

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GIOVANA HENRIQUE**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO NITINOL EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

**LONDRINA**

**2022**

**GIOVANA HENRIQUE**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO NITINOL EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

**STUDY OF THE USE OF NITINOL IN COMPOSITE MATERIALS**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho.

**LONDRINA**

**2022**



Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GIOVANA HENRIQUE**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO NITINOL EM MATERIAIS COMPÓSITOS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 07/dezembro/2022

---

Prof. Dr. Fabiano Moreno Peres  
Doutorado em Engenharia Metalúrgica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina

---

Prof. Dr. Marcio Florian  
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina

---

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho  
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Londrina

**Londrina**  
**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Sueli e Júlio, cujo suporte, apoio e incentivo ao longo desses anos tornaram possível a realização desse sonho.

Aos meus irmãos, Gabriel e Gustavo, sou grata por todos os conselhos e carinho nos momentos mais difíceis.

Ao meu namorado, Arthur, pelo companheirismo e paciência em todos os momentos de inquietudes e madrugadas de estudos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luiz Eduardo de Carvalho, pela disponibilidade e paciência infinita ao longo dos semestres ímpares que compartilhamos à distância.

Aos grandes mestres e amigos, Prof. Dra. Meire e o Prof. Dr. Marcos, que acreditam em mim e propiciaram o início dessa trajetória.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e todos os professores do Departamento Acadêmico de Engenharia de Materiais (DAEMA) que influenciaram diretamente na minha formação como Engenheira.

## RESUMO

A oportunidade de unir dois ou mais materiais diferentes com a finalidade de se atingir estruturas capazes de se adaptar ao contexto operacional tem orientado o desenvolvimento de compósitos inteligentes com propriedades funcionais capazes de controlar a forma, rigidez e vibração. Neste cenário, os compósitos híbridos reforçados com memória de forma são excelentes alternativas, uma vez que os fios dessas ligas possuem capacidade de modificar a rigidez e ou a elasticidade de um compósito por meio de estímulos externos como termo-mecânicos, elétricos e magnéticos. Entretanto, além da dificuldade relacionada ao controle do comportamento das ligas de memória de forma, os compósitos híbridos apresentam ainda a complexidade intrínseca da fabricação e caracterização dessa classe de materiais. Assim, este trabalho aborda compósitos híbridos com reforço de Nitinol e tem como objetivo apresentar um estudo sobre o efeito da memória de forma, o desenvolvimento e a fabricação dessas estruturas em aplicações de materiais inteligentes, expandindo a pesquisa científica nacional a respeito do tema.

**Palavras-chave:** compósitos inteligentes; compósitos híbridos com memória de forma; ligas de memória de forma; Nitinol.

## ABSTRACT

The opportunity to unite two or more different materials in order to achieve structures capable of adapting to the operational context has guided the development of intelligent composites with functional properties capable of controlling shape, rigidity and vibration. In this scenario, hybrid composites reinforced with shape memory are excellent alternatives, since the wires of these alloys have the ability to modify the stiffness and/or elasticity of a composite through external stimuli such as thermo-mechanical, electrical and magnetic. However, in addition to the difficulty related to controlling the behavior of shape memory alloys, hybrid composites also present the intrinsic complexity of manufacturing and characterizing this class of materials. Thus, this work addresses hybrid composites with nitinol reinforcement and aims to present a study on the effect of shape memory, the development and manufacture of these structures in applications of smart materials, expanding national scientific research on the subject.

**Keywords:** smart composites; shape memory hybrid composites; shape memory alloys; Nitinol.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama de fases do sistema Ni-Ti. ....	16
Figura 2 - Estrutura cristalina do Nitinol nas fases (a) austenita e (b) martensita .....	17
Figura 3 – Curva da temperatura inicial de transformação da austenita em função da porcentagem, em peso, de Níquel. ....	17
Figura 4 – Vias para transformações na liga de Nitinol: Primeiro estágio (B2 → B19'), segundo estágio (B2 → R) e terceiro estágio (B19' → B2 e R → B2). ....	19
Figura 5 – Histerese térmica do Nitinol – temperaturas de transformação de fase. ...	20
Figura 6 - Deformação da rede da fase Austenítica. ....	21
Figura 7 - Acomodação por Maclação e Deslizamento. ....	21
Figura 8 - Representação esquemática da mudança de fase durante o efeito de memória de forma: a) austenita, b) martensita maclada, c) martensita demaclada. .	22
Figura 9 - Fases do material compósito. ....	24
Figura 10 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com o reforço. ....	26
Figura 11 - Representação SMAHC. ....	27
Figura 12 - Tipos de integração, métodos de processamento e propriedades aprimoradas em SMAHC. ....	29
Figura 13 - Esquema representativo rotor/mancal. ....	31
Figura 14 - Ponte com atuadores de SMA. ....	31
Figura 15 - Alinhamento e método de fabricação. ....	34
Figura 16 - Sistema de moldagem. ....	35
Figura 17 - Modelos de Stents: a) Dominus® com indicação para coarctação de aorta; b) Dominus® Stent-Graft; c) Linus ® Stent-Graft. ....	37
Figura 18 - Protótipo de uma mão com fios de nitinol. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades Nitinol comercial.....	18
Tabela 2 - Áreas de pesquisa SMAHC.....	33

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SMA	Liga de Memória de Forma
MEMS	Micro Eletrônico de Sistemas Mecânicos
NEMS	Nano Eletrônico de Sistemas Mecânicos
SME	Efeito de Memória de Forma
Ni-Ti	Nitinol
NOL	Naval Ordnance Laboratory
TTM	Transformação Termoelástica Martensítica
MTI	Martensita Termicamente Induzida
MIT	Martensita Induzida por Tensão
OWSME	Efeito de Memória de Forma Unidirecional
TWSME	Efeito de Memória de Forma Bidirecional
SMAHC	Compósitos Híbridos com Memória de Forma
CFRP	Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono
LCOE	Custo Nivelado de Energia
LGWH	Calor Residual de Baixa Qualidade

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_I$	Temperatura de início da transformação austenítica
$A_F$	Temperatura de término da transformação austenítica
$M_d$	Máxima temperatura em que a martensita é formada por tensão
$M_I$	Temperatura de início da transformação martensítica
$M_F$	Temperatura de término da transformação martensítica
$\rho_D$	Densidade
$\rho_R$	Resistividade
$c$	Calor específico
$k$	Condutividade térmica
$\alpha$	Coefficiente de expansão térmica
$\sigma_R$	Tensão de ruptura
$\sigma_y$	Limite de escoamento
$E$	Módulo de Young
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\chi$	Susceptibilidade magnética

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>12</b>
<b>2.1</b>	<b>Objetivo Geral</b> .....	<b>12</b>
<b>2.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>12</b>
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>13</b>
<b>3.1</b>	<b>Materiais Inteligentes</b> .....	<b>13</b>
<b>3.2</b>	<b>Ligas com Memória de Forma</b> .....	<b>14</b>
<b>3.3</b>	<b>Ligas Níquel – Titânio</b> .....	<b>15</b>
3.3.1	Transformação Termoelástica Martensítica .....	19
3.3.2	Efeito da Memória de Forma .....	22
<b>3.4</b>	<b>Materiais Compósitos</b> .....	<b>23</b>
3.4.1	Interface Reforço/Matriz .....	23
3.4.2	Matriz .....	24
3.4.3	Reforço .....	25
<b>3.5</b>	<b>Compósitos Híbridos com Memória de Forma</b> .....	<b>27</b>
<b>3.6</b>	<b>Metodologia</b> .....	<b>28</b>
<b>3.7</b>	<b>Resultados e Discussão</b> .....	<b>28</b>
3.7.1	Estudos .....	28
3.7.2	Fabricação .....	34
3.7.3	Aplicações .....	35
<u>3.7.3.1</u>	<u>Medicina</u> .....	<u>36</u>
<u>3.7.3.2</u>	<u>Energias Alternativas</u> .....	<u>38</u>
3.7.3.2.1	<i>Exergy®</i> .....	38
<u>3.7.3.3</u>	<u>Robótica</u> .....	<u>39</u>
<u>3.7.3.4</u>	<u>Outros</u> .....	<u>40</u>
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>41</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da ciência e da tecnologia proporcionou, gradativamente, um progresso no comportamento mecânico, compatibilidade química e desempenho em trabalho dos materiais. Esse avanço foi fundamental para a expansão e o amadurecimento da classe dos materiais compósitos que viabilizou a união de dois ou mais materiais de natureza diferentes com o propósito de fornecer propriedades capazes de atender as necessidades pleiteadas pelas áreas: aeronáuticas, aeroespacial, médica, naval, automotiva e petróleo e gás. Consoante a esse preceito, os compósitos foram os grandes precursores na demanda por novos materiais com propriedades específicas, como baixo peso e elevada resistência.

O princípio da ação combinada dos compósitos, possibilitou o desenvolvimento de estruturas ativas capazes de detectar e adequar-se aos estímulos externos, dando origem aos compósitos inteligentes. Também chamados de compósitos híbridos, eles possuem propriedades funcionais que possibilitam o controle de forma, vibração, capacidade de amortecimento, rigidez e monitoramento de sua integridade estrutural.

Dentre os materiais inteligentes, utilizados para obtenção dos compósitos híbridos, destacam-se os com memória de forma. Estas, são estruturas caracterizadas pela habilidade de recuperar a forma original quando submetidos a estímulos, como temperatura e tensão mecânica. Em particular, as ligas compostas por Níquel-Titânio (Nitinol), são as mais comumente utilizadas, em virtude da sua elevada capacidade de retornar ao estado inicial (deformações de até 8%), sua maior histerese pseudoelástica, resistência à fadiga, corrosão, biocompatibilidade e resistência elétrica.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir com o tema por meio de uma investigação das características desses materiais compósitos com incremento de Nitinol e suas principais aplicações na atualidade, na forma de uma revisão da literatura.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo bibliográfico a respeito de materiais compósitos híbridos com incremento de liga de memória de forma (Nitinol).

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Explorar por meio de pesquisas bibliográficas os aspectos fundamentais dos compósitos híbridos com incremento de liga de memória de forma;
- Discorrer sobre ligas de memória de forma, em particular, a liga de Nitinol;
- Apresentar os estudos e aplicações mais relevantes atualmente de materiais compósitos com incremento de Ni-Ti;
- Contribuir com a pesquisa científica nacional, por meio da produção bibliográfica a respeito do tema.

### **2.3 Justificativa**

Os sistemas adaptativos são estruturas capazes de se adaptar ao meio ambiente modificando sua posição, forma e rigidez. Nos últimos anos, o emprego de materiais com propriedades inteligentes despontou no mercado em virtude do incremento desses materiais nessas estruturas. Entre os materiais inteligentes, as ligas com memória de forma possuem um enorme potencial de aplicação, sobretudo, as de Nitinol. A incorporação de ligas de memória de forma, sob a forma de fios, acrescenta uma pequena massa ao compósito capaz de lhe garantir ganhos na sua propriedade de rigidez, além de uma mudança controlada em sua forma.

Quando é realizada uma pesquisa sobre o assunto em português observa-se uma escassez de referências nacionais.

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo contribuir com o assunto por meio de uma investigação das características desses materiais compósitos com incremento de Nitinol e suas principais aplicações na atualidade, na forma de uma revisão da literatura.

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 3.1 Materiais Inteligentes

A natureza atua como uma grande fonte de inspiração para pesquisadores que se empenham em desenvolver estruturas e sistemas. A principal singularidade estimulante é o comportamento adaptativo característico dos sistemas naturais capazes de adequar as adversidades e perpetuar as espécies. À vista disso, pode-se dizer que a evolução humana está diretamente relacionada ao controle e manipulação do ambiente circundante, uma vez que há milhões de atrás o homem começava a utilizar a pedra como ferramenta, enquanto que recentemente manipula novos materiais, como os materiais inteligentes, capazes de serem utilizados em praticamente todos os setores (MICHAUD, 2004).

Os materiais inteligentes, são aqueles capazes de alterar, de maneira controlável e reversível, sua propriedade, forma e configuração de acordo com estímulos externos do meio em que se encontram (OLIVEIRA, 2013). Também são denominados como materiais adaptativos, multifuncionais ou ativos. Para Lagoudas (2008), os materiais ativos operam como um subgrupo de materiais multifuncionais que atuam como sensores e atuadores. De forma geral, o termo material inteligente é frequentemente utilizado.

Dentre os inúmeros cenários, os materiais inteligentes podem ser agrupados conforme as diversas formas de acoplamento. Na atualidade, os materiais mais empregados são os materiais piezoelétricos, os fluidos eletro-magneto-reológicos, os materiais magneto estritivo e as ligas de memória de forma (SMA – *Shape Memory Alloys*). As SMA's possuem a capacidade de alterar suas propriedades e formas de acordo com a aplicação de um campo eletromagnético, de campo de tensão, da temperatura ou ainda por meio da diferença de potencial que irão ser responsáveis por modificações nas propriedades físico-químicas do material, desde que empregadas dentro de uma faixa de trabalho útil (GANDHI, 1992).

Outras aplicações para os materiais inteligentes desenvolvidas com sucesso, com enfoque na necessidade do material se ajustar ao ambiente e/ou modificar sozinho vem sendo desenvolvidas. Nessa perspectiva, pode-se citar os polímeros com memória de forma, os polímeros óticos ativados, a fibra ótica e as ligas ferromagnéticas de memória. Além, dos dispositivos inteligentes em micro (MEMS –

Micro Eletrônico de Sistemas Mecânicos) e nano (NEMS – Nano Eletrônico de Sistemas Mecânicos) escalas (OLIVEIRA, 2013).

Entretanto, a aplicação mais utilizada com materiais inteligentes é a de sensores e atuadores. É importante ressaltar que para a seleção dos materiais voltadas a cada aplicação, deve levar em consideração dois requisitos essenciais: a densidade de energia de atuação e a frequência de atuação do material (LAGOUDAS, 2008).

### 3.2 Ligas com Memória de Forma

As Ligas de Memória de Forma (SMA) englobam uma classe de materiais metálicos capazes de memorizar e recuperar-se de uma deformação de até 8%, retornando a sua forma original, a partir de um aquecimento superior a temperatura de transformação de fase. Este efeito é conhecido como Efeito de Memória de Forma (SME – *Shape Memory Effect*). O mesmo efeito pode ocorrer também através da retirada de carga ou pressão sendo conhecido como superelasticidade (DAVIS, 2005).

Em 1932, ao estudar ligas de ouro e cádmio (Au-Cd), Arne Ölander descobriu as SMA's ao verificar o fenômeno da memória de forma e a superelasticidade. Mais tarde, em 1938, Greninger e Mooradian, constataram em ligas de cobre e zinco (Cu-Zn), a formação e o desaparecimento da fase martensítica pela diminuição e aumento da temperatura respectivamente. Já, em 1941, foi utilizado pela primeira vez o termo *Shape Memory*, por Vernos, ao descrever um material dentário polimérico. O fenômeno básico da memória de forma, que consiste na reversibilidade térmica pela transformação martensítica, só foi totalmente contemplado em 1949 por Kurdjumov e Khandros, e em 1951 por Chang e Read (OTSUKA, 1998).

Entretanto, até a década de 1960, a importância desse material não foi reconhecida. Somente em 1962, William Buehler e Frederick Wang, descobriram em uma liga equiatômica de níquel e titânio, o efeito da memória de forma. Esta liga recebeu o nome de Nitinol, em virtude da composição química de níquel e titânio (Ni-Ti) e do local de descoberta *Naval Ordnance Laboratory* (NOL) (KAUFFMAN, 1997).

Desde então, a demanda por SMA's para aplicações técnicas e de engenharia vem aumentando. Sistemas com ligas de cobre e outros elementos como zinco (Cu-Zn), silício (Cu-Zn-Si), alumínio (Cu-Zn-Al), gálio (Cu-Zn-Ga), estanho (Cu-Zn-Sn) e níquel (Cu-Zn-Ni) frequentemente são utilizadas, uma vez que apresentam o efeito da memória de forma. Entretanto, o uso de ligas de Ni-Ti é o mais comum, pela sua

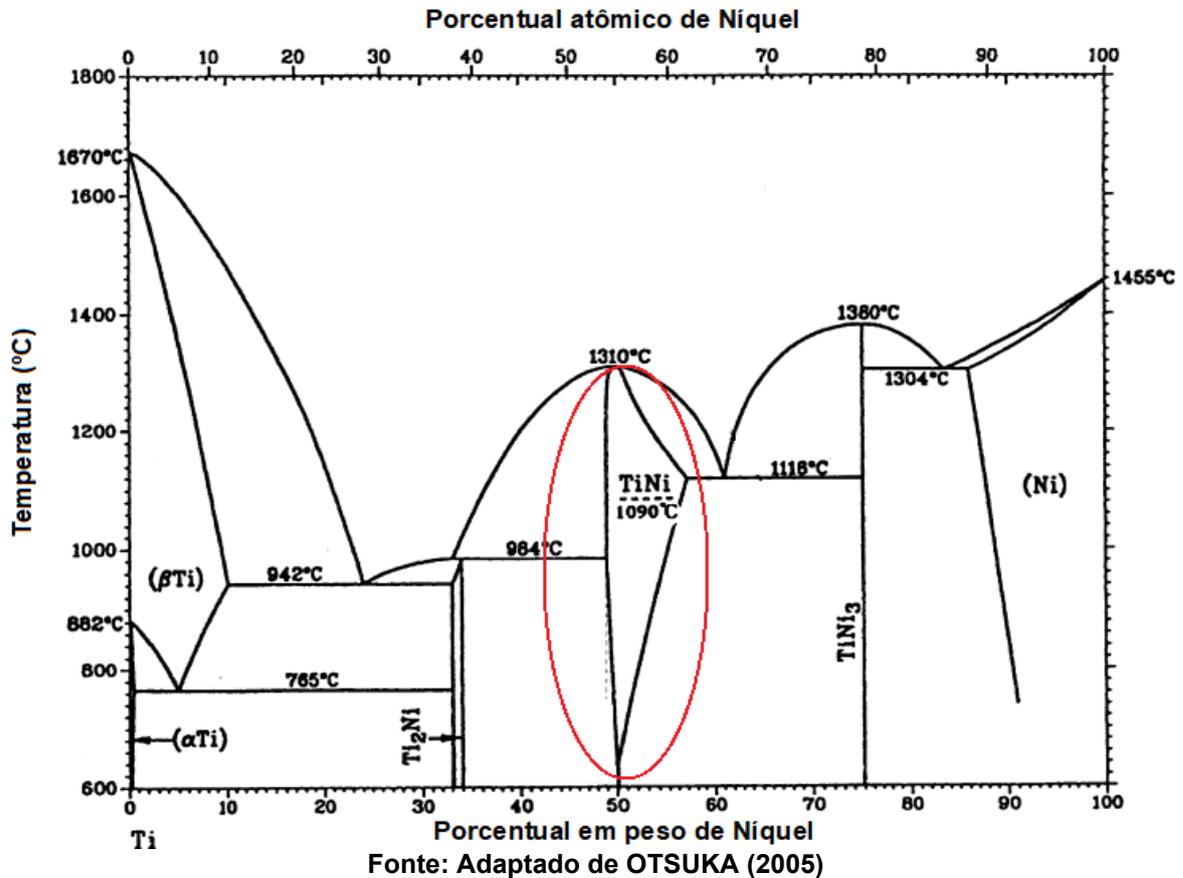
capacidade de recuperar a forma, sua histerese pseudoplástica, sua resistência a corrosão e biocompatibilidade (TURNER, 2000).

### 3.3 Ligas Níquel – Titânio

As ligas metálicas são misturas formadas por dois ou mais elementos, sendo pelo menos um dos componentes, um metal. A liga escolhida para estudo deste trabalho é o Nitinol (Ni-Ti), um composto binário, intermetálico e equiatômico ou quase equiatômico de níquel e titânio (TURNER, 2000).

Para determinar a temperatura na qual o efeito de memória de forma se manifesta é necessário verificar o percentual de Níquel presente na composição da liga. O diagrama de fases da liga de Ni-Ti em percentual atômico é mostrado na Figura 1. Nesse diagrama é possível verificar uma estreita faixa de domínio intermediário monofásico (TiNi) obtido através da condição de equilíbrio da solidificação a 1310°C com a fase líquida, na mesma composição química. Esta é a única região que apresenta o SME. Entretanto, a fase NiTi está localizada entre intermetálicos secundários: NiTi<sub>2</sub> – região rica em Ti e Ni<sub>3</sub>Ti – região rica em Ni (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

Figura 1 - Diagrama de fases do sistema Ni-Ti

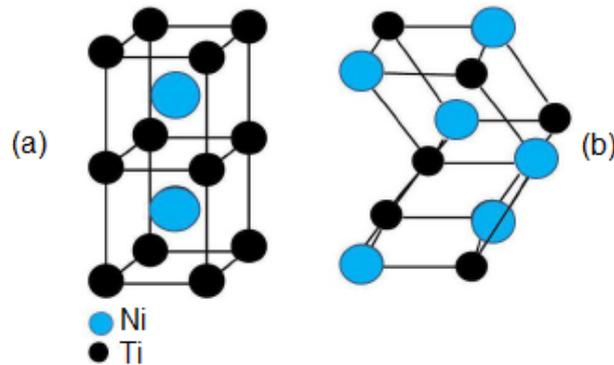


As ligas de NiTi são compostas por duas estruturas cristalinas distintas: a martensítica e a austenítica. A fase martensítica é estável em baixas temperaturas ( $T < 100^\circ\text{C}$ ) e elevados valores de tensões, além disso, caracteriza-se por apresentar estrutura ortorrômbica do tipo B19 ou monoclínica do tipo B19', podendo apresentar outras 24 variações conforme o tipo de transformação que o material vivencia. O empacotamento presente nessas variações pode ser do tipo auto-acomodante, caracterizado por uma martensita maclada, isto é, ocorre a minimização das tensões elásticas entre os grãos, ou do tipo, martensita demaclada, representado por uma variante dominante em relação as outras. Já, a fase austenítica é estável em elevadas temperaturas ( $T > 100^\circ\text{C}$ ), baixos valores de tensões e apresenta uma estrutura cúbica de corpo centrado (CCC) do tipo B2. Pode-se aparecer ainda, uma fase romboédrica intermediária (MIYAZAKI; KIM; HOSODA, 2006).

A austenita, CCC, tipo B2, é reconhecida por conter um átomo de níquel no centro da estrutura cristalográfica e um átomo de titânio em cada um dos oito vértices do cubo. É microestruturalmente simétrica e conhecida como fase de origem. Já, a

fase martensítica, é menos simétrica, do tipo B19' (SAIGAL; FONTE, 2011). Na Figura 2, observa-se as fases austenítica e martensítica em estruturas de Ni-Ti.

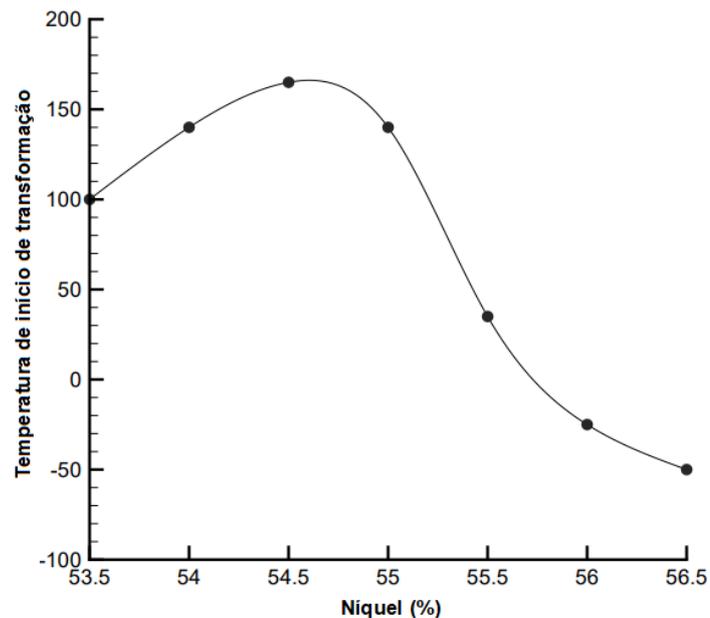
**Figura 2 - Estrutura cristalina do Nitinol nas fases (a) austenita e (b) martensita**



Fonte: Adaptado de OTSUKA (1998)

Entre essas duas fases sólidas, ocorre uma transformação que implica em uma reorganização dos átomos da rede cristalina, sendo a temperatura de transição, sensível a composição química. Na Figura 3, é possível verificar a variação da temperatura em que se inicia a formação da fase austenita, de acordo com a mudança na porcentagem em peso, de níquel (TURNER, 2000).

**Figura 3 – Curva da temperatura inicial de transformação da austenita em função da porcentagem, em peso, de Níquel**



Fonte: Adaptado de BUEHLER (1968)

Comumente, adiciona-se um excesso de níquel com a finalidade de diminuir a temperatura de transformação e aumentar o limite elástico da fase austenita. Ferro (Fe) e cromo (Cr), também são adicionados com frequência, visando diminuir as temperaturas de transformação. Além disso, utiliza-se ainda, cobre (Cu) para reduzir a histerese de transformação e diminuir a tensão de orientação da martensita (SHAW, 1995).

As propriedades mecânicas do Nitinol não podem ser especificadas com precisão, uma vez que estão diretamente relacionadas à temperatura de transformação martensítica (TTM) e ao histórico de processos aos quais a liga foi submetida (encruamento ou recozimento). Na Tabela 1 é possível observar as propriedades mecânicas e físicas de um Nitinol em forma de fio reto sob temperatura ambiente (JANI et al., 2014).

**Tabela 1 - Propriedades fio de Nitinol SE508 da Kellogg's em temperatura ambiente**

Propriedade	Símbolo	Unidade	Valor	
			Martensita	Austenita
Densidade	$\rho_D$	Kg/m <sup>3</sup>	6450 – 6500	-
Resistividade	$\rho_R$	$\mu\Omega \times cm$	76 – 80	82 – 100
Calor específico	$c$	J/kgK	836.8	836.8
Condutividade térmica	$k$	W/mK	8.6 – 10	18
Coeficiente de expansão térmica	$\alpha$	K <sup>-1</sup>	$6.6 \times 10^{-6}$	$11.0 \times 10^{-6}$
Tensão de ruptura	$\sigma_R$	MPa	895 – 1900	895 – 1900
Limite de escoamento	$\sigma_y$	MPa	70 – 140	195 – 690
Módulo de Young	$E$	GPa	28 – 41	75 – 83
Coeficiente de Poisson	$\nu$	-	0.33	0.33
Susceptibilidade magnética	$X$	-	2.5	3.8
Resistência a corrosão	-	-	Similar as ligas de Ti	Similar as ligas de Ti

Fonte: Adaptado de JANI et al. (2014)

Algumas propriedades variam de acordo com a fase em que a liga se encontra. Na fase austenita, a liga possui módulo de Young mais elevado e é mais dura, enquanto que na fase martensita o material é mais maleável e macio. É válido destacar ainda que a ativação da memória de forma ocorre após o aquecimento acima da sua temperatura de transição específica. Já, a memorização e fixação da forma

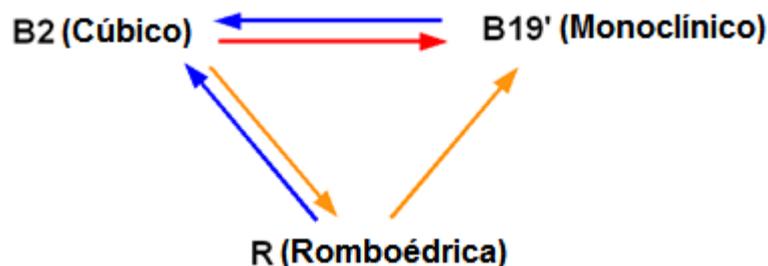
desejada, acontece através de um tratamento térmico em temperaturas acima de 100°C.

### 3.3.1 Transformação Termoelástica Martensítica

A TTM é a transição de fase da austenita para martensita responsável por determinar as características inteligente do Nitinol. Ela ocorre de modo direto (austenita→martensita) ou de modo reverso (martensita→austenita) em virtude da diferença de energia presente entre as estruturas, responsável por reorganizar as ligações químicas garantindo que a estrutura cristalina atinja um estado mínimo de energia, em uma dada temperatura (STRANDBERG, 2006).

A TTM e a TTM reversa ocorrem de forma adifusional por meio de tensões cisalhantes de nucleação e crescimento da martensita a partir da austenita tanto através de uma redução de temperatura (Martensita Termicamente Induzida, MTI) quanto por tensão mecânica (Martensita Induzida por Tensão, MIT). Em condições específicas como trabalho a frio, tratamento térmico, ciclo térmico ou composição química, uma fase intermediária denominada romboédrica (fase R), pode surgir e ser responsável por uma transformação em dois estágios, conforme exemplificado na Figura 4 (ZHENG et al., 2006).

**Figura 4 – Vias para transformações na liga de Nitinol: Primeiro estágio (B2 → B19'), segundo estágio (B2 → R) e terceiro estágio (B19' → B2 e R → B2)**

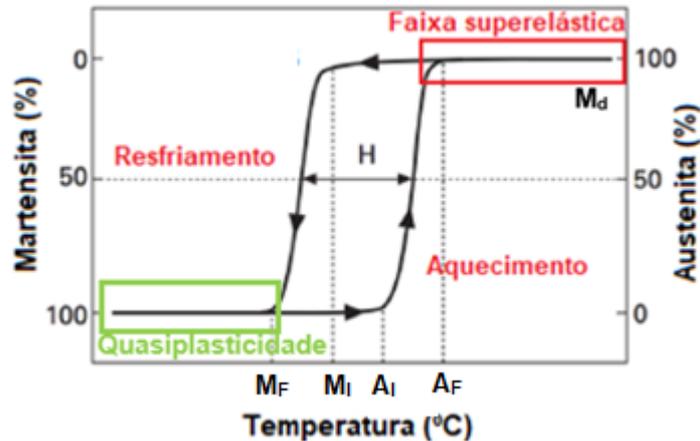


Fonte: Adaptado de ZHENG et al. (2006)

A transformação de fase é ativada quando a austenita é resfriada e inicia a transformação para martensita, a temperatura de início de formação recebe o nome de martensita inicial ( $M_I$ ), à medida que a temperatura final de transformação é denominada martensita final ( $M_F$ ). Já, quando a martensita é aquecida, a temperatura de início de conversão para austenita é a austenita inicial ( $A_I$ ), enquanto que a temperatura final do fenômeno é a austenita final ( $A_F$ ). Existe ainda a temperatura

máxima que a martensita é formada por tensão, denominada martensita superelástica ( $M_d$ ). Esse comportamento é esquematizado na curva de histerese do Nitinol apresentado na Figura 5 (DUERING et al., 1990).

**Figura 5 – Histerese térmica do Nitinol – temperaturas de transformação de fase**

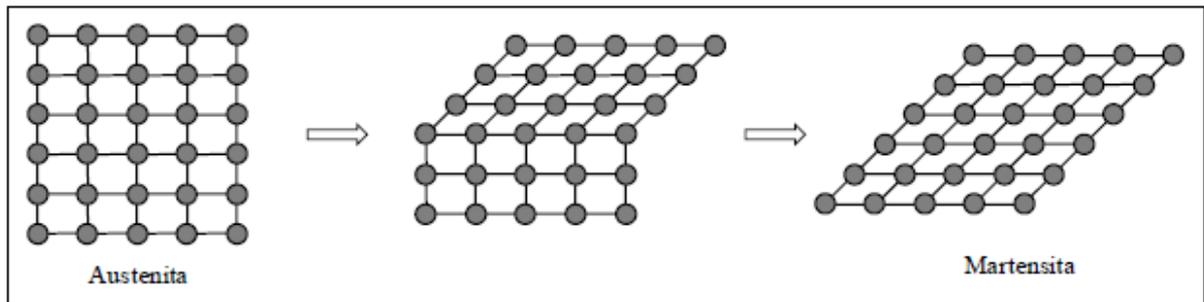


Fonte: Adaptado de PAINE e ROGERS (1994)

As temperaturas de transição são específicas de cada SMA e variam conforme modificações na composição química e tratamentos termomecânicos. Na Figura 5, é possível observar ainda a histerese térmica do Nitinol, representado por “H”. Ela é definida a partir da variação nas temperaturas quando o material está com 50% austenita (após aquecimento) e 50% martensita (após resfriamento). É uma propriedade importante pois está diretamente relacionada a seleção da SMA e a faixa operacional para determinadas aplicações. Para aplicações de atuação rápida, como na robótica, é necessária uma pequena histerese, diferente da histerese maior, desejada para preservar a forma dentro de uma dada temperatura, requisito necessário para a junção de tubos (ZHENG et al., 2006).

A tensão também é de fundamental importância na TTM. Quando resfriada abaixo de  $M_I$  e sem aplicação de tensão, a martensita formada a partir da austenita, se organiza de forma autossuficiente, em um total de 24 planos cristalográficos equivalentes de modo que não ocorra mudança de forma macroscópica. Inicialmente acontece uma deformação na rede, onde a linha de interface entre duas fases progride em uma linha de átomos onde cada um se movimenta em um reduzindo comprimento, gerando uma martensita com volume diferente da fase austenita, conforme esquematizado na Figura 6 (STRANDBERG, 2006).

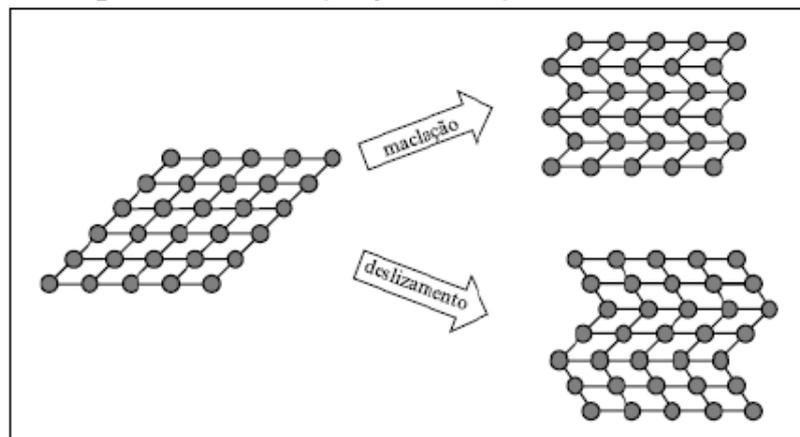
**Figura 6 - Deformação da rede da fase Austenítica**



Fonte: STRANDBERG (2006)

Em seguida, ocorre uma acomodação para organizar a mudança de forma. Durante a acomodação, as células da rede conservam sua forma de paralelogramo, enquanto isso, o material volta a sua forma macroscópica inicial. Esta acomodação é induzida por um mecanismo de deslizamento (*slip*) ou de maclação (*twining*), conforme representado na Figura 7 (CERÓN, 2010).

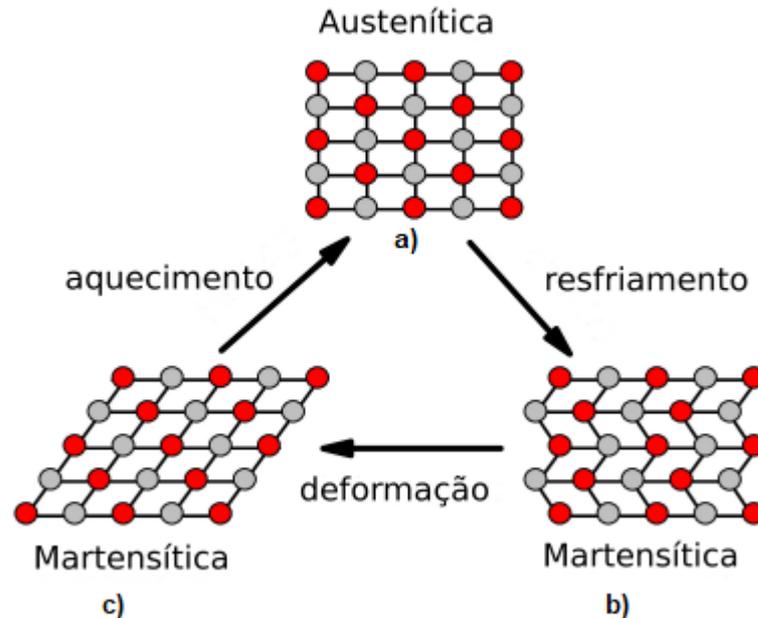
**Figura 7 - Acomodação por Maclação e Deslizamento**



Fonte: STRANDBERG (2006)

Para que haja a memória de forma, é necessário que essa acomodação seja por maclação de modo a permitir uma transformação termoelástica reversível, uma vez que a deformação por deslizamento é permanente. Com o emprego de tensões nos contornos de maclas, estes irão se mover e durante a deformação, produzirão uma forma para acondicionar estas tensões. Esta reorientação é conhecida como demaclação. Maclação e demaclação são processos tipicamente usados em SMA para explicar as propriedades macroscópicas das SMA e são representadas na Figura 8 (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

**Figura 8 - Representação esquemática da mudança de fase durante o efeito de memória de forma: a) austenita, b) martensita maclada e c) martensita demaclada**



Fonte: Adaptado de (DELAEY; KRISHNAN; TAS, 1974)

É possível verificar na figura a austenita simétrica que apresenta uma distribuição bem definida para os átomos e a martensita pode apresentar duas configurações diferentes de acordo com o nível de tensão.

Em temperaturas abaixo de  $M_F$  é observado a quasiplasticidade e em temperaturas superiores a  $A_F$  superelasticidade. Esses são os dois principais fenômenos das SMA, além da memória de forma, verificado com a variação de temperatura (PAINE e ROGERS, 1994).

O efeito da superelasticidade é considerado um efeito de memória de forma caracterizado por apresentar uma recuperação de deformação após a retirada da carga em temperaturas acima de  $A_f$ . Na superelasticidade a deformação ocorre de forma não linear e é reversível, podendo obter deformações na ordem de 10%, sendo os valores típicos das ligas de Nitinol, 8%. Já, a quasiplasticidade é a recuperação do SME quando aquecido. É caracterizado por apresentar elevada tensão residual proveniente da reorientação da martensita induzida por tensão (OTSUKA, 1998).

### 3.3.2 Efeito da Memória de Forma

O efeito da memória de forma é a capacidade que o material possui de memorizar uma forma pré-determinada, mesmo após sofrer diversas deformações. A

mudança com a memória de forma ocorre com a variação da temperatura durante a transformação martensítica (PATOOR et al., 2006).

É possível utilizar a memória de forma com efeito unidirecional (*one-way shape memory effect* – OWSME), de modo que ao ser deformada mecanicamente, a SMA retorne a sua forma inicial ou pré-programada sob aquecimento e não se modifique durante o resfriamento. Nesse caso, há a necessidade de aplicação de outra força que promova a deformação e ative o efeito (PATOOR et al., 2006).

Ou, com efeito de memória de forma bidirecional (*two-way shape memory effect* – TWSME), onde somente a fase austenita é memorizada, podendo a fase martensita ser obtida sob condições particulares com tensão e carga variando as temperaturas  $A_F$  e  $M_F$ . No TWSME ocorre uma mudança de forma de maneira espontânea da SMA quando ela é aquecida e resfriada de forma alternada, na ausência de carregamento mecânico (PATOOR et al., 2006).

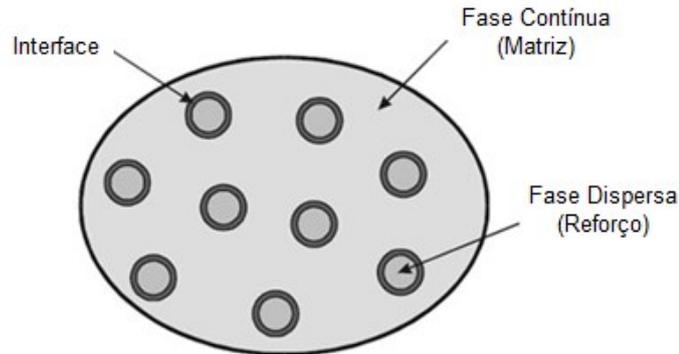
### **3.4 Materiais Compósitos**

Segundo Gibson (2016), materiais compósitos são materiais multifásicos formados por dois ou mais materiais distintos combinados em uma unidade estrutural macroscópica produzida artificialmente, obtidos de combinações entre ligas metálicas, cerâmicas e/ou poliméricas, visando obter um conjunto de propriedades que nenhum dos materiais convencionais individualmente apresenta, tais como baixa condutividade elétrica, módulo de elasticidade alto, baixa densidade, que pode ser fabricado em diversas cores e tamanhos.

Os materiais compósitos são formados por uma matriz e por um reforço e as propriedades destes materiais dependem das características de ambos.

#### **3.4.1 Interface Reforço/Matriz**

A interface reforço/matriz é definida como uma superfície limite entre os componentes por meio do qual ocorre uma descontinuidade em determinado parâmetro. Esta se manifesta de forma aguda ou gradual em toda a superfície dos materiais constituintes, de acordo com o apresentado na Figura 9. Em um compósito sempre existirá uma interface entre as fases constituintes (CHAWLA, 2006).

**Figura 9 - Fases do material compósito**

Fonte: Adaptado CHAWLA (2006)

Para que o material compósito apresente eficiência, é necessário que exista uma área de contato entre as fases. Em determinados casos, ocorre uma adesão direta entre a fase contínua e a fase dispersa. Entretanto, é necessário que exista uma afinidade química entre essas fases para que se sustente a coesão e a distribuição das cargas entre elas. Aspectos como rugosidade da superfície, molhabilidade da matriz, tensões residuais e reação química, são essenciais para determinar um desempenho elevado do compósito e estão diretamente relacionadas a qualidade da interface (DANIEL e ISHAI, 2006).

### 3.4.2 Matriz

A matriz corresponde a fase contínua do material compósito e é de fundamental importância na constituição do mesmo, uma vez que é responsável por desempenhar diversas funções, sendo a principal manter a integridade estrutural do compósito através de ligações simultâneas com material de reforço devido aos seus aspectos coesivos e adesivos (MENDONÇA, 2019). Além disso, ela é responsável por transferir as cargas para o reforço de forma eficaz e proteger a fase dispersa em relação aos danos superficiais ocasionados por reações químicas ou abrasão mecânica com o meio externo (NETO; PARDINI, 2016)

A fase matriz não necessariamente corresponde a fase presente em maior quantidade no compósito. Entretanto, ela invariavelmente preenche todos os espaços vazios presentes entre os materiais de reforços, fazendo com que os mesmos permaneçam em determinadas posições durante o processo de fabricação do material (NETO; PARDINI, 2016).

Essa fase é responsável por determinar a temperatura operacional de serviço, bem como parâmetros de processamento e fabricação dos compósitos. Ademais, para

sua escolha, deve ser levado em consideração a sua dependência em relação a interface com o reforço de modo a garantir a qualidade da interação. Assim fatores como viscosidade, custo, processamento, interação reforço/matriz, propriedades mecânicas, resistência a corrosão/flambagem são cruciais para o sucesso do projeto (TOMAR, 2018).

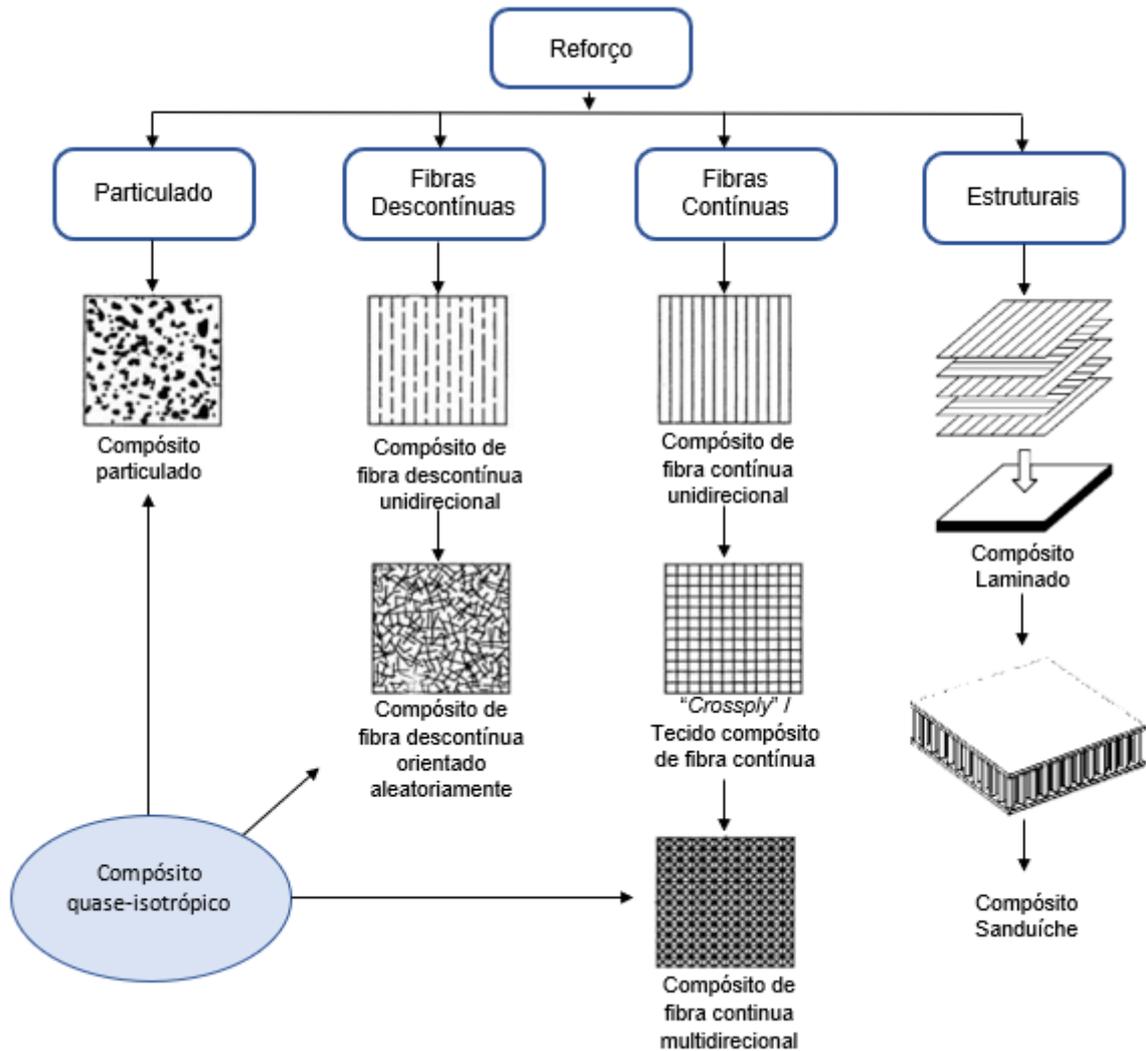
Elas podem ser classificadas como poliméricas, cerâmicas ou metálicas. Os compósitos mais utilizados na atualidade possuem matriz polimérica, em virtude do baixo custo para produção e a utilização de baixas temperaturas e pressões evitando a degradação do material de reforço durante o processo de fabricação. Entretanto, possuem dureza e resistência inferiores quando comparadas com as matrizes cerâmicas e metálicas (NETO; PARDINI, 2016). As matrizes poliméricas podem ser subdivididas ainda em resinas termoplásticas, como por exemplo o Polietileno, o Vinil e o Acrílico e termorrígidas como o Epóxi, o Poliéster e o Fenol-Formaldeído, sendo a principal diferença é que as termorrígidas após o processo de cura não podem ser refundidas, enquanto que as termoplásticas podem. As termorrígidas são mais utilizadas em compósitos estruturais devido as suas propriedades mecânicas (BRITO, 2007).

Já os compósitos com matrizes cerâmicas possuem elevada resistência mecânica, a oxidação e baixa densidade. Contudo, a dificuldade de produção, necessitando de elevadas temperaturas e a fratura frágil, limitam sua utilização. Grafite, alumina e nitreto de silício são os materiais mais utilizados nessa classe. Por fim, os compósitos com matrizes metálicas são fabricados sobretudo a partir de processos de sinterização, elevando o custo de fabricação e dificultando o processamento. Materiais como alumínio, magnésio e titânio são frequentemente utilizados em aplicações nos setores aeroespaciais e militares (CHAWLA, 2006).

### 3.4.3 Reforço

O reforço corresponde a fase dispersa do material compósito e podem apresentar a forma de fibras contínuas, picadas ou em partículas, de acordo com o exposto na Figura 10.

Figura 10 - Classificação dos materiais compósitos de acordo com o reforço



Fonte: Adaptado DANIEL e ISHAI (2006)

Os compósitos particulados englobam várias partículas de tamanhos e formas diversas que ficam dispersas dentro da matriz. Já, os que possuem fibras descontínuas são formados por fibras pequenas (fibras picadas), enquanto que os de fibras contínuas apresentam longas e contínuas podendo ser orientadas paralelamente (unidirecional) com ângulos entre si (*crossply*) ou distribuídas em várias direções (multidirecional). Por fim, os estruturais, que se subdividem em laminados constituídos pelo empilhamento de várias camadas e o sanduíche, formados por duas faces externas (geralmente feitas com resina e fibras sintéticas) e com um núcleo central (DANIEL; ISHAI, 2006).

As fibras são classificadas como unidirecionais quando estão orientadas em uma única direção; bidimensionais quando direcionadas na forma de tecido em duas direções ortogonais ou orientadas aleatoriamente e tridimensionais como no caso dos

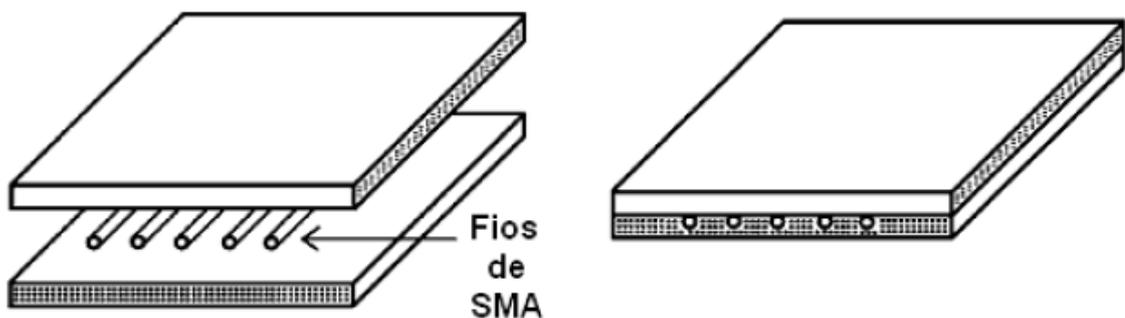
tecidos multidimensionais. Podem também se agruparem de acordo com a origem em naturais, retiradas da natureza ou sintéticas, fabricadas pelo homem (DANIEL; ISHAI, 2006).

### 3.5 Compósitos Híbridos com Memória de Forma

Inicialmente o estudo de SMA's em conjunto com outros materiais estava diretamente relacionado a aplicações que envolviam o controle ativo, passivo e adaptativo de vibrações em estruturas e máquinas (WILLIAMS, CHIU; BERNHARD, 2002). Entretanto, a partir da década de 80, Rogers e Robertshaw (1988) inovaram ao utilizar SMA embebidas em materiais compósitos como atuadores, originando o termo SMAHC (*Shape Memory Alloys Hybrid Composite*). Nos anos seguintes, Paine e Rogers (1994) divulgaram os primeiros estudos relacionados a atuadores e elementos com memória de forma distribuídos longitudinalmente ao longo do eixo neutro das estruturas. Já, nos anos 2000, Turner (2020), publicou a respeito da confecção e caracterização de materiais de SMAHC.

Os materiais conhecidos como SMAHC são confeccionados a partir da união de uma SMA e materiais compósitos, conforme apresentado na Figura 11.

Figura 11 - Representação SMAHC



Fonte: CASTILHO (2008)

O incremento dos fios de SMA nos materiais compósitos é utilizado basicamente de duas formas distintas: para controle de forma e controle de vibração. No primeiro caso, os elementos de memória de forma são deformados e posicionados fora do eixo neutro da estrutura, assim, quando ativada a SMA tende a recuperar a forma e deformar a estrutura. Já, no segundo caso, os fios utilizados não são pré

deformados e possibilitam o controle de rigidez da estrutura (OTSUKA; WAYMAN, 1998).

É válido destacar que os SMAHC são uma classe distinta dos compósitos estruturais, uma vez que a aplicação primária não é estrutural (ganhos em leveza, rigidez e flexibilidade), e sim, dispositivos capazes de se adaptarem a variação de temperatura e apresentarem determinada flexibilidade (NASCIMENTO, 2009).

Não existe muitos relatos na literatura a respeito dos SMAHC, no entanto, há uma quantidade significativa de pesquisas em fases de protótipos. Sabe-se que a restrição sobre estes materiais está relacionada ao comportamento do ciclo térmico não ser totalmente conhecido. Porém, o potencial de aplicação desses materiais tem aumentado estimulando interesses na área.

### **3.6 Metodologia**

Neste trabalho, a estratégia utilizada foi a de pesquisa bibliográfica, onde buscou-se apresentar os aspectos fundamentais dos compósitos híbridos com memória de forma como: as principais ligas utilizadas, as características e propriedades associadas ao fenômeno de transformação da martensita em ligas de níquel-titânio, algumas formas de integração e processamento para o desenvolvimento desses materiais, os principais estudos, oportunidades tecnológicas e as aplicações à cerca do tema.

Esta revisão foi realizada com base em levantamento de dados, principalmente de livros e artigos científicos disponíveis em bases de dados como Scielo, *Science Direct* e *Web of Science*. Pesquisas em sites na *internet* e fabricantes também foram utilizadas.

Ressalta-se que o objetivo deste trabalho é o estudo teórico de materiais compósitos com a liga Ni-Ti. O motivo da escolha dessa liga é a sua facilidade de acesso quando comparada as demais que apresentam o efeito de memória de forma, bem como a quantidade de dados presentes na literatura.

### **3.7 Resultados e Discussão**

#### **3.7.1 Estudos**

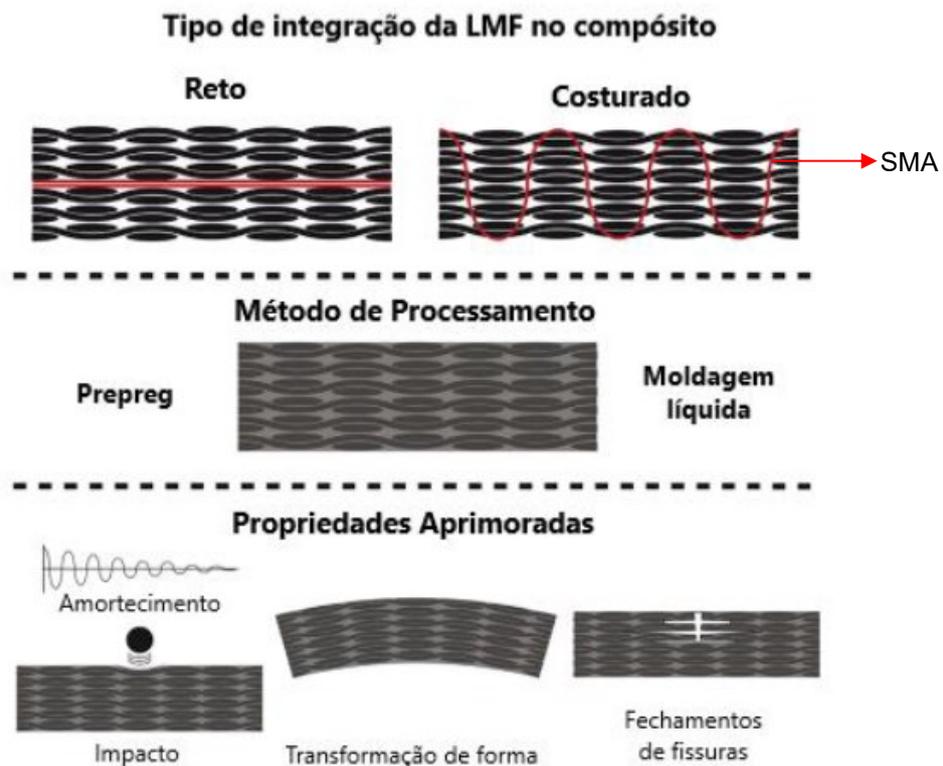
Segundo Cohades e Michaud (2018), o desenvolvimento de compósitos híbridos reforçados com Nitinol vem crescendo muito nos últimos anos e tem se

mostrado promissor conforme os materiais inteligentes progredem em aplicações estruturais de elevado desempenho. A adição das SMA's nos compósitos contribui sobretudo adicionando funcionalidades ao material como mudança de forma da estrutura, alteração da frequência de vibração natural após ativação e desenvolvimento de uma expansão térmica controlada. Entretanto, limitações relacionadas a transformação de fase que ocorre exclusivamente pela introdução de carga ou variação de temperatura e a compatibilidade entre os fios de Nitinol e o compósito exigem adaptações no processamento para garantir as propriedades desejadas (COHADES, MICHAUD, 2018).

Os trabalhos que incorporam as ligas de memória de forma em compósitos híbridos estão direcionados para ganhos de propriedades em amortecimento e vibrações, impactos, fechamento de fissuras e mudanças de forma (COHADES, MICHAUD, 2018).

Na Figura 12, é possível observar como as SMA's podem ser inseridas nos compósitos, os métodos de processamento mais utilizados e as principais propriedades modificadas.

**Figura 12 - Tipos de integração, métodos de processamento e propriedades aprimoradas em SMAHC**



Fonte: COHADES e MICHAUD (2018)

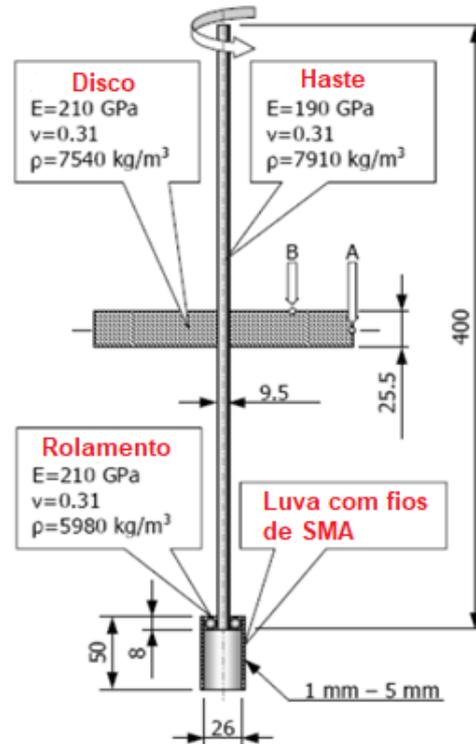
A fase martensítica nas SMA possuem uma elevada capacidade de amortecimento, assim, frequentemente o Nitinol é adicionado como um segundo reforço no compósito com a finalidade de acrescentar um amortecimento passivo sem a necessidade de um pré tensionamento nos fios (COHADES, MICHAUD, 2018).

Neste cenário, Rogers e Paine (1994), foram pioneiros em utilizar os fios de SMA's na década de 90 ao operar frações volumétricas de 5%, 10% e 15% de Nitinol em paralelo as camadas de reforço de um pré-impregnado de carbono-epóxi. Eles demonstraram, que após aquecimento, o limite de escoamento aumentou na ordem de 10x, enquanto que o módulo de Young, 4x. Além disso, eles conseguiram ajustar as propriedades vibracionais dos compósitos por meio controle do aquecimento dos fios.

Willians, Chiu e Bernhard (2002) elaboraram um dispositivo adaptativo capaz de modificar a sua rigidez conforme a temperatura de transformação dos fios presentes na matriz do compósito. Essa singularidade torna o dispositivo capaz de atenuar vibrações em uma faixa de frequência apenas modificando a temperatura do Nitinol.

Zak, Cartmell e Ostachowicz (2003) realizaram um estudo de forma numérica a respeito da dinâmica e controle de rotores por meio de um mancal ativo explorando os SMAHC. O compósito apresentava 3 combinações distintas de matriz/reforço, com matriz polimérica de resina epóxi e reforço com fibras de vidro e grafite, além dos fios de Nitinol. O trabalho investigou a amplitude de vibração em função da frequência de excitação do sistema com nitinol acima de  $A_F$  e abaixo de  $M_F$ . Constatou-se que o desempenho do motor melhorou com a utilização do compósito híbrido com memória de forma. O rotor e o mancal desenvolvido pelos autores estão ilustrados na Figura 13.

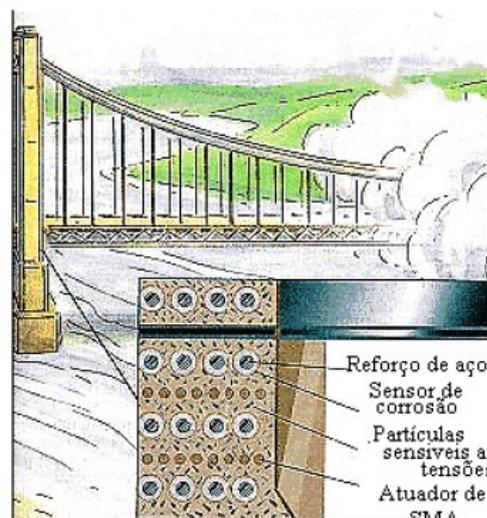
Figura 13 - Esquema representativo rotor/mancal



Fonte: Adaptado de (ZAK; CARTMELL; OSTACHOWICZ, 2003)

Com a finalidade de garantir um ganho em amortecimento, SMAHC com Nitinol são utilizados em base de sustentação de pontes em virtude da capacidade de modificar sua rigidez através de variações de temperatura, de acordo com o ilustrado na Figura 14 (FERNANDES, 2006).

Figura 14 - Ponte com atuadores de SMA



Fonte: FERNANDES (2006)

Em 2017, Junior, Donadon e Castro (2017) desenvolveram um modelo semianalítico capaz de prever a vibração de um compósito de carbono/epóxi com incremento de fios de SMA, validando assim uma ferramenta capaz de avaliar as propriedades de memória de forma com relação a variação de temperatura e verificar a redução da vibração em função dos aspectos geométricos.

Além das propriedades relacionadas a vibrações e amortecimento, os SMAHC estão relacionados a suprir ou diminuir danos subsequentes de impactos. Por exemplo, Paine e Rogers (1994) utilizou fios de Nitinol de 0,4 mm de diâmetro em um compósito reforçado de fibra de carbono para melhorar a resposta de danos ocasionados por impactos a baixa velocidade. Com uma fração em volume de 2,8% de Nitinol, ele garantiu um aumento de 25% na resistência ao impacto comparado ao mesmo compósito sem o incremento dos fios SMA.

Moet et al. (2004), comprovou a existência de concretos capazes de suportar desastres naturais e ataques terroristas, através da interação do Nitinol com o concreto. A técnica visa evitar a transmissão de energia dissipada por meio da utilização de elementos enrijecidos. Anteriormente, em 1996 e 1997 foram utilizados fios de Nitinol durante a restauração da Basílica de São Francisco de Assis e da torre da Igreja de São Giorgio, na Itália, com a finalidade de realizar o controle de deslocamento e limitar as forças e acelerações que essas estruturas estão sujeitadas durante terremotos (BONCI et al., 2001).

Mais recentemente, os artigos que foram publicados e merecem destaque, foram listados, de forma resumida, na Tabela 2.

Tabela 2 - Áreas de pesquisa SMAHC

Área de Pesquisa	Descrição	Autores
Laminados compósitos biestáveis	Estuda o Morphing em estruturas aeroespaciais, turbinas eólicas, automóveis.	Pirondi, 2019.
Dispositivos eletrocromicos	Investiga o desenvolvimento de dispositivos utilizados em camuflagem dinâmica.	Zhao, 2019.
Filmes finos	Analisa a influência no comportamento de deformação das SMA's dentro dos compósitos.	Quade, 2019.
Hélices marinhas	Melhoria na eficiência hidromecânica por meio do controle de torção da lâmina.	Kapuria, 2018.
Melhoria de propriedades mecânicas	Melhoria de resposta ao impacto, morphing de forma e fechamento de rachaduras.	Katsiropoulos, 2020 Dahnke, 2019.
Melhoria de propriedades em atuadores	Estimativa do curso de atuação e resposta do atuador composto de SMA.	Mizzi, 2019.
Cascas compostas	Verifica a quantidade de pré-deformação e a fração volumétrica de SMA embutidas para evitar a flambagem de cascas de parede fina.	Akbari, 2019.
Comportamento a fadiga	Verifica o modo falha por fadiga e os mecanismos de resposta de danos.	Wang, 2017.
Características de autocura	Estuda a cicatrização de fissuras sem a necessidade de adição de forças externas.	Srivastava, 2019.

Fonte: Autoria Própria (2022)

Conforme apresentado na Tabela 2, existem diversas aplicações para os SMAHC em virtude da grande quantidade de materiais disponíveis para combinações durante o processo de desenvolvimento do compósito. Contudo, é possível afirmar que as propriedades mecânicas dessas estruturas estão diretamente relacionadas a adição ou ausência de uma pré-tensão na SMA, de um pré tratamento nos fios de SMA, da fração de volumétrica empregada de SMA, da localização da SMA em relação ao plano neutro, do material utilizado na matriz, das condições restritivas da matriz e da utilização e tipo de reforço. Assim, o domínio do processo de fabricação desses compósitos, é de fundamental importância para o sucesso de suas aplicações.

### 3.7.2 Fabricação

A fabricação de SMAHC ainda é um desafio, pois até o momento, não existe um processo padrão que apresente os melhores resultados. Os principais desafios estão: (i) adesão superficial entre a SMA e o compósito – seleção dos fios reforço e matriz; (ii) reprodutibilidade – compósitos fabricados manualmente; (iii) definição de metodologia adequada para tratamentos das SMA's; (iv) posicionamento das SMA's nos compósitos – dependendo diretamente da aplicação; (v) pré-tensionamento e (vii) tipo de ativação (LEITE et al., 2010).

Leite et al. (2010), utilizou uma prensa a quente com adaptações em sua coluna para fabricar estruturas de CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymers*) com fios de Nitinol. O autor aproveitou anilhas planas de metal, madeira e afinadores de guitarra para realizar as adaptações que garantiram o alinhamento e fixação dos fios durante o processo. Na Figura 15 é possível observar a fabricação de um SMAHC por meio da prensagem uniaxial a quente.

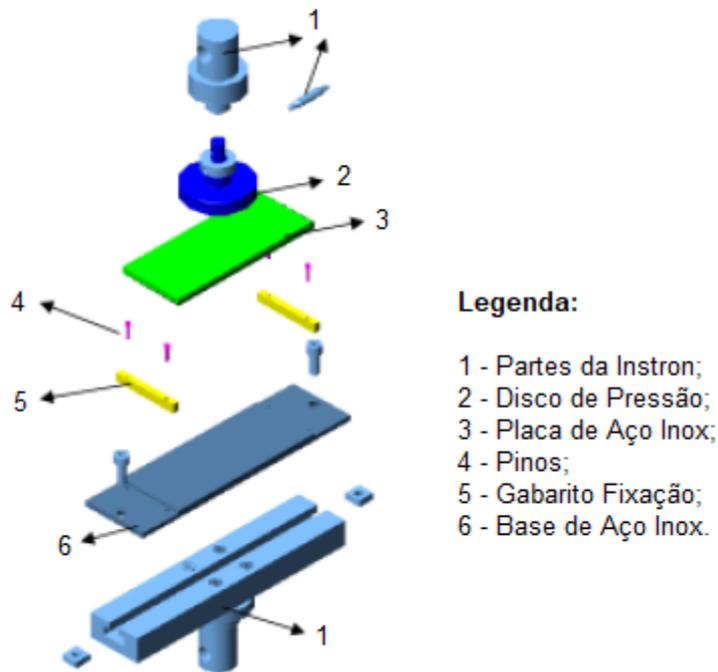
**Figura 15 - Alinhamento e método de fabricação**



**Fonte: Adaptado de LEITE et al. (2010)**

Araújo et al. (2008), empregou outro método de fabricação para a mesma estrutura de CFRP-NiTi. Os autores adaptaram mecanicamente a câmara térmica presente em uma máquina universal (Instron Model 5582). Para isso, um molde foi projetado, Figura 16, e instalado na mesma.

**Figura 16 - Sistema de moldagem**



**Fonte: Adaptado de ARAÚJO et al. (2008)**

Nesse projeto, os fios de Nitinol foram homogeneamente distribuídos e orientados em dois gabaritos de fixação (5) que foram instalados entre a placa de aço inox (3) e a base de aço inox (6). A força produzida pela máquina nas peças (1) foi conduzida por um disco de pressão (2) a placa (3) e a base (6). Realizou-se uma moldagem por pressão a quente.

Assim, para um mesmo SMAHC, dois métodos distintos de fabricação foram utilizados. De forma geral, pode-se concluir que grande parte desses compósitos operam com matrizes termofixas e fibras pré-impregnadas.

### 3.7.3 Aplicações

Como apresentado, as propriedades das ligas de memória de forma, em específico a de Nitinol, exibem grandes oportunidades de aplicações e inovações.

Materiais compósitos com incrementos dessa liga subdividem-se em quatro categorias de aplicações: recuperação livre (*recovery free*), recuperação restringida (*constrained recovery*), atuador e superelasticidade, que não está relacionada ao efeito da memória de forma (LAGOUDAS, 2008).

- Recuperação livre: Durante o aquecimento, a liga com memória de forma possui a capacidade de retornar a sua condição inicial livremente;
- Recuperação restringida: A recuperação da liga de memória de forma é impossibilitada em virtude da presença de um elemento secundário capaz de gerar tensões no elemento, que evitam o movimento de recuperação presente na fase de martensita;
- Atuadores: Associado ao movimento (deslocamento) e força durante a recuperação de tensão e deformação em resposta a mudança de temperatura;
- Superelasticidade: relacionado a recuperação de deformações elásticas amplas por toda a extensão do material (DUERING et al., 1990).

Por exibirem inúmeros benefícios, materiais com Nitinol são empregados em diversos segmentos da indústria metalúrgica, passando pelos setores aeroespacial, eletrônico, de construção, robótico e sobretudo, relacionados a bioengenharia. Além disso, são utilizados das mais variadas formas, como sensores, dispositivos de segurança, conectores, antenas etc.

#### 3.7.3.1 Medicina

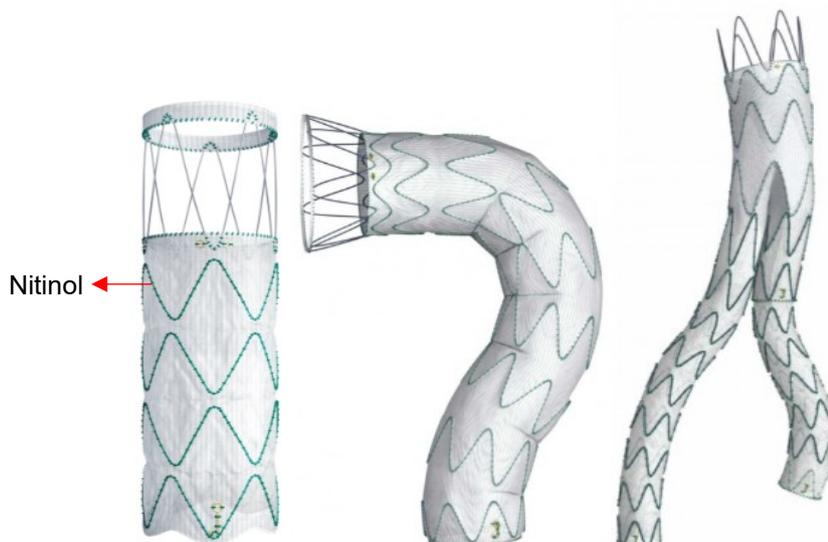
As aplicações dos compósitos na área médica estão diretamente relacionadas a excelente biocompatibilidade do Nitinol e as suas características de memória de forma e superelasticidade. Em virtude das diversas combinações de materiais, uma vasta quantidade de características pode ser desenvolvida e por consequência a área de aplicação torna-se ampla. Podem-se ressaltar, *brackets* ortodônticos, *stents* endovasculares, dispositivos de fixação óssea, filtros cirúrgicos para prevenção de embolias pulmonares, diafragmas artificiais, válvulas para coração, cateteres, dentre outros (CAMPISTA, 2005).

Os *stents* compõem uma das aplicações mais recorrentes para esses materiais. Trata-se de um pequeno e expansível tubo, que é inserido dentro de uma artéria com o objetivo de mantê-la aberta, restaurando ou evitando a redução do fluxo sanguíneo por entupimento. Eles possuem uma forma pré-definida e são comprimidos dentro de um cateter onde permanecem até serem liberados no momento da cirurgia. A propriedade autoexpansível é “acionada” quando em contato com a temperatura do sangue (DUERIG; PELTON; STOECKER, 1999).

Os primeiros *stents* foram fabricados em cerâmicas, polímeros e materiais metálicos. A utilização de aço inox foi o primeiro grande avanço na sua fabricação. Mais recentemente, a partir do final da década de 90, modelos com metais de ligas de memória de forma começaram a surgir no mercado, aumentando as possibilidades de aplicações e permitindo modelos mais precisos e com maior biocompatibilidade. Atualmente, ligas de Nitinol recobertas por tecidos especiais de poliéster de baixa porosidade ou Teflon são frequentemente utilizadas. Esses tecidos foram acrescentados para diminuir o fenômeno de restenose, que é um crescimento de células através do *stent*, causando um bloqueio da corrente sanguínea. Além disso, com o auxílio de *softwares* e reconstruções tridimensionais, geometrias cada vez mais específicas vem sendo fabricadas, incluindo o surgimento de modelos ramificados e fenestrados, que respeitam as ramificações arteriais vitais (MORGAN, 2004).

Na Figura 17 é possível observar alguns exemplos de *stents*.

**Figura 17 - Modelos de Stents: a) Dominus® com indicação para coarctação de aorta; b) Dominus® Stent-Graft; c) Linus ® Stent-Graft**



**Fonte: BRAILE (2022)**

Esses dispositivos vêm substituindo as tradicionais cirurgias de peito aberto em tratamentos relacionados a aneurismas, dissecções arteriais, hemorragias, trombozes, embolias, estenoses, fístulas, malformações arteriovenosas, etc.

### 3.7.3.2 Energias Alternativas

Fontes alternativas de energia são opções energéticas que geram menos impactos negativos ao meio ambiente, uma vez que utilizam como energia o sol (solar), os ventos (eólica), os mares (maremotriz), a água (forças das águas – hídrica) e o calor interno da terra (geotérmica). Neste contexto, em 1970, o engenheiro Ridgway Banks, desenvolveu um motor térmico com o incremento de fios de Nitinol para fabricar energia mecânica a partir de fontes frias e quentes. Como vantagens dessa fonte de energia pode-se citar:

- Elevada resistência à corrosão;
- Baixa taxa de manutenção;
- Facilidade de produção de energia em grande escala (Kilowatts e Megawatts);
- Elevada vida útil;
- Baixo coeficiente de atrito.

Entretanto, a principal desvantagem de produção desse tipo de energia, está relacionada a composições de determinadas ligas apresentarem fadiga precocemente.

Um gerador com incrementos de fio de Nitinol é uma fonte verdadeiramente ecológica, pois não gera uma produção mínima de subprodutos tóxicos durante a sua fabricação e função de converter energia térmica em energia elétrica por meio do aquecimento do fio com água quente ou com energia solar utilizando uma lente Fresnel (CAMPISTA, 2005).

#### 3.7.3.2.1 *Exergy*®

A *Exergyn* é uma empresa irlandesa sediada em Dublin que apresentou uma solução inovadora, simples e de baixo custo relacionada a energias limpas. Recentemente a empresa estimou que o calor perdido a partir dos resíduos de águas quentes de processos industriais era equivalente a aproximadamente o dobro de energia produzida anualmente do petróleo e gás na Arábia Saudita. Assim, eles desenvolveram a *Exergyn Drive*, que consiste em uma forma de converter a energia de água quente que até o momento era desperdiçada pelo calor residual de baixa qualidade (*Low-Grade Waste Heat* – LGWH) em eletricidade (EXERGYN, 2022).

Para isso, a *Exergyn* desenvolveu um dispositivo com fios de Nitinol ligados a um pistão, onde a água quente e fria é alternada ativando a memória de forma e por consequência movimentando o pistão para cima e para baixo. Então, um sistema hidráulico é encarregado por transformar esse movimento linear em um movimento rotativo que aciona um gerador (EXERGYN, 2022).

Como vantagens do produto pode-se citar:

- Vida útil: o dispositivo foi desenvolvido para operar 24h por dia, durante 7 dias na semana e possuir um ciclo de vida de aproximadamente 20 anos;
- Eficiência: aumenta a eficiência energética sem aumentar o consumo de outras fontes de energia não renováveis;
- Custo: o LCOE (*Levelized Cost of Energy*), ou custo nivelado da energia que é calculado por meio da soma de todos os custos associados a produção de energia (despesas capitais + operacionais) dividido pela geração ao longo da vida útil, é menor que €0,05 Kilowatts/h.
- Impacto ambiental: faz uso de uma fonte de energia que seria desperdiçada, sendo totalmente livre de emissão de poluentes.

Desta forma, a *Exergyn* revolucionou o mercado de energia geotérmica na Europa. Até o desenvolvimento desse dispositivo, a produção de energia elétrica desta forma exigia o aquecimento da água a temperaturas muito elevadas e grandes vazões, o que encarecia o processo, pois havia a necessidade de perfuração de poços muito profundos com grandes diâmetros (EXERGYN, 2022).

### 3.7.3.3 Robótica

Próteses mecânicas ganharam o incremento de fio de memória de forma na tentativa de imitar o movimento contínuo dos músculos humanos. Essa ideia é explorada para construção de modelos de mãos, braços e pernas. Na Figura 18, pode-se observar um modelo de mão desenvolvida em 2010.

**Figura 18 - Protótipo de uma mão com fios de nitinol**



**Fonte: ANDRIANESIS et al. (2010)**

O protótipo estudado por Andrianesis et al. (2010), apresentou uma série de melhorias quando comparado com os dispositivos comerciais já existentes no mercado. Dentre as vantagens pode-se citar o desenvolvimento de uma mão silenciosa, multifuncional, atraente esteticamente, capaz de realizar tarefas básicas e com menor taxas de rejeição.

O principal ganho desse protótipo está associado ao desempenho do dedo, uma vez que ele apresenta tempo de resposta para a manipulação de tarefas básicas satisfatório e equivalente a mesma velocidade média humana (ANDRIANESIS et al., 2010).

#### 3.7.3.4 Outros

Janiet al. (2014) cita ainda diversas aplicações nos mais variados ramos, relacionadas ao incremento de ligas de Nitinol em dispositivos novos ou já existentes. Por exemplo, no campo automobilístico esse material é frequentemente agregado a radiadores, anéis de pistão, válvulas, atuadores, etc. Já, na área aeroespacial, podem ser encontrados em componentes de asas, turbinas, atuadores e controladores, sempre relacionados a melhora do desempenho aerodinâmico e a redução de ruídos sobretudo durante a decolagem e aterrissagem das aeronaves.

Além disso, existe grande interesse militar, uma vez que compósitos com ligas de memória de forma são utilizados para absorção de choque em coletes a prova de bala e em placas de proteção que revestem tanques de guerra, ambas, explorando a capacidade de amortecimento da liga de memória de forma (HUMBEECK, 1999).

No setor de petróleo e gás, compósitos com Nitinol são frequentemente utilizados para controlar o *blowout*, que é o fluxo não controlado de fluídos do poço. O mecanismo para a vedação deste fenômeno é constituído por molas de aço inoxidável e a SMA. Quando aquecidas por meio de corrente elétrica associada a um gerador na superfície, essas molas expandem empurrando um conector que interrompe a passagem de fluido, vedando o canal. Já, para desobstruir o mesmo, interrompe-se a passagem da corrente elétrica, fazendo com que a mola retorne para a sua posição inicial (SILVA et al., 2008).

Assim, aplicações de Nitinol quando associado a outro material possuem um amplo campo de atuação que cada vez mais vem sendo explorada, seja ampliando as áreas e produtos já existentes no mercado, ou abrindo portas para produtos a serem desenvolvidos.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Esse estudo retratou de forma teórica alguns tópicos essenciais relacionados a ligas de memória de forma, em particular, a liga de Nitinol e pontos relevantes sobre materiais compósitos híbridos que utilizam essas ligas como reforço.

Conclui-se que os trabalhos anteriores apontam um vasto potencial de aplicação desses compósitos híbridos com memória de forma utilizando ligas de Ni-Ti. Isso é decorrente do grande número de combinações de materiais e de respostas positivas relacionadas ao ganho de propriedades mecânicas como módulo de elasticidade, máxima deformação e tensão de ruptura tanto na fase martensítica quanto na austenítica.

Entretanto, o manuseio em larga escala ainda é prejudicado em virtude de dois fatores: custo elevado e dificuldade de produção, sobretudo, manual para garantir homogeneidade e boa adesão. Além disso, a mudança da estrutura cristalina durante a transformação de fase da liga de memória de forma, é um grande desafio a ser dominado que afeta as propriedades físicas e mecânicas.

## REFERÊNCIAS

ANDRIANESIS, K.; KOVEOS, Y.; NIKOLAKOPOULOS, G.; TZES, A. Experimental Study of a Shape Memory Alloy Actuation System for a Novel Prosthetic Hand. **Journal Intell Robot Syst**, v. 78, 2010.

ARAUJO, C. J.; RODRIGUES, L. F. A.; NETO, J. F. C.; REIS, R. P. B. Fabrication and static characterization of carbon-fiber-reinforced polymers with embedded NiTi shape memory wire. **Smart Material Structures**, v. 17, p. 650-654, 2008.

BONCI, A., CARLUCCIO, G., CASTELLANO, M. G., CROCI, G., INFANTI, S., VISKOVIC, A. **Use of Shock Transmission Units and seismic Protection of Monuments**. University of Rom, 2001.

**BRAILE BIOMÉDICA**. Disponível em <https://www.braile.com.br>. Acesso em 03 de agosto de 2022.

BRITO, C. A. **Caracterização dinâmico-mecânica de compósitos metal/fibra e compósitos de fibra de carbono/resina epóxi para uso aeronáutico**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2007.

CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2016. xix , 882 p.

CAMPISTA, C. D. S. **Comportamento mecânico das ligas com efeito memória - relação do processamento termomecânico com a eficiência do tratamento ortodôntico**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais) - Programa de Pós Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

CASTILHO, W. S. **Caracterização termomecânica de compósitos híbridos com memória de forma**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, 2008.

CERÓN, D. M. S. **Desenvolvimento de uma metodologia para fabricação de compósitos híbridos com memória de forma**. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CHAWLA, K. K. **Composites materials: science and engineering**. 2. ed. Nova York: Springer, 2006.

COHADES, A.; MICHAUD, V. Shape memory alloys in fibre-reinforced Polymer composites. **Advanced Industrial and Engineering Polymer Research**, v. 1, p. 66-81, 2018.

DANIEL, I. M.; ISHAI, O. **Engineering mechanics of composite materials**. 2. Ed. Nova York: Oxford University Press, 2006.

DAVIS, A. B. **Investigation of the thermomechanical response of shape memory alloy hybrid composite beams**. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, North Carolina State University, Raleigh, 2004.

DELAEY, L.; KRISHNAN, R. V.; TAS, H. Thermoelasticity, pseudoelasticity and the memory effects associated with martensitic transformations. Part 1. Structural and microstructural changes associated with the transformations. **Journal of Materials Science**, 9 ed.; p.1521-1535, 1974.

DUERIG, T.; PELTON, A.; STOECKEL, D. An Overview of nitinol medical applications. **Materials Science & Engineering**, Freemont, p. 149-160, 1999

DUERIG, T. W.; STÖCKEL, D.; MELTON, K. N.; WAYMAN, C.M. **Engineering aspects of shape memory alloys**. 1 ed. Londres: Butterworth-Heinemann, 1990.

**Exergyn**. Disponível em <https://exergyn.com>. Acesso em 03 de agosto de 2022.

FERNANDES, F. M. B. Ligas com Memória de Forma. **Materiais 2000**. 1 ed. Lisboa: IST – Press, p. 43-48, 2006.

GANDHI, V. M.; THOMPSON, S. B. **Smart materials and structures**. 1. ed. London: Chapman and Hall, 1992.

GIBSON, R. F. **Principles of composite material mechanics**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2016.

HUMBEECK, J. V. Non-medical applications of shape memory alloys. **Materials Science & engineering**, Heerlen, p. 134-148, 1999.

JANI, J. M.; LEARY, M.; SUBIC, A.; GIBSON, M. A review of shape memory alloy research application and opportunities. **Journal Elsevier, Materials & Design**, v. 56, p. 1078-1113, 2014.

JUNIOR, M. D. O.; DONADON, V. M.; CASTRO, S. G. P. Aeroelastic behavior of stiffened composite laminated panel with embedded SMA wire using the hierarchical Rayleigh–Ritz method. **Composite Structures**, v. 181, p. 26-45, 2017.

KAW, A. K. **Mechanic of Composite Materials**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2006.

KAUFFMAN, G. B; MAYO, I. The story of nitinol: the serendipitous discovery of the memory metal and its applications. **The Chemical Educator**, v. 2, n. 2, p. 1-21, 1997.

LAGOUDAS, C. D. **Shape memory alloys: modeling and engineering applications**. 1. ed. Boston: Springer, 2008.

LEITE, B. E.; MACEDO, R. F.; JÚNIOR, W. F. W.; ARAÚJO, C. J. J. Processing methodology to embedding NiTi shape memory fibers into a polymer-based composite plate. **Materials Science Forum**, v. 643, p. 1-5, 2010.

MENDONÇA, P. T. R. **Materiais compostos & estruturas-sanduíche: projeto e análise.** 2 ed. Florianópolis: Orsa Maggiore, 2019.

MICHAUD, V. Can shape memory alloy composites be smart?. **Scripta Materialia**, v. 50, n. 2, p. 249-253, 2004.

MIYAZAKI, S.; KIM, H. Y.; HOSODA, H. Development and characterization of Ni-free Ti-base shape memory and superelastic alloys. **Materials Science and Engineering A**, v. 438-440, p. 18-24, 2006.

MO, Y. L., KAIRY, D.; OTERO, K.; SONG, G. **Desenvolvimento and Testing of a Proof-of-Concept Smart Concrete Structure.** Department of Civil Engineering and Department of Mechanical Engineering, University of Houston, Texas, 2004.

MORGAN, N. B. Medical Shape memory alloy applications - the market and its products. **Materials Science & Engineering**, Arvada, p. 16-23, 2004.

NASCIMENTO, R. L. E. **Produção e caracterização de compósitos inteligentes.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2009.

NETO, F. N.; PARDINI, L. C. **Compósitos estruturais: ciência e tecnologia.** 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2016.

OLIVEIRA, A. S. **Modelagem termomecânica de ligas com memória de forma em um contexto tridimensional.** 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

OTSUKA, K.; REN, X. Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. **Progress in Materials Science**, v. 50, n. 5, p. 511-678, 2005.

OTSUKA, K.; WAYMAN, C. M. **Shape memory materials.** 1 ed. Reino Unido: Cambridge University Press, 1998.

PAINE, J.; ROGERS, C. Review of multi-functional sma hybrid composite materials and their applications, adaptive structures and composite materials: analysis and application. **International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, v. 36, p. 37-45, 1994.

PATOOR, E.; LAGOUDAS, C. D.; PAVLIN, B.; ENTCHEV, L.; CATHERINE, B.; XIUJIE, G. Shape memory alloys, Part I: General properties and modeling of single crystals. **Mechanics of Materials**, v. 38, p. 389-570, 2006.

ROGERS, C. A; ROBERTSHAW, H. H. Shape memory alloy reinforced composites. **Society of Engineering Science**, 1988.

SAIGAL, A.; FONTE, M. Solid, shape recovered “bulk” Nitinol: Part I – Tension-compression asymmetry. **Materials Science and Engineering A**, v. 528, p. 5536-5550, 2011.

SHAW, J. A.; KYRIAKIDES, S. Thermomechanical aspects of niti. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 43, n. 8, p. 1243-1281, 1995.

SILVA, N. J.; SILVA, M. M.; GOMES, A. A. C.; ARAÚJO, C. J. SANTOS, M. A. Análise prospectiva da aplicabilidade de atuadores deligas com memória de forma no setor de petróleo e gás. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2008.

STRANDBERG, E. **Caracterización de aleaciones de titaniocon bajo módulo elástico y memoria de forma para aplicacones biomédicas**.2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 2006.

TOMAR, S.M. **Comportamento mecânico de matérias compósitos de origem natural**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, 2018.

TURNER, T. L. **Thermomechanical response of shape memory alloy hybrid composites**. 2000. Tese (PhD em Engenharia Mecânica) –Faculdade de Engenharia da Virgínia, Instituto Politécnico da Virgínia e Universidade Estadual, Blacksburg, 2000.

WILLIAMS, K., CHIU, G.; BERNHARD, R. **Adaptive-passive absorbers using shape memory alloys**. **Journal of Sound and Vibration**, v. 249, p. 835-848, 2002.

ZAK, A. J; CARTMELL, M. P.; OSTACHOWICZ, W. M. Dynamics and control of a rotor using integrated SMA/composite active bearing actuator. **Key Engineering Materials**, v. 245, p. 233-240, 2003.

ZHENG, Y.; JIANG, F.; LI, L.; YANG, H.; LIU, Y. Effect of ageing treatment on the transformation behavior of Ti–50.9 at.% Ni alloy. **Acta Materialia**, V. 56, p. 736-745, 2006.