UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA (UFPB)

CENTRO DE TECNOLOGIA - CT

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS LUCENA VIDAL DE NEGREIROS

LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA – NITINOL E SUAS APLICAÇÕES

JOÃO PESSOA

2023

LUCAS LUCENA VIDAL DE NEGREIROS

LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA – NITINOL E SUAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador(a): Prof. Prof. Doutor Rafael Evaristo Caluete

JOÃO PESSOA

2023

Catalogação na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

N385l Negreiros, Lucas Lucena Vidal de.
LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA - NITINOL E SUAS APLICAÇÕES / Lucas Lucena Vidal de Negreiros. - João Pessoa, 2023.
42 f. : il.

Orientação: Rafael Caluête.
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Mmória de forma. 2. Superelasticidade. 3. Transformação martensítica. I. Caluête, Rafael. II. Título.

UFPB/CT/BSCT CDU 621(043.2)

Elaborado por ONEIDA DIAS DE PONTES - CRB-198

LUCAS LUCENA VIDAL DE NEGREIROS

LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA – NITINOL E SUAS APLICAÇÕES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

João Pessoa, 14 de Junho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rafael Evaristo Caluête
Departamento de Engenharia Mecânica
/CT/UFPB (Orientador)

Prof. Dr. Jacques Cesar Dos Santos
Departamento de Engenharia Mecânica
/CT/UFPB (Examinador)

Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina
Departamento de Engenharia Mecânica
/CT/UFPB (Examinador)

AGRADECIMENTOS

A meus amigos e colegas da equipe Fórmula UFPB, que, em grupo, me ajudaram a crescer e cresceram junto comigo profissionalmente. Em especial um agradecimento a Rhaian Barros, Max Milian, Eufrázio Neto, Bruno Paulino e meu irmão, Felipe Lucena por acreditarem em mim e me ensinarem tanto quando integrantes do projeto.

Aos meus pais, Saulo e Jussara, por serem meus exemplos e pelo suporte que sempre me deram em me manter focado em minha formação acadêmica e para que eu pudesse virar uma pessoa cada dia melhor. Aos meus irmãos, Saulo, Vanessa e Felipe por todo suporte que me deram no curso tirando minhas dúvidas e me mostrando o caminho certo a ser seguido. A Yrlaine pelo seu amor e companheirismo fundamentais para minha vida como um todo.

A meu professor orientador, Rafael Caluête, por sua orientação, sua paciência e por sua ajuda tanto na produção deste trabalho quanto no curso como professor e coordenador. Ao professor Koje como responsável do projeto Formula, professor e coordenador sempre auxiliando seus alunos com o que precisasse.

NEGREIROS, Lucas Lucena Vidal de Negreiros. **LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA – NITINOL E SUAS APLICAÇÕES.** João Pessoa, 2023. P328e. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo principal realizar um estudo sobre as Ligas com Memória de Forma com um foco maior nas ligas de NiTi por serem mais utilizadas e trazendo um breve histórico delas. É apresentado neste trabalho as suas propriedades principais como sua estrutura cristalina, os mecanismos e temperaturas de transformação, o efeito da composição de elementos de liga como proporção de níquel nas ligas de Ni-Ti e a adição de Alumínio e Níquel nas ligas de cobre e demonstrando a influência desses elementos nas propriedades térmicas e mecânicas. Através desse embasamento teórico inicial tornou-se possível uma boa compreensão do Efeito Memória de Forma (EMF) que faz com que as SMA recuperem sua forma original após aquecidas e da superelasticidade que consegue atuar da mesma forma, porém sem a necessidade de aplicar calor. Trouxemos também alguns exemplos das principais ligas usadas comercialmente e suas características principais como a ótima resistência a corrosão das ligas de NiTi e o baixo custo das ligas de cobre. As características das SMA são essenciais para as aplicações na medicina, indústria aeroespacial e dispositivos elétricos por apresentarem uma capacidade de regeneração muito grande e por serem capazes de assumir o papel de um sensor e de um atuador ao mesmo tempo possibilitados pela peculiaridade de suas transformações de fase.

Palavras-chave: Memoria de forma. Superelasticidade. Transformação martensítica.

NEGREIROS, Lucas Lucena Vidal de Negreiros. **LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA – NITINOL E SUAS APLICAÇÕES.** João Pessoa, 2023. P328e. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) Universidade Federal da Paraíba (UFPB)

ABSTRACT

This study aimed to conduct an in-depth investigation on Shape Memory Alloys (SMAs), with a particular focus on NiTi alloys due to their widespread usage, while also providing a brief historical background. The present work presents the main properties of SMAs, including their crystal structure, transformation mechanisms and temperatures, and the influence of alloying elements such as nickel proportion in Ni-Ti alloys, as well as the addition of aluminum and nickel in copper alloys. The impact of these elements on the thermal and mechanical properties is demonstrated. Through this initial theoretical foundation, a comprehensive understanding of the shape memory effect, which enables SMAs to recover their original shape upon heating, and superelasticity, which allows for reversible deformation without the need for heating, was achieved. Additionally, some examples of commercially significant alloys were presented, highlighting their key characteristics, such as the excellent corrosion resistance of NiTi alloys and the cost-effectiveness of copper alloys. The unique characteristics of SMAs, such as their remarkable regenerative capacity and their ability to function as both sensors and actuators simultaneously, owing to their distinctive phase transformations, make them essential for applications in medicine, aerospace industry, and electrical devices.

Key words: Shape memory. Superelasticity. Martensite transformation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Gráfico tensão x deformação do a) efeito memória de forma e da b) superelasticidade 14
Figura 2: Estruturas Cúbica (B2) e Ortorrômbica e Monoclínica (M-phase) 14
Figura 3: Esquematização da transição entre Austenita e Martensita maclada 16
Figura 4: Gráfico esquemático do processo de demaclação do material com tensão aplicada 16
Figura 5: Esquematização da transição da fase matriz P (austenita) para a martensita maclada (M_A e M_B) onde M_A tem direção oposta a M_B 17
Figura 6: Esquematização da a) fase matriz b) Martensíta maclada e c) dominância da fase A após estiramento 17
Figura 7: Proporção de martensíta por temperatura sob tensão constante em aquecimento e resfriamento 18
Figura 8: Esquematização do Efeito Memória de Forma 19
Figura 9: Demonstração de deformações a) elástica e b) plástica e c) Efeito de Memória de Forma (EMF) 20
Figura 10: Gráfico esquemático da transformação martensítica induzida por mudança de temperatura 20
Figura 11: Demonstração esquemática da deformação na estrutura de uma SMA 21
Figura 12: Gráficos de tensão x deformação para diferentes temperaturas de Ni50.6-Ti. As setas em (j) representam as tensões críticas de martensita induzida por tensão e a transformação inversa sob o alívio da tensão 22
Figura 13: Gráfico esquemático de tensão x temperatura necessário para viabilizar a superelasticidade 23
Figura 14: Gráfico tensão x temperatura reunindo pontos de M_s obtidos da figura 12 24
Figura 15: Gráfico esquemático tensão x temperatura com pontos críticos de temperatura e tensão em uma SMA 24
Figura 16: Temperatura M_s em função da concentração de Níquel nas ligas de Ni-Ti onde a linha contínua é obtida por cálculo termodinâmico e os diferentes simbolos representam dados obtidos por diferentes autores 26
Figura 17: - Efeito dos elementos de liga Fe, Pd, Pt, Hf, Co, V, Mn, Au, Zr, Al e Cr na temperatura de transformação martensítica nas ligas de NiTi 27
Figura 18: Demonstração esquemática de uma fratura em um arco costal 30

Figura 19: Esquematização da utilização de um grampo de Judet.....31
Figura 20: Foto do rover lunar utilizado na Apollo 15 32
Figura 21: Pneu de malha de aço inox durante teste de resistência com aparentes deformações permanentes.....33
Figura 22: Fios helicoidais sendo enrolados para formar a superfície do pneu 34
Figura 23: Esquematização da atuação de uma SMA acionada por corrente elétrica.....35
Figura 24: Mecanismos de retorno para atuadores de SMA de uma via.....36
Figura 25: Comparação de um atuador comum com um atuador SMA.....37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Intervalo de temperatura de transformação martensítica de diferentes ligas 18

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Porcentagem
σ_s	Tensão de início de demaclação
σ_f	Tensão de término de demaclação
ºC	Graus Celsius
A_s	Ponto de início de Austenita
A_f	Ponto de término de Austenita
EMF	Efeito Memória de Forma
SMA	Shape Memory Alloy
M_s	Ponto de início de Martensita
M_f	Ponto de término de Martensita
Ni	Níquel
Ti	Titânio
Cu	Cobre
Zn	Zinco
Al	Alumínio

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 11

2. OBJETIVOS 12

2.1 OBJETIVO GERAL 12

2.1.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 12

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 13

3.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA 13

4.1.1 Definição 13

4.1.2 Estrutura Atômica 14

4.1.3 Transformação Martensítica 15

4.2 MEMÓRIA DE FORMA 19

4.3 SUPERELASTICIDADE 21

4.4 PRINCIPAIS SMA COMERCIAIS 26

4.4.1 Nitinol 26

4.4.2 Ligas de cobre 28

4.4 APLICAÇÕES 29

4.5.1 Aplicações de SMA na medicina 29

4.5.2 Aplicação de SMA na indústria aeroespacial 31

4.5.3 Aplicação de SMA em atuadores elétricos 34

4. METODOLOGIA 38

4.1. PROCEDIMENTO 38

4.2. ANÁLISE DE DADOS 38

5 CONCLUSÃO 39

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 40

1. INTRODUÇÃO

Durante toda história o ser humano testou, e continua testando, diversas combinações de materiais onde algumas delas acabaram se tornando o que chamamos hoje por ligas metálicas. Contendo dois ou mais elementos combinados, sendo pelo menos um deles um metal, dá-se origem a uma liga metálica que consiste em uma mistura com propriedades aprimoradas.

Foi apenas em 1963 que o pesquisador do Laboratório de Artilharia Naval, William Buehler, em Maryland, Estados Unidos, descobriu por acidente as distintas propriedades da liga metálica Níquel-titânio (NiTi), que ficou conhecida como NiTiNol (em homenagem ao Laboratório de Artilharia Naval, do inglês Naval Ordnance Laboratory - NOL). Uma década após essa descoberta, com um maior entendimento das SMA, já era possível encontrar diversos produtos sendo comercializados no mercado nas áreas de: saúde, aeronáutica, industrial, construção civil, militar, automobilismo, energia nuclear e outras. (HODGSON, 1990) e (OTSUKA, 2005)

O NiTiNol é uma liga com memória de forma, ou SMA (do inglês Shape Memory Alloy). Esse termo é utilizado para se referir a materiais metálicos com capacidade de recuperar uma forma definida previamente ao ser submetida a uma deformação. Por meio de aquecimento, aumento de tensão, ou uma combinação dos dois essas ligas conseguem recuperar sua forma original. A descoberta do NiTiNol foi considerada um marco da engenharia de materiais, pois a nova combinação, além de possuir boas propriedades mecânicas, apresentou também uma capacidade de recuperação de forma superior à de ligas existentes. Apesar de outras ligas com EMF também terem sido descobertas nos anos posteriores, apenas as ligas que conseguiam recuperar uma quantidade substancial de deformação se tornaram significantes para o uso comercial. (HODGSON, 1990)

Na década de 1970, os mecanismos de atuação das SMA foram investigados e esclarecidos com relação a transformação martensítica termoelástica. Durante as investigações, os cientistas descobriram também o outro fenômeno singular das SMA, a superelasticidade. A partir disso, estudo intensivos foram feitos a respeito das temperaturas de transformação de fase dessas ligas proporcionando uma maior facilidade de encontrar mais aplicações. Sendo utilizados em armações de óculos, procedimentos cirúrgicos como stents e até termostato de máquinas de café. (YAMAUCHI, 2011).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é fazer um estudo das ligas de memória de forma, em específico o NiTi, suas propriedades singulares, diversas aplicações e verificar os benefícios desses metais.

2.1.1. Objetivos específicos

- Fazer um breve histórico sobre as ligas com memória de forma
- Definir o que são as ligas com memória de forma
- Explicar a transformação martensítica através da bibliografia existente
- Demonstrar as principais propriedades das ligas com memória de forma: Efeito Memória de forma e Superelasticidade ou Pseudoelasticidade
- Mostrar aplicações práticas e teóricas da utilização dessas ligas nos seguimentos de medicina, aeronáutica e aeroespacial e dispositivos elétricos.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA

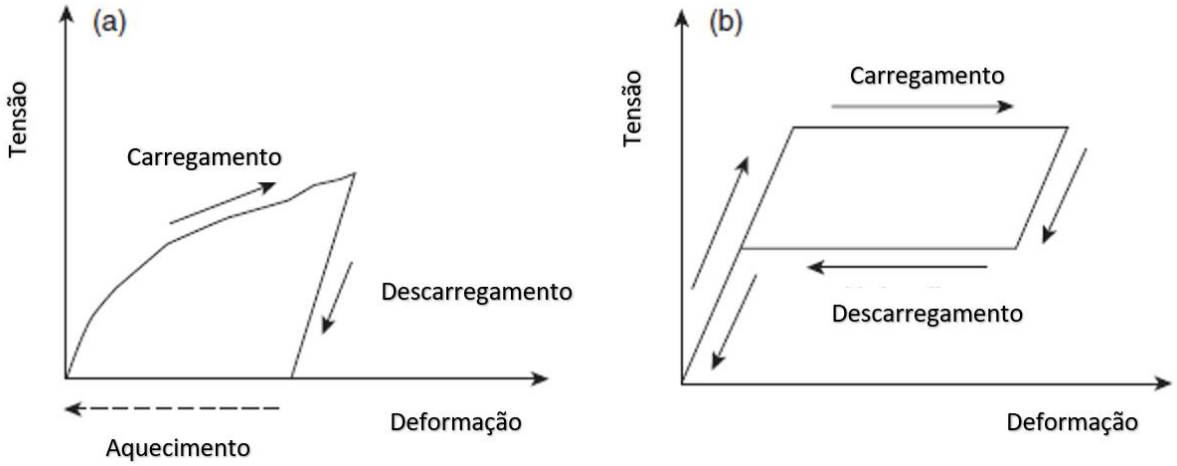
4.1.1 Definição

Segundo a Enciclopédia de Materiais Inteligentes, as ligas de memória de forma, também conhecidas como SMA (do inglês Shape Memory Alloy), são conhecidas primordialmente por uma propriedade fundamental e única: a habilidade de recuperar sua forma original mesmo após serem submetidas a deformações plásticas através do aquecimento até uma temperatura crítica. (SCHWARTZ, 2009) e (HODGSON, 1990)

As SMA são materiais compostos por mais de um elemento de liga onde, apesar de serem conhecidas uma grande variedade de ligas com o efeito memória de forma, apenas aquelas que conseguem recuperar uma quantidade considerável de deformação são realmente consideradas para aplicações comerciais. Dessa forma as ligas que são atualmente mais utilizadas são as de Níquel-Titânio (Ni-Ti) e as ligas de Cobre como Cu-ZnAl e Cu-Al-Ni. (HODGSON, 1990)

Os dois principais mecanismos que atuam nas SMA são o efeito memória de forma e a superelasticidade ou pseudoeslasticidade (Figura 1). Ambos os mecanismos conferem as ligas a habilidade única de recuperar sua forma original sendo acionado tanto pela mudança de temperatura (memória de forma) quanto pela aplicação de uma tensão (superelasticidade). Normalmente as SMA tem a capacidade de recuperar aproximadamente 8% da deformação enquanto os aços comuns podem recuperar de 0,2% a 0,4% do seu comprimento original através da deformação elástica convencional (lei de Hooke). (YAMAUCHI, 2011).

Figura 1: Gráfico tensão x deformação do a) efeito memória de forma e da b) superelasticidade.

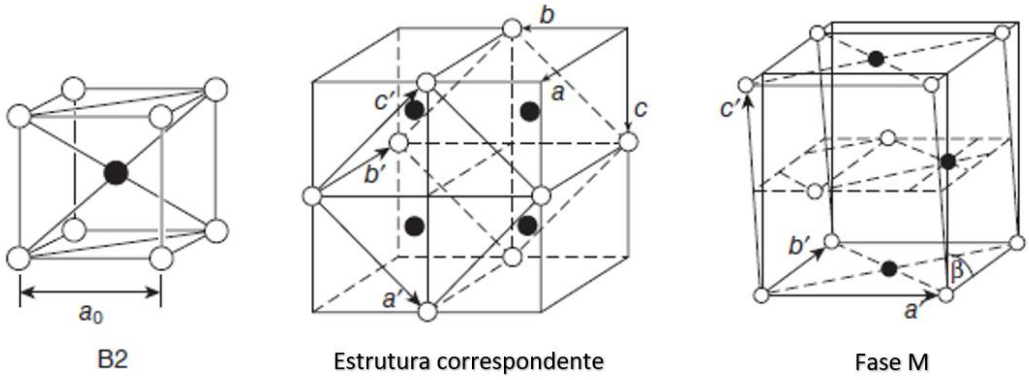


Fonte: (YAMAUCHI, 2011) – Modificado.

4.1.2 Estrutura Atômica

As SMA têm duas fases consideradas estáveis: austenita e martensita. A fase austenítica é caracterizada por uma estrutura atômica ordenada geralmente do tipo cúbica e estável para temperaturas mais altas. Já a fase martensítica é estável em temperaturas mais baixas e podendo ser encontrada com uma estrutura atômica com menor simetria como a do tipo ortorrômbica ou do tipo monoclínica. Essas estruturas estão representadas na Figura 2. (LAGOUDAS, 2008)

Figura 2: Estruturas Cúbica (B2) e Ortorrômbica e Monoclínica (M-phase).



Fonte: (YAMAUCHI, 2011)- Modificado.

A razão pela qual as SMA podem recuperar a sua forma inicial após elevadas deformações está nessas estruturas atômicas. Dependendo da temperatura e da tensão aplicadas, o material da liga pode intercalar entre estas duas fases, sem alteração macroscópica, de modo a acomodar deformações. (LAGOUDAS, 2008) Por exemplo, o material pode ser deformado transformando sua estrutura atômica monoclínica em uma ortorrômbica sem que os átomos da vizinhança sejam trocados.

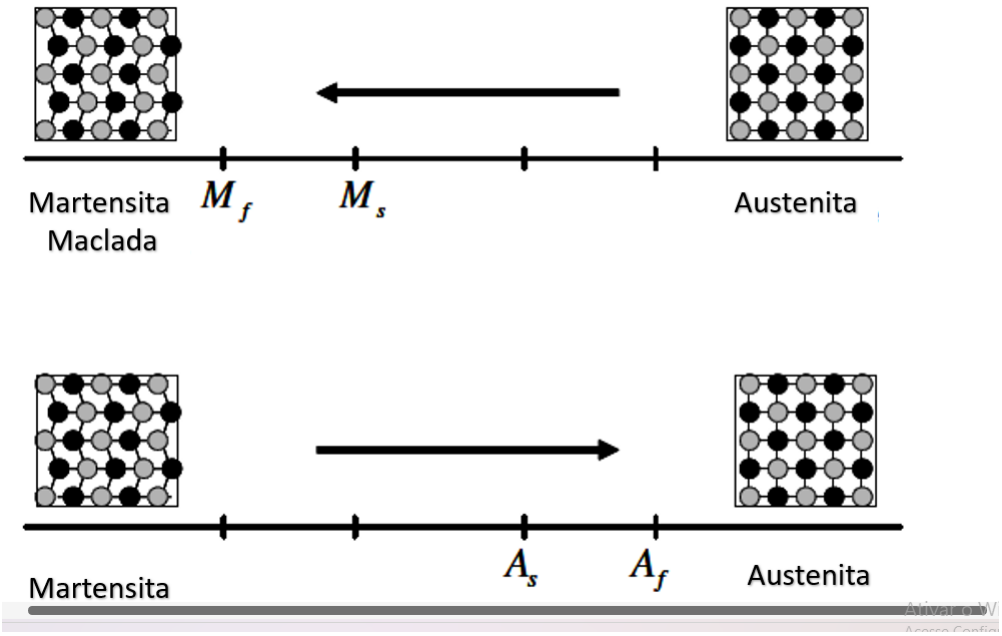
4.1.3 Transformação Martensítica

As transformações no estado sólido podem ser divididas entre difusora e não-difusora ou termoelástica. A difusora é caracterizada pela difusão aleatória de átomos na estrutura do material não se restringindo a se manterem em uma vizinhança específica. A composição da microestrutura do material muda em relação a fase matriz pois, devido à baixa velocidade de resfriamento, os átomos conseguem percorrer maiores distâncias. Já a transformação não-difusora, geralmente devido à alta velocidade de resfriamento, apresenta uma movimentação mais curta dos átomos e, como resultado, a estrutura cristalina obtida é estável e não apresenta mudança na sua composição química visto que não há quebra de ligações entre os átomos. (CAVALCANTI, 2018)

A transformação martensítica que ocorre nas ligas com memória de forma são do tipo termoelástica, ou seja, (as mudanças de fase do material são reversíveis e o material consegue reverter da fase de baixa temperatura para a fase matriz com um reaquecimento eliminando deformações acumuladas. Com o resfriamento a fase matriz pode ser revertida para a fase de baixa temperatura. (HODGSON, 1990)

Podemos encontrar as SMA em três fases principais, sendo elas a Austenita, a Martensita maclada e a Martensita demaclada. Em uma situação de resfriamento sem a aplicação de uma carga, a transformação da fase austenítica das ligas de NiTi podem apresentar até 24 variantes da fase martensítica resultando em um arranjo que a mudança do formato média macroscópica é insignificante, dando origem a martensita maclada. Essa transformação se inicia no ponto M_s e é finalizada no ponto Mf. De forma Similar, durante o aquecimento, a transformação inversa ocorre começando do ponto A_s e sendo concluído no ponto A_f com a transformação total da Martensita em Austenita como mostrado na Figura 3.

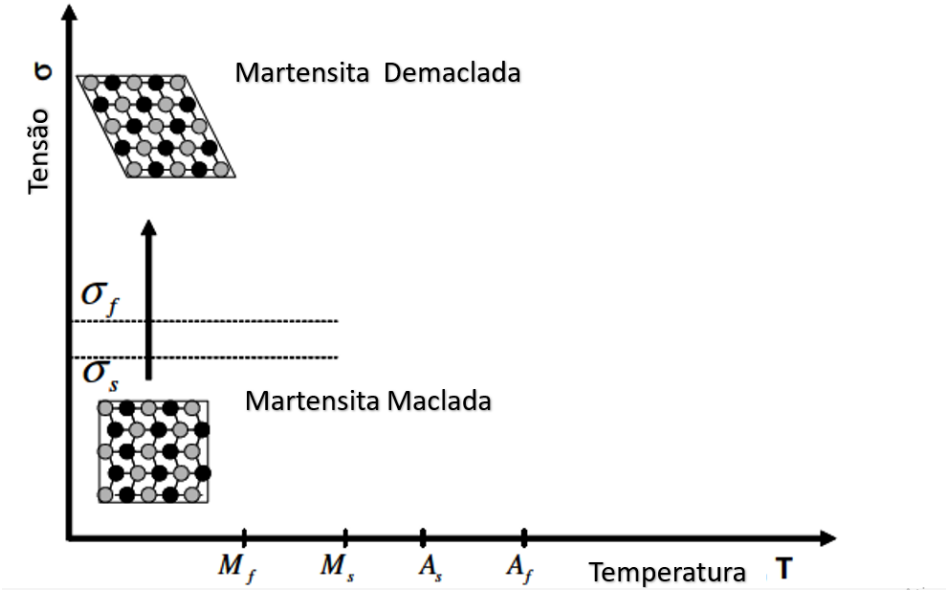
Figura 3: Esquematização da transição entre Austenita e Martensita maclada.



Fonte: (LAGOUDAS, 2008)- Modificado.

Ao aplicar uma carga no material quando estiver na fase de martensita maclada, (em baixa temperatura) acima de σf é possível obter a martensita demaclada através da pequena movimentação dos átomos sem que haja quebra de ligações. Dessa forma o processo de demaclação resulta em uma mudança de forma que se mantém após retirada a carga aplicada conforme esquematização da Figura 4.
(LAGOUDAS, 2008)

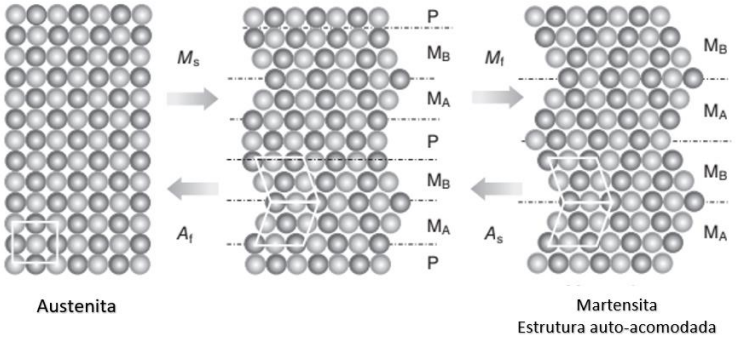
Figura 4: Gráfico esquemático do processo de demaclação do material com tensão aplicada.



Fonte: (LAGOUDAS, 2008)- Modificado.

O processo de transição da austenita para a martensita ocorre com o resfriamento e se inicia a partir da temperatura em M_s (Martensite Start) com a formação de cristais de martensíta. Para uma melhor compreensão, avaliaremos a transformação neste momento apenas em um plano. Portanto, nota-se na Figura 5 que os cristais de martensita continuam a se propagar até o fim da transformação em Mf. (YAMAUCHI, 2011)

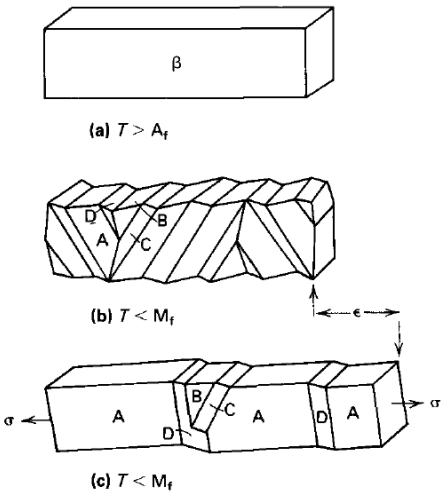
Figura 5: Esquematização da transição da fase matriz P (austenita) para a martensita maclada (M_A e M_B) onde M_A tem direção oposta a M_B.



Fonte: (YAMAUCHI, 2011)- Modificado.

Nesse caso, a partir de uma mesma austenita temos a formação de duas fases diferentes da martensita que têm a mesma estrutura, porém com direções de cisalhamento opostas formando a martensita maclada. Estas fases são chamadas de variantes e a martensíta pode conter até 24 delas quando a martensita é monoclínica e passamos a considerar que a transformação simultaneamente em outros planos. Essa morfologia permite que os cristais de autensita se cancelem mutualmente a deformação cisalhante em um processo chamado de auto-acomodação. (YAMAUCHI, 2011)

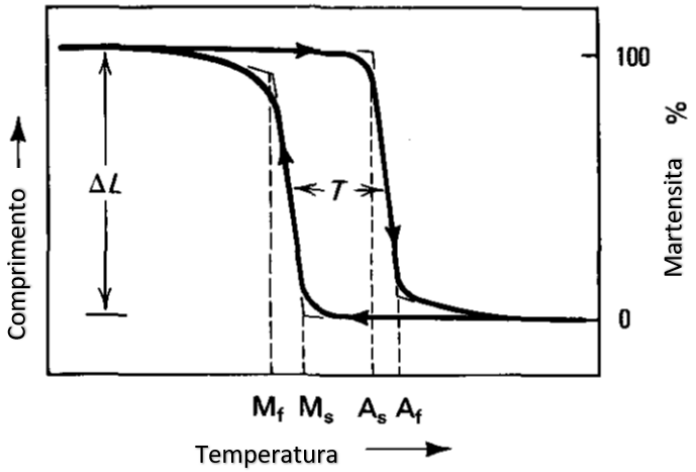
Figura 6: Esquematização da a) fase matriz b) Martensíta maclada e c) dominância da fase A após estiramento.



Fonte: (HODGSON, 1990).

Na figura 6 é ilustrado em b) a martensita auto-acomodada com as variantes A, B, C e D originadas a partir da fase matriz β após o resfriamento. Dessa forma, após uma tensão σ ser aplicada, uma deformação ε é gerada fazendo com que a variante A se torne dominante. Dependendo da direção da carga aplicada, diferentes variantes podem ser favorecidas durante a deformação da liga em processo que podemos chamar de demaclação. (HODGSON, 1990)

Figura 7: Proporção de martensíta por temperatura sob tensão constante em aquecimento e resfriamento.



Fonte: (HODGSON, 1990) – Modificado.

A maioria das transformações das SMA ocorrem em pequenos intervalos de temperatura apesar de que os pontos de início e fim da transformação possam variar bastante. A transformação martensítica nas SMA demonstra também uma histerese (*T*) tal que as curvas das transformações por aquecimento e por resfriamento não se tocam (Figura 7). Essa histerese de transformação varia de acordo com a liga como é mostrado na tabela 1 (HODGSON, 1990)

Tabela 1: Intervalo de temperatura de transformação martensítica de diferentes ligas.

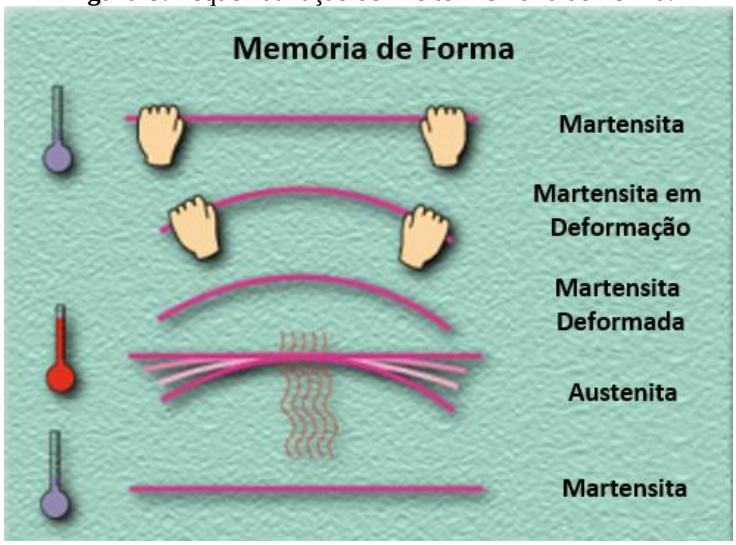
Liga	Composição	Intervalo de Temperatura de Transformação °C	°F	Histerese deTransformação Δ°C	Δ°F
Ag-Cd	44/49 at.% Cd	−190 to −50	−310 to −60	≈15	≈25
Au-Cd	46.5/50 at.% Cd	30 to 100	85 to 212	≈15	≈25
Cu-Al-Ni	14/14.5 wt% Al 3/4.5 wt% Ni	−140 to 100	−220 to 212	≈35	≈65
Cu-Sn	≈15 at.% Sn	−120 to 30	−185 to 85		
Cu-Zn	38.5/41.5 wt% Zn	−180 to −10	−290 to 15	≈10	≈20
Cu-Zn-X (X = Si, Sn, Al)	a few wt% of X	−180 to 200	−290 to 390	≈10	≈20
In-Ti	18/23 at.% Ti	60 to 100	140 to 212	≈4	≈7
Ni-Al	36/38 at.% Al	−180 to 100	−290 to 212	≈10	≈20
Ni-Ti	49/51 at.% Ni	−50 to 110	−60 to 230	≈30	≈55
Fe-Pt	≈25 at.% Pt	≈−130	≈−200	≈4	≈7
Mn-Cu	5/35 at.% Cu	−250 to 180	−420 to 355	≈25	≈45
Fe-Mn-Si	32 wt% Mn, 6 wt% Si	−200 to 150	−330 to 300	≈100	≈180

Fonte: (OTSUKA, 2005) – Modificado.

4.2 MEMÓRIA DE FORMA

Quando uma SMA se encontra em um estado de temperatura mais baixa (arrefecimento), ela pode ser facilmente forçada, adaptada e trabalhada, e sua nova forma será mantida. Contudo, quando ocorre o aquecimento acima da temperatura de transformação, as várias transformações na estrutura cristalina do material levam ao retorno da forma original (Figura 8) (ROCHA, 2012).

Figura 8: Esquematização do Efeito Memória de Forma.

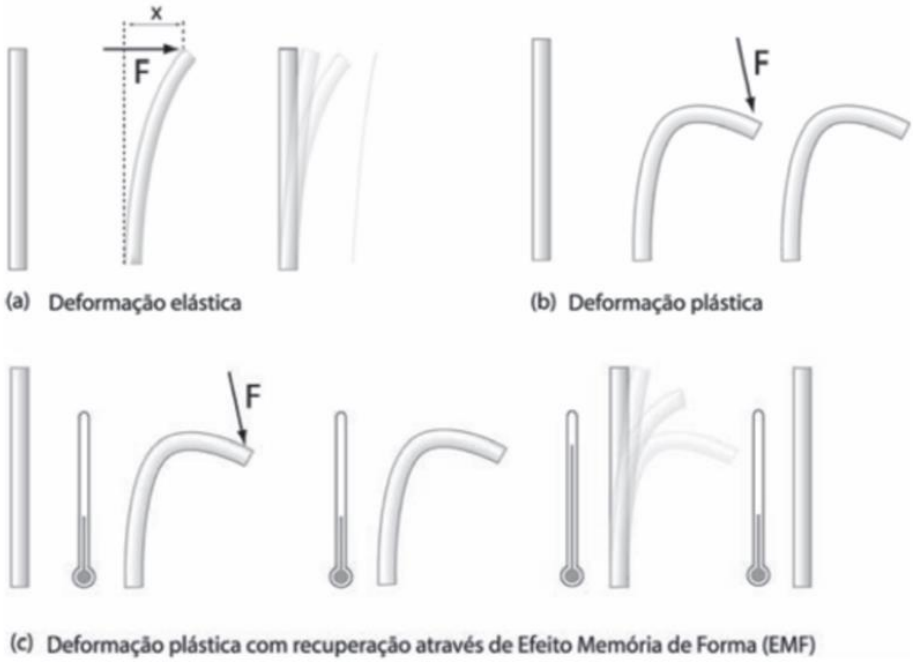


Fonte: (CHEN, 2003)- Modificado.

À temperatura ambiente estes materiais estão geralmente na sua fase “martensitica” e são facilmente deformáveis. Assim quando lhes é aplicada uma força eles adquirem uma nova forma. Ao serem aquecidos estas ligas passam para a sua fase “austenitica” recuperando a forma original. Ao arrefecer passa de novo para martensita, modificando de novo a sua estrutura cristalina, mas sem se alterar a sua forma macroscópica. Este fenómeno tem o nome de memória de forma simples e é apenas possível alterar a forma do objeto (permanentemente) se a Austenita for alterada.

Na Figura 9 (a), o objeto é deformado de forma elástica e recupera sua forma quando a força é retirada; em (b), a deformação ultrapassa o limite do material elástico, causando uma deformação é permanente (deformação plástica); já em (c), o corpo é deformado de forma plástica, abaixo de certa temperatura e, ao ser aquecido, recupera sua forma por completo, caracterizando o comportamento do EMF (SERTÓRIO, 2018).

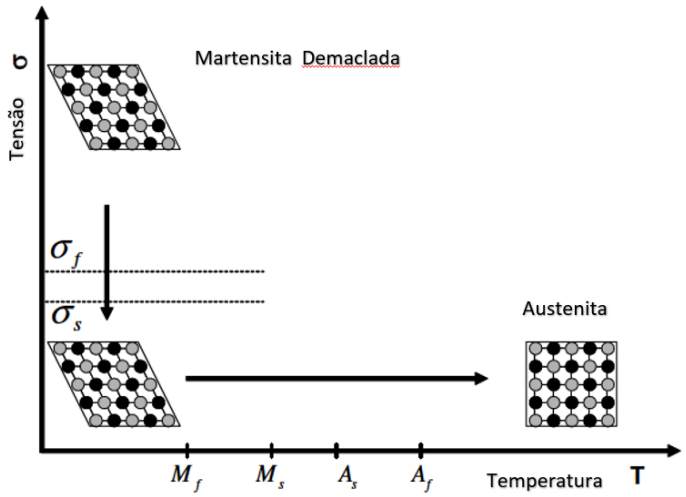
Figura 9: Demonstração de deformações a) elástica e b) plástica e c) Efeito de Memória de Forma (EMF).



Fonte: (SERTÓRIO, 2018) – Modificado.

Para uma liga abaixo da temperatura de Mf, a tensão mínima necessária para iniciar o processo de demaclação da martensita é σ_s. É necessária uma tensão alta suficiente (σ_f) para obter a transição completa da martensita maclada para a demaclada. Após a remoção da carga, a deformação acumulada se mantém e o reaquecimento do material recupera a forma original da liga.

Figura 10: Gráfico esquemático da transformação martensítica induzida por mudança de temperatura.

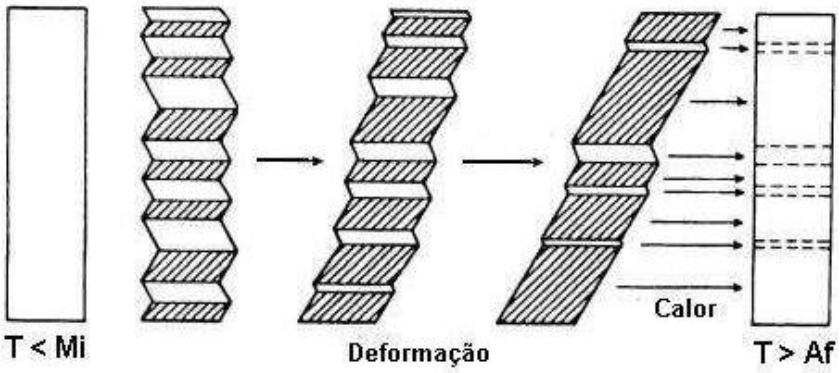


Fonte: (LAGOUDAS, 2008) – Modificado.

Na representação esquemática das Figuras 10 e 11, estando o material na condição martensítica, a aplicação de um esforço cisalhante sob uma amostra gera uma deformação

plástica proveniente da movimentação das variantes da martensita. Este movimento contribui para a expansão de uma variante favorecida que, ao ser reaquecida até Af, retorna a fase matriz.

Figura 11: Demonstração esquemática da deformação na estrutura de uma SMA.



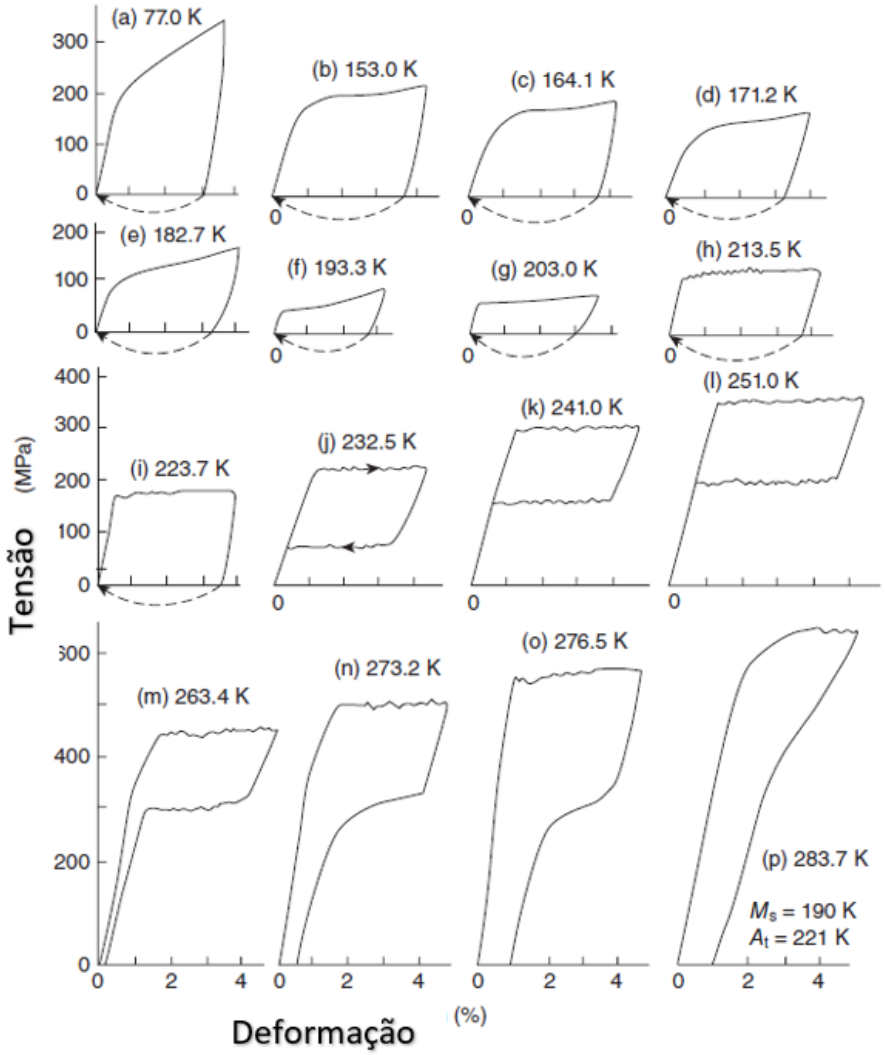
Fonte: (MOTA, 2002).

4.3 SUPERELASTICIDADE

A maioria dos metais, quando submetidos a determinada quantidade de força, apresenta uma deformação proporcional, e quando essa força está dentro de um determinado limite, que varia de material para material, é possível que o objeto recupere sua forma original por completo. Nos aços típicos essa deformação é de 0,2% a 0,4% e é chamada de deformação elástica. Já as SMA não se limitam a recuperar apenas deformação elástica, mas também deformação plástica através dos mecanismos de transformação da liga como a superelasticidade. O nome “pseudoelasticidade” é bastante utilizado também pois o material aparenta estar atuando dentro do regime elástico quando na verdade parte da recuperação da forma se dá graças a transformação de fase que ocorre em sua estrutura cristalina podendo trazer uma recuperação de uma deformação de até 8%. (SCHWARTZ, 2009).

Na Figura 12 é mostrada uma série de curvas diferentes de tensão-deformação para uma liga de Ni50.6-Ti em diferentes temperaturas. Em baixas temperaturas a tensão necessária para deformar é relativamente baixa e se mantém mesmo após a remoção da carga, porém retorna ao formato original após aquecida como mostra a linha pontilhada. Acima de 232,5 K a tensão necessária para deformar passa a aumentar e a deformação desaparece após a remoção da carga evidenciando a atuação da superelasticidade no material a partir dessa temperatura. (YAMAUCHI, 2011).

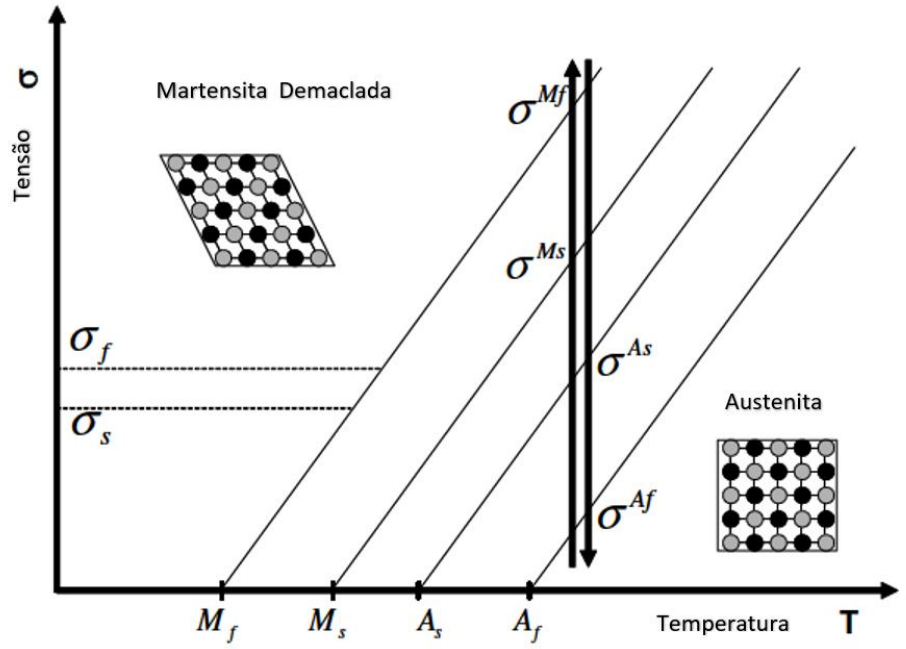
Figura 12: Gráficos de tensão x deformação para diferentes temperaturas de Ni50.6-Ti. As setas em (j) representam as tensões críticas de martensita induzida por tensão e a transformação inversa sob o alívio da tensão.



Fonte: (YAMAUCHI, 2011) – Modificado.

A superelasticidade difere da memória de forma devido a capacidade de recuperar deformações mecânicas isotermicamente. Essencialmente é o mesmo fenômeno que a memória de forma, porém as ligas superelásticas operam em temperaturas acima de A_f, ou seja, na fase Austenita. Quando a austenita é deformada a partir de esforço aplicado, a fase martensítica é induzida pela tensão e o processo de maclação se inicia como se o material tivesse sido resfriado até sua temperatura de transformação martensítica. Assim que a carga aplicada é removida, a martensita induzida pela tensão naturalmente tende a retornar a fase austenita pois a temperatura da liga está maior que A_f e a deformação é recuperada. (SCHWARTZ, 2009).

Figura 13: Gráfico esquemático de tensão x temperatura necessário para viabilizar a superelasticidade.

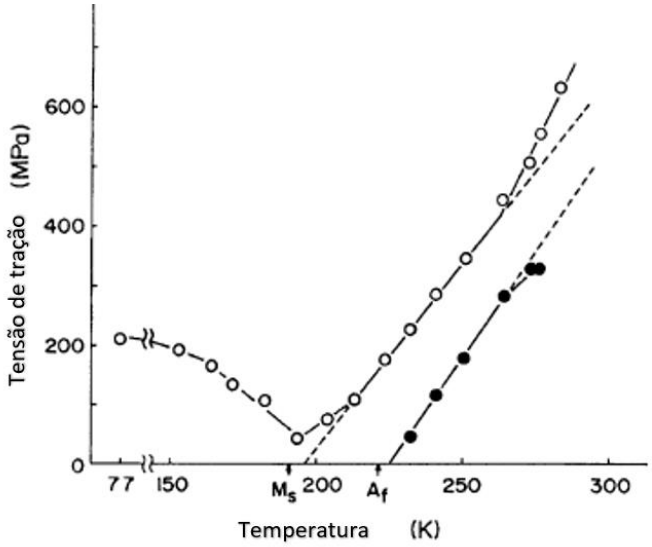


Fonte: (LAGOUDAS, 2008) – Modificado.

A tensão necessária para iniciar e completar a transformação martensítica está denotada na Figura 13 como σ^{Ms} e σ^{Mf} respectivamente. De forma similar, com o alívio da tensão, o material inicia e completa a transformação inversa σ^{As} e σ^{Af} voltando a fase austenita naturalmente e recuperando sua forma original. (LAGOUDAS, 2008).

Ao plotarmos a tensão crítica cada curva de tensão-deformação da Figura 12 nós obtemos a Figura 14, onde os círculos abertos representam a tensão crítica sob aplicação de uma carga e os círculos fechados sob a remoção da carga. É evidente a partir da figura que em temperaturas pouco acima de A_f (=221 K) a curva de tensão deformação é superelástica formando o ciclo fechado visto na Figura 12. Isso quer dizer que para temperaturas abaixo de A_f conseguimos induzir a transformação martensítica com tensão aplicada, porém o material não apresenta a superelasticidade pois A_f é a temperatura mínima para que o alívio da tensão induza a transformação reversa. (OTSUKA, 2005).

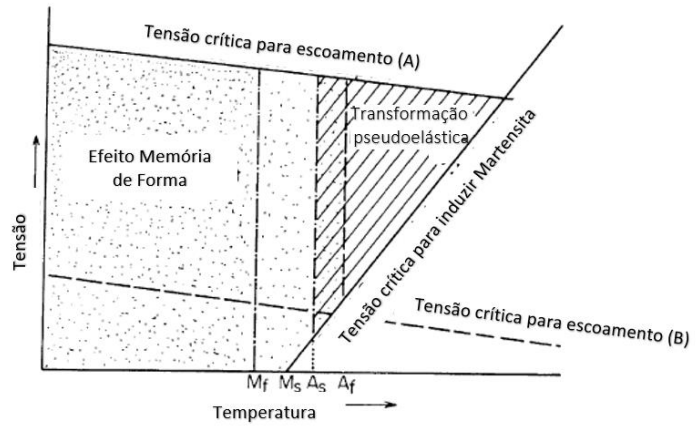
Figura 14: Gráfico tensão x temperatura reunindo pontos de M_s obtidos da Figura 12.



Fonte: (OTSUKA, 2005) – Modificado.

Como é mostrado na Figura 15, podemos enxergar melhor o comportamento da superelasticidade em relação a tensão e temperatura. A linha contínua com ângulo positivo representa a tensão crítica para induzir a transformação martensítica, sendo essencialmente a mesma linha com círculos abertos da Figura 14. A_s linhas com inclinação negativa representam dois exemplos de tensão crítica de escoamento (A) e (B) em relação a temperatura. Se um caso em que a tensão crítica de escoamento é baixa de mais, como no caso da linha (B), o efeito da superelasticidade não ocorrerá de maneira completa ou satisfatória. Isso ocorre porque o escoamento (deformação plástica) é de natureza irreversível e, portanto, pode ser acomodada facilmente abaixo da linha de tensão crítica para induzir martensita. Já a linha (A) teria uma tensão crítica de escoamento alta suficiente.

Figura 15: Gráfico esquemático tensão x temperatura com pontos críticos de temperatura e tensão em uma SMA.



Fonte: (OTSUKA, 2005) - Modificado

A superelasticidade é denotada pela região hachurada do gráfico com temperatura acima de Af. Portanto se aplicada uma carga a uma temperatura acima de Af, será induzida a transformação martensítica e a transformação inversa ocorre imediatamente após a retirada da carga. Isso ocorre pois a martensita em temperaturas acima de A_f é totalmente instável. Entre as temperaturas A_s e A_f as martensitas são parcialmente instáveis e, portanto, a superelasticidade e a memória de forma coexistem. (OTSUKA, 2005).

4.4 PRINCIPAIS SMA COMERCIAIS

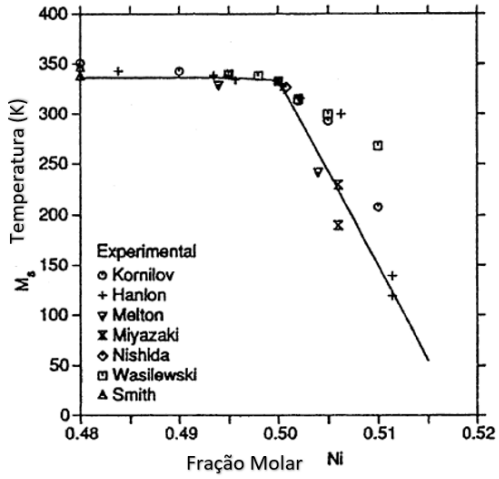
4.4.1 Nitinol

O Nitinol é liga de Ni-TI mais utilizada comercialmente, ela possui ótimas propriedades elétricas e mecânicas, alta resistência à corrosão, a fadiga em relação aos aços inoxidáveis. Ainda possui uma alta biocompatibilidade, ou seja, baixa rejeição por tecidos vivos ou órgãos, onde é largamente utilizado em diferentes áreas da saúde, como: estentes, fios ortodônticos, materiais ortopédicos, filtro e componentes para a realização de cirurgias pouco invasivas. (YAMAUCHI, 2011).

Comparadas as outras ligas menos utilizadas, as ligas de NiTi têm sua cristalografia e resposta termomecânica bem conhecidas, bem como os efeitos de tratamentos térmicos e variação de temperaturas de transformação com a composição podendo ser trabalhada de -50ºC a 110ºC (Tabela 1). Utilizada em uma composição equiatômica, as ligas de NiTi podem sofrer uma grande variação de temperatura M_s com uma pequena alteração na composição de Níquel. Nota-se que mesmo aumentando com uma solução rica em Titânio, a temperatura de transformação M_s pouco muda. Já a adição de Níquel, formando uma composição rica em Ni, decresce drasticamente a temperatura de transformação. (LAGOUDAS, 2008)

Uma composição de Ti-50.5% Ni é usada, por exemplo, para fabricar molas que atuam em válvulas de mistura de água que controlam água quente. Já uma concentração de Ti-51% Ni é usada como uma liga superelástica onde a temperatura A_f é abaixo de 0ºC como demonstrado na Figura 16. (LAGOUDAS, 2008).

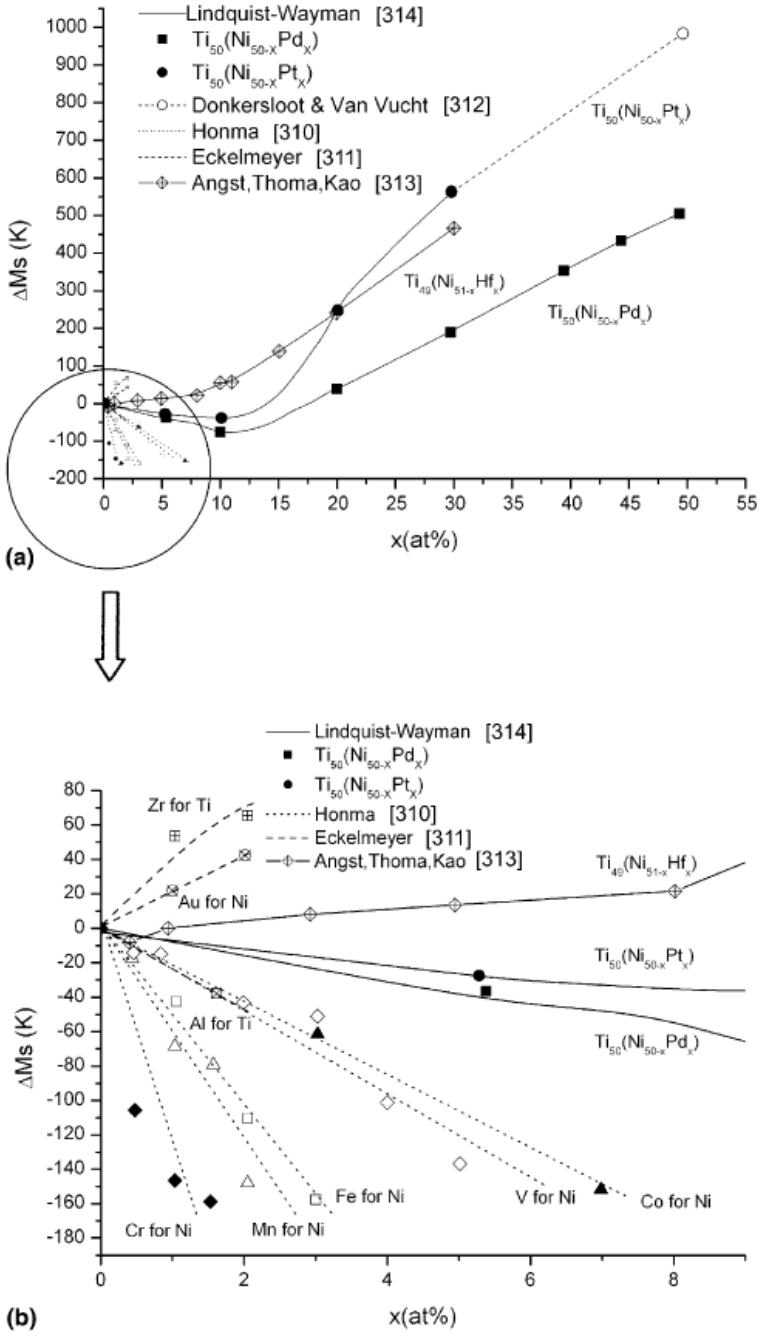
Figura 16: Temperatura M_s em função da concentração de Níquel nas ligas de Ni-Ti onde a linha contínua é obtida por cálculo termodinâmico e os diferentes símbolos representam dados obtidos por diferentes autores.



Fonte: (OTSUKA, 2005) - Modificado

Outros elementos de liga podem ser adicionados as ligas de Ni-Ti para conferir diferentes temperaturas de transformação como é mostrado na Figura 17.

Figura 17: Efeito dos elementos de liga Fe, Pd, Pt, Hf, Co, V, Mn, Au, Zr, Al e Cr na temperatura de transformação martensítica nas ligas de NiTi.



Fonte: (OTSUKA, 2005)

Nas ligas Ni-Ti-Cu o cobre geralmente é adicionado para reduzir a histerese, porém resulta em uma limitação na deformação máxima recuperável. Por exemplo, em uma aplicação com 10% de cobre, preferencialmente substituindo o níquel, a histerese é muito menor, porém a deformação máxima com recuperação é limitada a aproximadamente 4%. (LAGOUDAS, 2008).

4.4.2 Ligas de cobre

As principais ligas de cobre dos sistemas Cu-Zn e Cu-Al são consideradas bastante atrativas comercialmente devido ao seu baixo custo de fabricação e podem ser utilizadas em aplicações práticas que necessitam o EMF e a superelasticidade. Além disso, as Ligas de a base de cobre combinam também ótimas propriedades de condução elétrica e térmica tornando-a uma opção atrativa em relação as ligas de Ni-Ti principalmente para aplicações em atuadores mecânicos por exemplo. Ligas de cobre apresentam em sua maioria uma histerese menor que as ligas de Ni-Ti e uma temperatura de transformação muito dependente da composição.

As ligas Cu-Zn são bastante dúcteis e geralmente necessitam da adição do alumínio formando a liga Cu-Zn-Al para aumentar consideravelmente as temperaturas de transformação. Com uma variação da concentração de alumínio entre 5% e 10% pode-se mudar a temperatura M_s de -180ºC para 100ºC. A_s temperaturas de trabalho dessas ligas geralmente são restritas a 100ºC devido a tendência da fase matriz de se decompor em suas fases de equilíbrio se superaquecida ou envelhecida. O processo de fabricação dessas ligas é muito controlado para evitar que problemas intrínsecos à liga como, perda do zinco durante o processo de fundição e a sensibilidade da liga a tratamentos térmicos ser significativa de, de modo que a velocidade de resfriamento rápido pode resultar em dissociação de fases ou mudanças nas temperaturas de transformação. Essas ligas são úteis até tensões de aproximadamente 200 Mpa com uma deformação máxima recuperável de 3 a 4%.

Já as ligas de Cu-Al-Ni são menos sensíveis as transformações e ao envelhecimento. Com uma variação de temperaturas de M_s entre -140ºC e 100ºC (tabela 1) variando a composição do alumínio entre 14 e 14,5% as ligas de Cu-Al-Ni se assemelham bastante as de Cu-Zn-Al. Como esta liga é mais difícil de ser produzida, manganês pode ser adicionado para melhorar a ductilidade e titânio para refinar o grão. Sua principal limitação é a baixa ductilidade que resulta em uma fratura do material aos 280 Mpa com uma deformação máxima recuperável de 3%. (LAGOUDAS, 2008).

4.4 APLICAÇÕES

4.5.1 Aplicações de SMA na medicina

Os avanços da medicina moderna tornam-se possíveis frequentemente pela utilização de novos materiais. Procedimentos que antes não eram possíveis de serem realizados ou eram de grande risco, hoje, podem ser viáveis com o desenvolvimento de materiais inteligentes ou mais adequados. Os principais motivos de querermos utilizar as ligas de NiTi na medicina são sua biocompatibilidade e suas propriedades mecânicas EFM e Superelasticidade. O NiTinol tem uma excelente biocompatibilidade em comparação com outros metais como o aço inoxidável, perdendo somente para o Titânio Ti6Al. (ARMITAGE, 2003).

A corrosão é um importante fator para a escolha de ligas metálicas que serão usadas no corpo humano. Escolher um material inapropriado para esse tipo de aplicação pode resultar na liberação de substâncias alergênicas, tóxicas ou cancerígenas. Além disso, vários mecanismos de corrosão podem resultar no desprendimento e falha de implantes. (ELIAZ, 2019)

Os aços inoxidáveis do tipo 316L, ligas de cobalto, titânio puro e suas ligas são os biomateriais mais utilizados. Possuindo uma ampla aplicação em ortopedia na confecção de próteses e elementos estruturais na fixação de fraturas. Nessas situações os implantes são sujeitos a falha através de desgaste, corrosão e fadiga. Por isso, as propriedades de resistência a fadiga, resistência a corrosão, desgaste e tenacidade são extremamente relevantes para a melhor performance dos implantes. (SERTÓRIO, 2018).

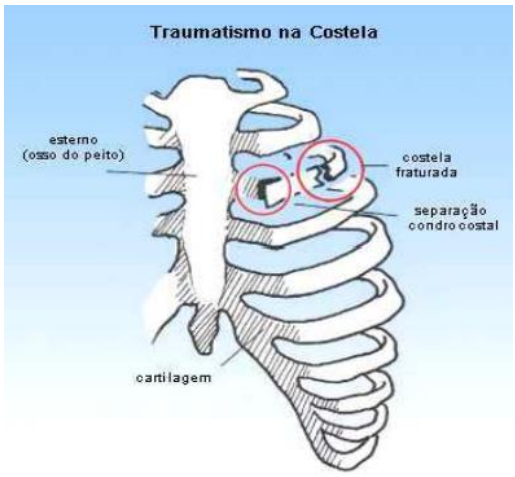
As ligas de NiTi apresentam um bom balanço entre essas propriedades, porém a o alto teor de níquel presente na liga causa preocupação devido a sua toxicidade de forma que, quando em alta concentração, pode causar câncer e quando em baixa concentração pode causar alergias. Mas como o níquel se apresenta na forma de um composto intermetálico com o titânio, ao contrário de ligas convencionais outros materiais são adicionados em pequenas quantidades visando a melhoria de uma ou mais propriedade. A exemplo do tratamento da superfície das ligas, melhora-se a biocompatibilidade. (MORGAN, 2004).

Os materiais metálicos comumente utilizados para aplicações biomédicas, tais como o aço inoxidável 316L, apresentam 0,4% de deformação elástica em comparação com os 8% das ligas de NiTi com recuperação total e 14% com alguma deformação plástica associada. Tais características são possíveis devido a superelasticidade das ligas de NiTi que se assemelham

em módulo de elasticidade dos ossos que é de E=12,0 a 20,0 GPa. (VILLARINHO, 2010) e (VILLARINHO, 2010).

O Hospital de Pronto Socorro de Porto Alegre (HPS) é um centro de trauma nível 1 onde se realizam cerca de 25.000 atendimentos mensais dos quais, aproximadamente, 1.000 pacientes apresentam um grau de traumatismo torácico conforme relatório anual de 2001 da PROCEMPA (exemplo na Figura 18). Em média, 2% dos casos de trauma torácico formam um subgrupo de trauma contuso grave e 1/5 destes apresentam uma instabilidade na parede torácica. Portanto aproximadamente 48 pacientes por ano serão diagnosticados com tórax instável. (VILLARINHO, 2010).

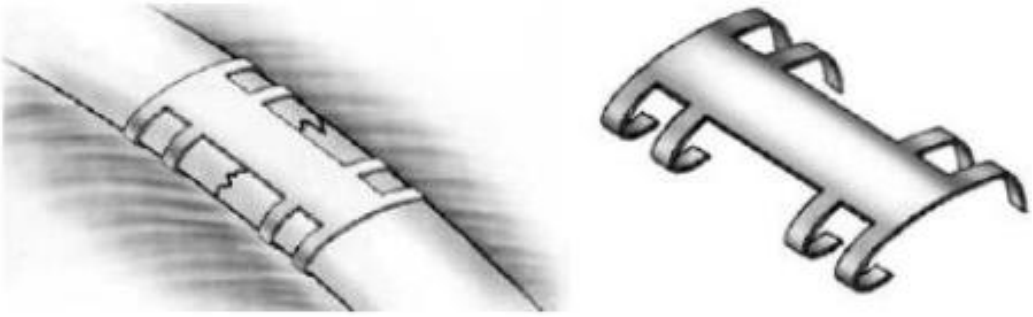
Figura 18: Demonstração esquemática de uma fratura em um arco costal.



Fonte: (VILLARINHO, 2010).

É definido como um tórax instável um caso em que há 3 ou mais arcos costais consecutivos fraturados. No caso de um paciente com tórax instável, é comum utilizar-se um grampo de Judet de aço inoxidável ASTM 316L fixado na região da fratura para melhorar a mecânica respiratória. Contudo, os grampos de aço inoxidável ASTM 316L requerem maior abertura de incisão, auxílio de ferramentas especiais e de maior esforço físico do cirurgião (SERTÓRIO, 2018). E por isso as características da superfície do aço inoxidável podem ser comprometidas, pois o cirurgião ao fazer força provoca arranhões na superfície do grampo. Um exemplo de um grampo de JUDET está representado na Figura 19. (VILLARINHO, 2010).

Figura 19: Esquematização da utilização de um grampo de Judet.



Fonte: (VILLARINHO, 2010).

O emprego de uma liga de NiTi para essa aplicação traz melhor biocompatibilidade, adequadas propriedades mecânicas, ótima resistência a corrosão e, principalmente, dispensa a utilização de parafusos.

4.5.2 Aplicação de SMA na indústria aeroespacial

Durante a década de 1960 a indústria aeroespacial estava em seus anos de ouro com inúmeros lançamentos com foguetes cada vez mais capazes de transportar cargas pesadas para o espaço. Durante esse período de corrida espacial, novas tecnologias eram desenvolvidas todos os anos, trazendo cada vez mais inovações para todas as áreas como a computação, engenharias, materiais, sistemas, comunicação etc. Não demorava tanto até que essas novas tecnologias fossem implementadas no dia a dia da população trazendo melhorias em nossas vidas e, com isso, a expectativa de termos cada vez mais avanços e conquistas maiores como a chegada do homem a lua. Entre os anos de 1969 e 1972, durante o programa Apollo da NASA, 12 astronautas pisaram na lua. Os primeiros astronautas a utilizarem um veículo de transporte para a superfície da lua faziam parte da missão Apollo 15 em 1971.

Também chamado de Rover Lunar (Figura 20), o veículo utilizado pelos astronautas da NASA aumentou consideravelmente o alcance das missões na superfície devido à dificuldade de locomoção que o traje e a baixa gravidade traziam. Uma das tecnologias que permitiu o veículo a se locomover bem na superfície lunar foi o pneu de molas criada a partir de uma parceria da NASA com a fabricante de pneus Goodyear. Um pneu sem a necessidade de ar que consiste em centenas de fios de aço inoxidável enrolados tecidos em uma malha, trazendo a capacidade de suportar peso e de se conformar ao terreno também. Trazendo boa tração em terrenos arenosos e rochosos com uma boa durabilidade. (KILKENNY, 2017).

Figura 20: Foto do rover lunar utilizado na Apollo 15.

Fonte: (KILKENNY, 2017).

Pneus de borracha não poderiam ser utilizados em missões como essas onde pressão e temperatura ambiente são muito baixas. Em marte, por exemplo, as temperaturas mínimas podem chegar até -107ºC fazendo com que a borracha fique rígida suficiente para perder sua elasticidade e vira estilhaços quando sofrem um impacto. Além disso, os pneus de borracha junto com os aros e entrelaçamento, impediriam os Rovers de se manterem leves, característica crucial quando falamos de transporte para outros planetas. (PIRELLI, 2016).

Essa tecnologia conseguiu atender muito bem a necessidade dos astronautas nas missões Apollo por serem curtas, porém, quando testadas em um terreno que simula a superfície marciana, foram encontrados os seus limites. No Laboratório de Propulsão a Jato da NASA (JPL) os pneus feitos de fios de aço inoxidável apresentavam dificuldades com o terreno simulado devido as deformações plásticas desenvolvidas em um período mais longo de utilização como pode ser visto na Figura 21. (BENZING, 2012).

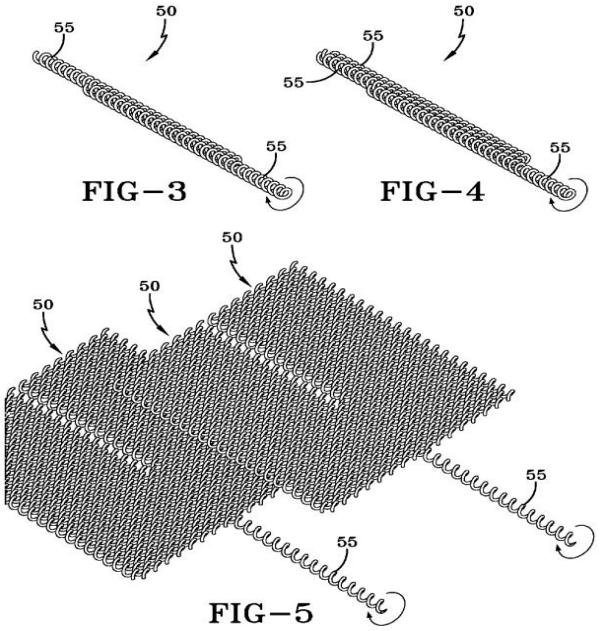
Figura 21: Pneu de malha de aço inox durante teste de resistência com aparentes deformações permanentes.

Fonte: (KILKENNY, 2017).

Assim se fez necessário encontrar um material resistente e durável como o aço, mas que possa suportar mais deformação sem deformar permanentemente. Para contornar essa falha crônica dos pneus de fios de aço inoxidável, o centro de pesquisa Glenn da NASA desenvolveu um pneu também sem pressurização que utiliza ligas com memória de forma. Como vimos anteriormente, as SMA têm a capacidade de deformar até 8% de sua forma original através da superelasticidade em comparação com os materiais comumente utilizados como aços mola e compósitos que conseguem apenas deformar de 0,2% a 0,4% elasticamente. As SMA conseguem entregar essas propriedades se mantendo dentro do requisito de ser um material leve, que vital para a exploração espacial.

Diferente das borrachas, as ligas de NiTi, através do controle da proporção de Níquel na liga, podem operar muito bem nas temperaturas baixas da superfície marciana pois utilizarão sua propriedade de superelasticidade. Sabemos que para que a superelasticidade possa ser ativada, a liga precisa estar na fase austenita com a temperatura da superfície do planeta e dessa forma, ao entrar em contato com uma superfície irregular, a tensão gerada nos fios da liga induzirá transformação martensítica que, em sequência, sofrerá a transformação inversa ao ser aliviada a tensão, recuperando assim o formato original com uma capacidade muito maior de deformação “elástica” do que as ligas utilizadas anteriormente. (BENZING, 2012).

Figura 22: Fios helicoidais sendo enrolados para formar a superfície do pneu.



Fonte: (BENZING, 2012).

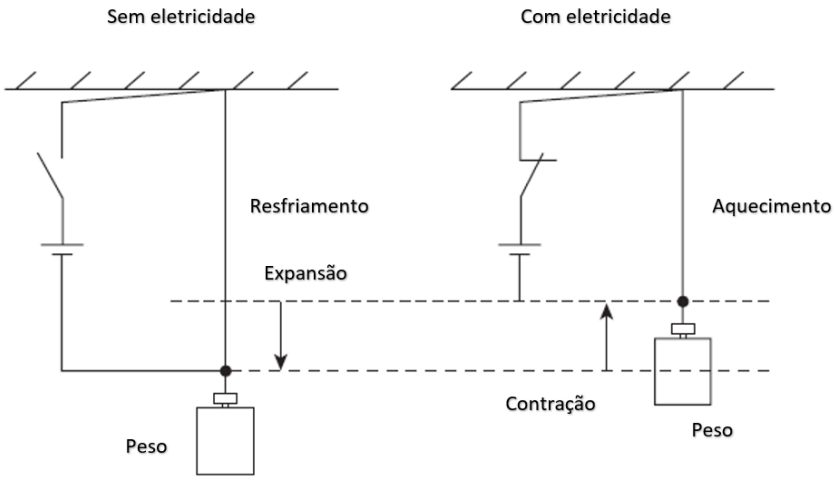
No movo modelo de pneu, além da mudança de material, a sua estrutura também foi modificada onde invés de se utilizar uma malha de fios, passou-se a utilizar molas helicoidais entrelaçadas (fios enrolados que deformam elasticamente com pequena perda de energia). Essa nova forma de montagem dos fios do pneu traz melhorias como uma maior capacidade de carga, maior durabilidade devido as tensões no fio das molas helicoidais serem mais distribuídas (Figura 22) . Além disso, o novo design promove uma melhor relação de peso do pneu pelo peso do veículo suportado. A manufatura do pneu também foi simplificada já que para montar os fios, basta enrolar uma mola na outra, o que traz mais resistência também do que a malha que tinha os fios crimpados. (BENZING, 2012).

4.5.3 Aplicação de SMA em atuadores elétricos

As SMA tem sido aplicada em diversas áreas onde a mudança de temperatura do meio dita como a liga deve atuar. De forma simplificada, uma SMA pode ser usada como um atuador e um sensor ao mesmo tempo como no caso de um misturador de água quente. Porém, é possível também utilizar as SMA como atuadores elétricos que, são dispositivos capazes de transformar energia elétrica em energia mecânica (movimento). Devido à alta resistência elétrica das ligas de Ni-Ti, uma corrente elétrica percorre o material provocando a liberação de calor devido a um aumento de temperatura (efeito Joule), fazendo com que o atuador entre em contato ou cesse

o contato com alguma outra parte do equipamento. Promovendo a abertura e fechamento de portar, válvulas e outros dispositivos. (YAMAUCHI, 2011) e (PICIRILLO, 2012).

Figura 23: Esquematização da atuação de uma SMA acionada por corrente elétrica.

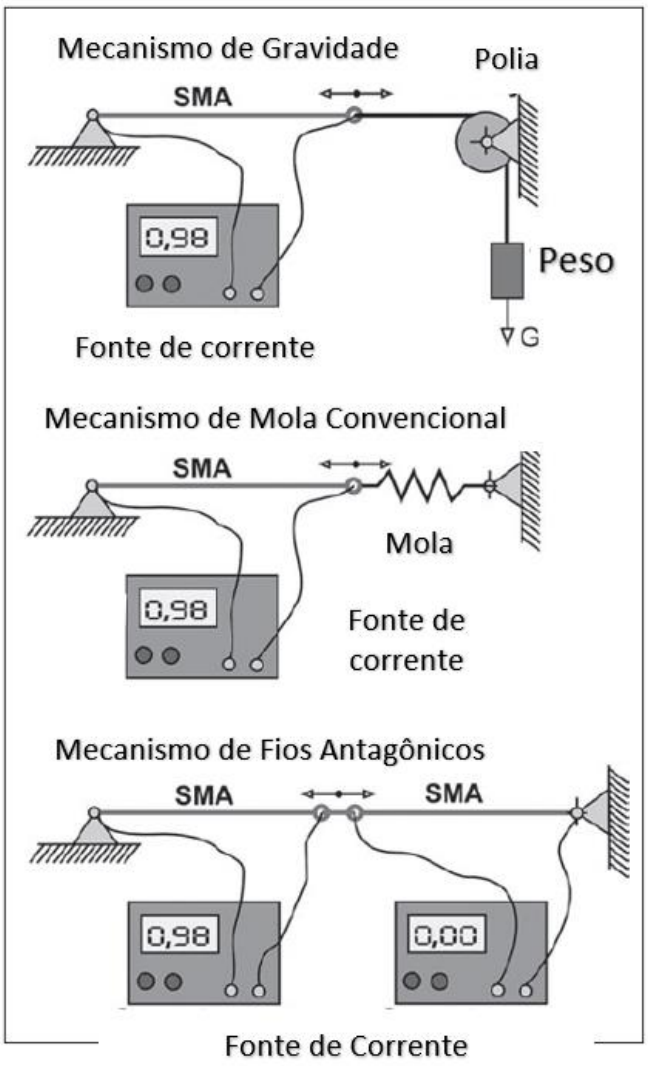


Fonte: (YAMAUCHI, 2011) – Modificado.

Na Figura 23, quando o circuito que passa por uma liga de Ni-Ti está desligado, o fio se deforma devido a reorientação das variantes da martensita. Quando o circuito é ligado, o fio esquenta e retorna ao seu comprimento original devido a transformação reversa. Assim, a atuação do fio é controlada pela corrente elétrica. A grande vantagem dos atuadores que utilizam SMA é pequena a quantidade de componentes e mínima complexidade do sistema. Isso torna os atuadores de SMA ideais para aplicações que necessitam de um sistema de maior confiabilidade e menor peso devido a necessidade de apenas uma liga SMA e um mecanismo de aquecimento ou arrefeicimento. (YAMAUCHI, 2011).

Os atuadores de SMA podem ser feitos em forma de fios, molas ou fitas, dependendo da necessidade da aplicação em que serão usadas. Para os atuadores com memória de forma de uma via, um fio que comprime quando aquecido por uma corrente elétrica não retorna a sua forma original sem a ação de uma força externa. Por isso, para essas ligas, se utiliza um mecanismo de retorno para que o material volte a posição original. Esse mecanismo funcionar por gravidade, por ação de uma mola ou até mesmo por outro fio de SMA oposto ativado por corrente elétrica também (Figura 24). (MIKOVÁ, 2015).

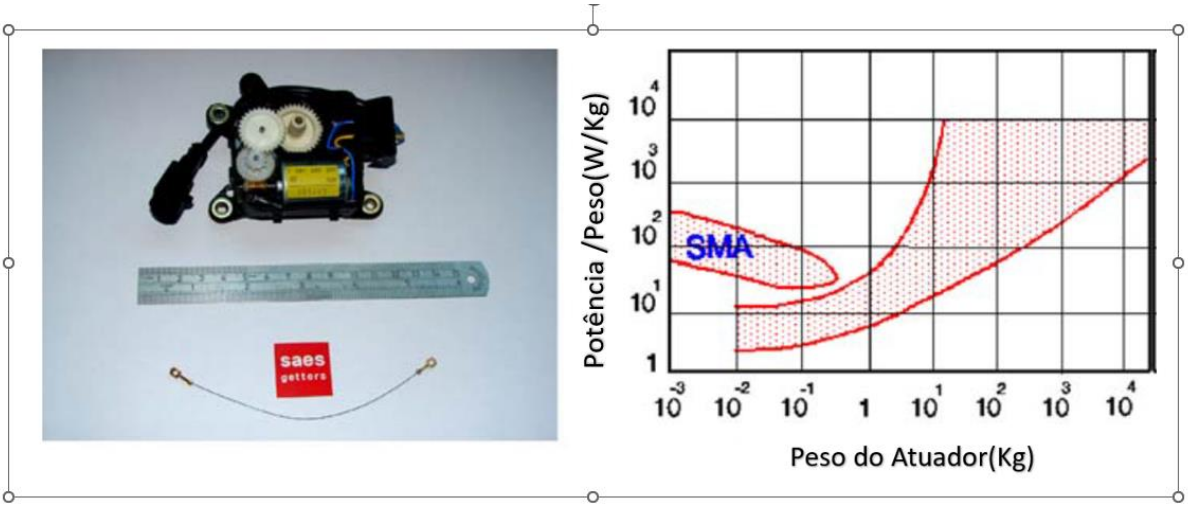
Figura 24: Mecanismos de retorno para atuadores de SMA de uma via.



Fonte: (MIKOVÁ, 2015) – Modificado.

Existem também as ligas de NiTinol de duas vias que podem servir como atuadores pois podem "lembrar" duas formas diferentes, ao aquecer e ao resfriar, porém o uso de um mecanismo de retorno com uma liga de uma via leva a uma estabilidade melhor no controle com condições mais consistentes de uso. Mais de 90% das aplicações de atuadores elétricos de SMA são feitas de NiTinol devido a melhores propriedades de memória de forma. (MERTMANN, 2008).

Figura 25: Comparação de um atuador comum com um atuador SMA.



Fonte: (FUMAGALLI, 2009)- Modificado.

Na Figura 25 está representada uma comparação entre atuadores convencionais e um atuador de SMA evidenciando que para aplicações menores, os atuadores de SMA apresentam uma relação de peso potência muito mais interessante que os convencionais e com mecanismo bastante simplificado. (FUMAGALLI, 2009).

4. METODOLOGIA

4.1. PROCEDIMENTO

A pesquisa foi do tipo descritiva, com o objetivo de fazer um aprofundamento do conhecimento científico nas propriedades e aplicações das ligas de forma, em que a coleta de informações foi feita através de livros, artigos e trabalhos acadêmicos que tratam do assunto.

4.2. ANÁLISE DE DADOS

A apresentação e análise das bibliografias foram feitas de forma qualitativa, em que o autor analisou de forma crítica os dados coletados sobre o tema, proporcionando um profundo e exaustivo estudo do tema proposto e ampliando o conhecimento do autor e dos leitores.

5 CONCLUSÃO

Com o objetivo de trazer uma análise simplificada sobre os conceitos das ligas com memória de forma, o presente trabalho reuniu diversas fontes de conhecimento para revisar, desde livros e artigos científicos até patentes e vídeos de ciência. Foi mostrado como é a estrutura cristalográfica de uma SMA, como funciona o mecanismo que dá as ligas suas propriedades únicas, a transformação martensítica, além do efeito de memória de forma e a superelasticidade. Comentamos também algumas de suas aplicações principais como o uso na medicina, em dispositivos elétricos e aeroespacial e vimos que essas ligas têm um potencial grande de criar novas tecnologias e melhorar as existentes.

No geral, foi possível notar que as SMA prometem ser utilizadas em muitas aplicações devido as suas propriedades de recuperação da forma original tanto na utilização com memória de forma quanto na superelasticidade. Vimos também a influência que a composição das ligas tem em suas propriedades como, a pequena variação do níquel de 0,1 a 1,5% pode alterar bruscamente a temperatura de transformação das ligas de NiTi (de -50 a 110ºC) e como a adição de outros elementos de liga nas ligas de Cu-Zn e Cu-Al são utilizadas para melhorar suas propriedades como ductilidade e aumentar temperaturas de transformação.

As aplicações dessas ligas variam bastante desde a medicina com inúmeras aplicações de sucesso como os stents e as aplicações ortodônticas até atuadores elétricos e rodas para serem usadas em missões aeroespaciais. Porém, muitas pesquisas ainda estão sendo feitas em cima desses materiais para desvendar novas aplicações e procurar a redução de seus custos de fabricação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARMITAGE, David A.; PARKER, Terry L.; GRANT, David M. Biocompatibility and hemocompatibility of surface-modified NiTi alloys. **Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials**, v. 66, n. 1, p. 129-137, 2003.

BENZING, I. I.; KISH, J. C.; ASNANI, V. M. **Tire**. ntrs.nasa.gov, 27 mar. 2012.

CAVALCANTI, F. A. **Influência dos precipitados de nb nas propriedades mecânicas de ligas cu-al-be passivas do efeito memória de forma**. 2018. 43p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.

CHEN, Katherine C. NiTi-Magic or Phase Transformation? In: **Proceedings of the ASEE Annual Conference & Exposition:** Nashville, TN. 2003.

ELIAZ, N. **Corrosion of Metallic Biomaterials: A Review**. Materials, v. 12, n. 3, p. 407, 28 jan. 2019.

FUMAGALLI, L.; BUTERA, F.; CODA, A. SmartFlex® NiTi Wires for Shape Memory Actuators. **Journal of Materials Engineering and Performance**, v. 18, n. 5-6, p. 691–695, ago. 2009.

HODGSON, Darel E.; WU, Ming H.; BIERMANN, Robert J. Shape memory alloys. **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**, p. 897-902, 1990

KILKENNY, N. **Reinventing the Wheel**. Disponível em https://www.nasa.gov/specials/wheels/, 2017. Acesso em : 20 de maio de 2023

LAGOUDAS, Dimitris C. (Ed.). **Shape memory alloys: modeling and engineering applications**. Springer Science & Business Media LCC, 2008. 432 p.

MAGRI, G.; ROMAGNOLI, M.; PERNA, C. D. SMA actuator for gas combi boiler diverting valve. **Sensors and Actuators A Physical,** 2006. 355-366.

MERTMANN, M.; VERGANI, G. Design and application of shape memory actuators. **The European Physical Journal Special Topics**, v. 158, n. 1, p. 221–230, 1 maio 2008.

MIKOVÁ, Ľ. et al. **APPLICATION OF SHAPE MEMORY ALLOY (SMA) AS ACTUATOR. METALURGIJA**, v. 54, p. 169–172, 2015.

MORGAN, N. B. Medical shape memory alloy applications—the market and its products. **Materials Science and Engineering:** A, v. 378, n. 1-2, p. 16-23, 2004.

MOTA, A. R. **Introdução ao Estudo da Transformação Martensítica em ligas de Cobre com Memória de Forma**. Universidade Estadual de Campinas, UNICAMPDEMA. Outubro, 2002.

OTSUKA, Kazuhiro; REN, Xiabing. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. **Progress in materials science**, v. 50, n. 5, p. 511-678, 2005.

PICIRILLO, V. **Análise da Eficiência Térmica de um Atuador SMA em um Sistema Aeroelástico.** VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. São Luís - MA. 2012.

ROCHA, D. A. M. M.; BRITO, G. A. G.; OSÓRIO, J. N. A. M. P.; CASTANHEIRA, M. L. A. C. S.; FERREIRA, P. F. P. **Ligas com Memória de Forma: Como se educa uma liga com memória de forma?**. 2012-2013. 11f. Relatório da Unidade Curricular Projeto FEUP (Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Universidade do Porto e FEUP, Porto. 2012-2013.

SCHWARTZ, M. **Smart Materials**. 1. ed. United States of America: LLC, 2009

(SERTÓRIO, 2018) SERTÓRIO, A. R. **Ligas Ni-Ti (Nitinol) com efeito memória de forma: futuro ou utopia?.** 2018. 61p. Dissertação (Bacharelado em Engenharia de Materiais) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2018.

SUTOU, Y.; KAINUMA, R.; ISHIDA, K. Effect of alloying elements on the shape memory properties of ductile Cu–Al–Mn alloys. **Materials Science and Engineering**: A, v. 273, p. 375-379, 1999.

VILLARINHO, D. J. et al. Liga com memória de forma: estudo preliminar do grampo de judet de nitinol e sua possível aplicação em tórax instável. **Revista HCPA**. Porto Alegre. vol. 30, n. 1 (2010), p. 43-48, 2010.

VILLARINHO, D. J. **Caracterização de uma liga NiTi visando confecção e aplicação como material biomédico em órtese Grampo de Judet**. 2010. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

PIRELLI. **Why rubber tyres don't work on Mars**. Disponível em: https://www.pirelli.com/global/en-ww/life/why-rubber-tyres-don-t-work-on-mars, 2016. Acesso em 20 de maio de 2023.

YAMAUCHI, K. *et al*. **Shape memory and superelastic alloys**: **Technologies and applications.** 1. ed. United Kingdom: Woodhead, 2011.