocidade de broca de 1285 rpm.

Com o atuador já em sua forma sextavada e com o furo M5 feito, o atuador foi levado à morsa novamente para ser configurada sua rosca com a ferramenta Macho M6. Foi dado início ao processo de rosqueamento da porca a partir do momento em que o tarugo teve seu centro definido. Durante o processo para se obter a rosca, o

atuador apresentou características de início de falha, como grande perda de material e propagação de trincas, onde posteriormente, com o decorrer da produção da rosca do atuador, o mesmo veio a falhar.

#### 4. RESULTADOS

A produção de uma LMF de composição química 82.5Cu–13.5Al–4.0Ni (% em peso) em posse dos metais puros foi obtida com êxito. Através do processo de fusão conhecido como, *Plasma Skull Push Pull*, foi obtido como produto final, um tarugo de LMF com as dimensões aproximadas de 12 mm de diâmetro e 19 mm de altura. Esse tarugo serviu para fabricação do atuador LMF tipo Porca Castelo M6 sem coroa proposto. Esse método de fundição é um método desenvolvido recentemente e ainda em fase de estudos por parte do grupo de pesquisas Lammea/UFCG. As primeiras aplicações quando se está trabalhando com certas ligas ainda serão investigadas por esse grupo de trabalho.

Por meio, da aplicação de todos os parâmetros determinados durante este trabalho, foi executada a fabricação do atuador LMF à base da liga Cu-Al-Ni, tipo porca Castelo M6 sem coroa, através do processo de usinagem convencional para dar forma à geometria o atuador. Infelizmente durante o processo de abertura de rosca o atuador LMF veio a falhar, impossibilitando a fabricação do mesmo. A Figura 20 apresenta a falha do atuador LMF tipo porca Castelo M6 sem coroa durante o processo de Usinagem.

Figura 20 – Atuador de LMF tipo porca Castelo após falha durante o processo de Usinagem.



Fonte: Autoria Própria

Esse inconveniente que ocorreu no decorrer deste trabalho mostra que o processo de fundição pode ter influenciado na falha do material durante sua

usinagem. O material apresentou-se frágil e quebradiço, o que confirma ainda mais a hipótese que o processo de fundição pode ter dado origem à falha. Poderia ter sido realizado um tratamento térmico na liga a fim de reduzir possíveis tensões internas que podem também ter contribuído para a fratura. Então, através de um tratamento térmico bem elaborado, poderia reduzir esse inconveniente apresentado com a liga escolhida.

A LMF utilizada possui mais de 80% de cobre em sua composição. Segundo (GAMA, 2010) toda liga de cobre com EMF, possui limitações como grande fragilidade à temperatura ambiente e inconstância a longo prazo nas propriedades funcionais. Estas limitações vêm frequentemente sendo contornadas com adição de um quarto elemento, como o Manganês (Mn), que visa especificamente aumentar a ductilidade e a estabilidade estrutural, ampliando as propriedades da liga e sua vida útil.

## 5. CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho foi possível adquirir conhecimentos iniciais na área de materiais inteligentes como forma de dar os primeiros passos na área da engenharia mecânica. Foi apresentado um novo conceito de um atuador inteligente, para reduzir os inconvenientes de uma junção aparafusada.

Esse novo conceito apresentado, é de um atuador LMF tipo porca Castelo M6 sem coroa, que promete reduzir o afrouxamento da junta através do EMFS com o carregamento que o recartilhamento da porca faz sobre os filetes da rosca do parafuso.

Foi possível fabricar a liga de 82.5Cu–13.5Al–4.0Ni (% em peso) proposta através do processo *PSPP* com sucesso, que originou um tarugo com dimensões favoráveis a fabricação do atuador. Na etapa de fabricação do atuador LMF atuador LMF tipo Porca Castelo M6 sem coroa, ocorreu um inconveniente que foi a falha do material durante o processo de usinagem das roscas. Essa fratura no material proporcionou o não atendimento a todos os objetivos desde trabalho, muito embora, algumas hipóteses puderam ser levantadas.

O processo induziu no material da liga, uma estrutura frágil e quebradiça, o que proporcionou possivelmente a falha. A realização de um tratamento térmico na liga poderia reduzir possíveis tensões internas que podem também ter contribuído para a fratura. Ainda foi observada uma região porosa no estrutura da liga, isso deve aos gases presentes no processo de fundição *PSPP*. O que poderia ser feito para melhorar ductilidade e a estabilidade estrutural seria a utilização de um quarto elemento de liga segundo a literatura consultada.

O desenvolvimento de novos produtos como a porca Castelo de LMF, assim como as Arruelas *Belleville LMF* (SIMÕES, 2012), as Arruelas em flanges submarinos (REIS, 2013), e as porcas antiafrouxamento (ZHANG, 2000) são exemplo de trabalhos que procuram mostrar soluções para problemas constantes na área elementos de fixação.

Como trabalhos futuros sugerem-se: A Caracterização do Atuador de LMF tipo Porca Castelo M6 sem coroa; A utilização do elemento Manganês (Mn) como quarto elemento da LMF do Atuador de LMF tipo Porca Castelo M6 sem coroa; A mudança da LMF do projeto Atuador de LMF tipo Porca Castelo M6 sem coroa.

## REFERÊNCIAS

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

CASTILHO, W. S.; SILVA, E. P. **Algumas aplicações das ligas com memória de forma (shape memory alloys – SMA)**: v. 12. . São Paulo: Sinergia, 2011. p. 99-108.

FERNANDES, F. M. B. **Ligas com memória de forma**. Universidade Nova Lisboa, 2004.

GAMA, J. L. L. **Transformação de Fase em Ligas de Cobre com Memória de Forma**. 2010. 77 f. Tese (Doutorado em Ciências: Área de Concentração: Aplicação de Radioisótopos) - Universidade Federal do Pernambuco, 2003.

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

LOSEKANN, C. R.; FERROLI, P. C. M. **Fabricação para designers: Elementos de máquinas**. Universidade do Vale do Itajaí, 2004.

MINETTO, R. T. **Estudo do Uso da Liga Ti-50,67at%Ni com Efeito de Memória de Forma na Minimização de Perdas de Pré-Carga Axial em Juntas Fixadas por Parafusos**. 2010. 77 f. Tese ( Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2010.

OTSUKA, K.; KAKESHITA, T. **MRS Bulletin**, Feb. 2002, 91 p.

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

REIS, P. K. P. **Uso de arruelas com memória de forma em flanges de conectores submarinos**. 2013. 79 f. Tese (Graduação em Engenharia do Petróleo) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SHIMADZU. **AUW SERIES**. São Paulo, 2013. Disponível em : <  
<http://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/balance/analiticas/auw-unibloc.shtml>>. Acesso em: 10 de março 2014.

SIMÕES, J. B. **Caracterização termomecânica de atuadores Belleville de Ligas com Memória de Forma**. 2012. 117 f. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Campina Grande, 2012.

SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. **Mecânica Aplicada: Princípios mecânicos, transmissões mecânicas, uniões**. Universidade Federal da Grande Dourados, 2006.

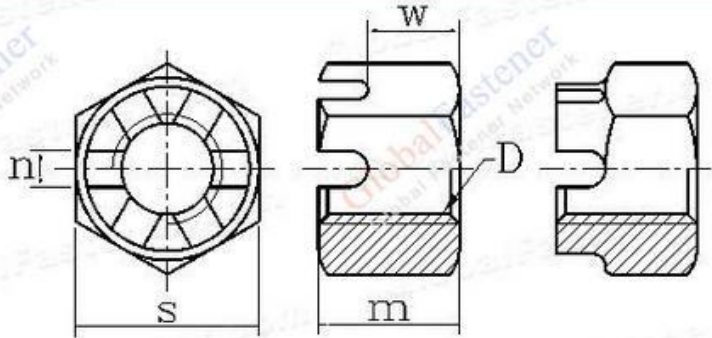
UOL. **Chevrolet agile e classic têm recall por risco de perder rodas traseiras**. São Paulo, 2014. Disponível em :  
 <<http://carros.uol.com.br/noticias/redacao/2014/02/06/chevrolet-agile-e-classic-tem-recall-por-risco-de-perder-rodas-traseiras.htm>>. Acesso em: 10 de março 2014.

UOL. **Começa hoje recall de 62.624 veículos, entre amarok e tiguan, da vw**. São Paulo, 2013. Disponível em : <  
<http://www1.folha.uol.com.br/mercado/2013/11/1373492-comeca-hoje-recall-de-62624-veiculos-entre-amarok-e-tiguan-da-wv.shtml>>. Acesso em: 10 de março 2014.

ZHANG, X.; NIE, J.; HOU, G. Development of anti-loosening nuts using Shape Memory Alloys. **Shape Memory Materials**. v. 327-328. 2000. p. 35-38

## ANEXOS

Anexo A - Tabela com valores de dimensões máximas e mínimas da porca tipo Castelo segundo a norma DIN 935-1 – 1987.



unit: mm

| Thread size<br>D | P             | m   |       | n     |     | s     |             | W   |       | Weight<br>(7.85kg/dm <sup>3</sup> )<br>kg/1000 pieces |
|------------------|---------------|-----|-------|-------|-----|-------|-------------|-----|-------|-------------------------------------------------------|
|                  |               | max | min   | max   | min | max   | min         | max | min   |                                                       |
| M4               | 0.7           | 5   | 4.7   | 1.45  | 1.2 | 7     | 6.78        | 3.2 | 2.9   | 1.12                                                  |
| M5               | 0.8           | 6   | 5.7   | 1.65  | 1.4 | 8     | 7.78        | 4   | 3.7   | 2.3                                                   |
| M6               | 1             | 7.5 | 7.14  | 2.25  | 2   | 10    | 9.78        | 5   | 4.7   | 3.16                                                  |
| M7               | 1             | 8   | 7.64  | 2.25  | 2   | 11    | 10.73       | 5.5 | 5.2   | 3.96                                                  |
| M8               | 1/1.25        | 9.5 | 9.14  | 2.75  | 2.5 | 13    | 12.73       | 6.5 | 6.14  | 7.35                                                  |
| M10              | 1/1.25/1.5    | 12  | 11.57 | 3.05  | 2.8 | 16/17 | 15.73/16.73 | 8   | 7.64  | 15.8                                                  |
| M12              | 1.25/1.5/1.75 | 15  | 14.57 | 3.8   | 3.5 | 18/19 | 17.73/18.67 | 10  | 9.64  | 20                                                    |
| M14              | 1.5/2         | 16  | 15.57 | 3.8   | 3.5 | 21/22 | 20.67/21.67 | 11  | 10.57 | 27                                                    |
| M16              | 1.5/2         | 19  | 18.48 | 4.8   | 4.5 | 24    | 23.67       | 13  | 12.57 | 38.9                                                  |
| M18              | 1.5/2/2.5     | 21  | 20.16 | 4.8   | 4.5 | 27    | 26.16       | 15  | 14.57 | 57.5                                                  |
| M20              | 1.5/2/2.5     | 22  | 21.16 | 4.8   | 4.5 | 30    | 29.16       | 16  | 15.57 | 75.2                                                  |
| M22              | 1.5/2/2.5     | 26  | 25.16 | 5.8   | 5.5 | 32/34 | 31/33       | 18  | 17.57 | 93                                                    |
| M24              | 2/3           | 27  | 26.16 | 5.8   | 5.5 | 36    | 35          | 19  | 18.48 | 131                                                   |
| M27              | 2/3           | 30  | 29.16 | 5.8   | 5.5 | 41    | 40          | 22  | 21.48 | 192                                                   |
| M30              | 2/3.5         | 33  | 32    | 7.36  | 7   | 46    | 45          | 24  | 23.48 | 264                                                   |
| M33              | 2/3.5         | 35  | 34    | 7.36  | 7   | 50    | 49          | 26  | 25.48 | 333                                                   |
| M36              | 3/4           | 38  | 37    | 7.36  | 7   | 55    | 53.8        | 29  | 28.48 | 447                                                   |
| M39              | 3/4           | 40  | 39    | 7.36  | 7   | 60    | 58.8        | 31  | 30.28 | 584                                                   |
| M42              | 3/4.5         | 46  | 45    | 9.36  | 9   | 65    | 63.1        | 34  | 33.38 | 710                                                   |
| M45              | 3/4.5         | 48  | 47    | 9.36  | 9   | 70    | 68.1        | 36  | 35.38 | 860                                                   |
| M48              | 3/5           | 50  | 49    | 9.36  | 9   | 75    | 73.1        | 38  | 37.38 | 1060                                                  |
| M52              | 3/5           | 54  | 52.8  | 9.36  | 9   | 80    | 78.1        | 42  | 41.38 | 1300                                                  |
| M56              | 4/5.5         | 57  | 55.8  | 9.36  | 9   | 85    | 82.8        | 45  | 44.38 | 1500                                                  |
| M60              | 4/5.5         | 63  | 61.8  | 11.43 | 11  | 90    | 87.8        | 48  | 47.38 | 1800                                                  |
| M64              | 4/6           | 66  | 64.8  | 11.43 | 11  | 95    | 92.8        | 51  | 50.26 | 2150                                                  |
| M68              | 4/6           | 69  | 67.8  | 11.43 | 11  | 100   | 97.8        | 54  | 53.26 | 2500                                                  |
| M72              | 4/6           | 73  | 71.8  | 11.43 | 11  | 105   | 102.8       | 58  | 57.26 | 2900                                                  |
| M76              | 4/6           | 76  | 74.8  | 11.43 | 11  | 110   | 107.8       | 61  | 60.26 | 3300                                                  |
| M80              | 4/6           | 79  | 77.6  | 11.43 | 11  | 115   | 112.8       | 64  | 63.26 | 3700                                                  |
| M85              | 4/6           | 88  | 86.6  | 14.43 | 14  | 120   | 117.8       | 68  | 67.26 | 4100                                                  |
| M90              | 4/6           | 92  | 90.6  | 14.43 | 14  | 130   | 127.5       | 72  | 71.26 | 5450                                                  |
| M100             | 4/6           | 100 | 98.6  | 14.43 | 14  | 145   | 142.5       | 80  | 79.26 | 7600                                                  |