

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA  
CELSO SUCKOW DA FONSECA – CEFET/RJ**

**Modelagem de Estruturas Treliçadas com Elementos  
de Ligas com Memória de Forma utilizando o  
Método de Elementos Finitos**

Bruno Dias Santos

Professor Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Professora Co-orientadora: Cristina Gomes de Souza

**Rio de Janeiro  
novembro de 2017**

**CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO  
TECNOLÓGICA CELSO SUCKOW DA FONSECA –  
CEFET/RJ**

**Modelagem de Estruturas Treliçadas com  
Elementos de Ligas com Memória de Forma  
utilizando o Método de Elementos Finitos**

Bruno Dias Santos

Projeto final apresentado em  
cumprimento às normas do  
Departamento de Educação  
Superior do CEFET/RJ,  
como parte dos requisitos  
para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia  
Mecânica

Professor Orientador: Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Professora Co-orientadora: Cristina Gomes de Souza

**Rio de Janeiro  
novembro de 2017**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central do CEFET/RJ

S237 Santos, Bruno Dias

Modelagem de estruturas treliçadas com elementos de ligas com memória de forma utilizando o método de elementos finitos / Bruno Dias Santos.—2017.

117f. + apêndices e anexo : il. (algumas color.) , grafs. , tabs. ; enc.

Projeto Final (Graduação) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca , 2017.

Bibliografia : f. 111-117

Orientador : Pedro Manuel Calas Lopes Pacheco

Coorientadora : Cristina Gomes de Souza

1. Engenharia mecânica. 2. Ligas com memória de forma. 3. Método dos elementos finitos. 4. Dinâmica estrutural. 5. Patentes. I. Pacheco, Pedro Manuel Calas Lopes (Orient.). II. Souza, Cristina Gomes de (Coorient.). III. Título.

CDD 621

## RESUMO

O mercado global dos materiais e estruturas inteligentes está em pleno crescimento, com diversas aplicações em vários ramos de atividade. Um dos principais tipos de materiais inteligentes utilizados são as ligas com memória de forma. Devido às suas características e propriedades singulares, as ligas com memória de forma se mostram adequadas para aplicações em atenuadores de vibrações em estruturas, entre outras. De modo a analisar o estado da técnica referente às ligas com memória de forma, conduziu-se uma busca em bases de dados gratuitas por documentos patentários a respeito dessas ligas. O método de elementos finitos é comumente empregado para a análise de estruturas relativamente complexas. Neste trabalho, é apresentada uma comparação numérico-experimental de um ensaio de tração de um fio de ligas com memória de forma e um projeto de estruturas treliçadas com elementos de ligas com memória de forma. As simulações numéricas foram realizadas em software comercial de elementos finitos com o objetivo de estudar o comportamento dessas estruturas.

Palavras-chave: Estruturas inteligentes, ligas com memória de forma, busca por documentos patentários, método de elementos finitos, vibrações em estruturas

## **ABSTRACT**

The global market for smart materials and structures is in full growth, with several applications in many fields of activity. Shape memory alloys is one of the main type of smart materials used. Due to their remarkable features and properties, shape memory alloys are suitable for applications in vibration attenuators for structures, among others. In order to analyze the state of the art regarding shape memory alloys, a patent search was carried out by using free databases. The finite element method is commonly employed for the analysis of relatively complex structures. In this work, a numerical-experimental comparison of a tensile test of a shape memory alloy wire and a project of a framed structure with shape memory alloy elements are presented. The numerical simulations were carried out in a finite element commercial software with the objective of studying the behavior of these structures.

**Key-words:** Smart structures, shape memory alloys, patent search, finite element method, structural vibrations

## SUMÁRIO

Capítulo 1 – Introdução.....	14
Capítulo 2 – Estruturas treliçadas e pórticos.....	16
2.1 Estruturas .....	16
2.1.1 Tipos de elementos estruturais .....	16
2.1.2 Tipos de estruturas.....	16
2.2 Vibrações em Estruturas .....	18
2.2.1 Formulação dos Problemas de Vibrações em Estruturas.....	20
Capítulo 3 – Ligas com Memória de Forma .....	22
3.1 Aspectos gerais sobre SMAs.....	22
3.2 Comportamento termomecânico .....	24
3.2.1 Efeito Memória de Forma.....	24
3.2.2 Efeito Pseudoelástico.....	25
3.3 Modelagem matemática .....	26
3.3.1 Parâmetros do Modelo de Auricchio e Petrin.....	28
Capítulo 4 – Buscas por patentes relacionadas às Ligas com Memória de Forma .....	30
4.1 Aspectos gerais sobre o estado da técnica relacionado a SMAs.....	30
4.1.1 Breve histórico a respeito da pesquisa acadêmica sobre SMAs.....	30
4.1.2 Busca inicial por documentos patentários sobre SMAs .....	31
4.2 Busca por Documentos Patentários mais relevantes.....	33
4.2.1 Estratégia de busca e resultados .....	33
4.2.2 Exemplos de aplicações por ramos de atividade .....	37
4.2.2.1 Biomedicina .....	37
4.2.2.2 Aeroespacial .....	39
4.2.2.3 Automobilístico.....	41
4.2.2.4 Construção civil .....	42
4.3 Documentos Patentários relacionados a ligas com memória de forma no Brasil .....	44
4.3.1 Documentos depositados no Brasil.....	45
4.3.1.1 Exemplos de documentos patentários relacionados a ligas com memória de forma depositados no Brasil.....	48
4.3.2 Documentos depositados por agentes econômicos nacionais via PCT .....	50

Capítulo 5 – Método de Elementos Finitos.....	54
5.1 Modelagem de estruturas através do método de elementos finitos.....	54
5.2 Não-linearidades .....	55
5.3 Tipos de Elementos.....	56
Capítulo 6 – Comparação Numérico-Experimental de Ensaio de Tração de um Fio de Liga com Memória de Forma.....	58
6.1 Ensaio de tração .....	58
6.2 Simulação do ensaio de tração .....	60
Capítulo 7 – Projeto de Estrutura Treliçada com Elementos de Ligas com Memória de Forma.....	63
7.1 Busca por anterioridades.....	63
7.1.1 Anterioridades relevantes para a presente estrutura .....	64
7.1.2 Outros documentos do estado da técnica.....	66
7.2 Estrutura projetada .....	67
7.2.1 Descrição detalhada da estrutura .....	70
7.3 Simulação numérica da estrutura .....	73
7.3.1 Geometria e malha.....	74
7.3.2 Propriedades mecânicas.....	76
7.3.3 Solução .....	79
7.3.3.1 Análise modal.....	79
7.3.3.1.1 Pós-processamento .....	80
7.3.3.1.1.1 Apoios pinados.....	80
7.3.3.1.1.2 Apoios engastados.....	83
7.3.3.2 Análise harmônica.....	87
7.3.3.2.1 Pós-processamento .....	87
7.3.3.2.1.1 Apoios pinados.....	87
7.3.3.2.1.2 Apoios engastados.....	89
7.3.3.3 Análise estática.....	92
7.3.3.3.1 Pós-processamento .....	92
7.3.3.3.1.1 Apoios pinados.....	92
7.3.3.3.1.1.1 Estrutura com fios de alumínio.....	92
7.3.3.3.1.1.2 Estrutura com fios pseudoelásticos.....	94
7.3.3.3.1.1.3 Estrutura com fios de efeito memória de forma .....	97
7.3.3.3.1.2 Apoios engastados.....	100
7.3.3.3.1.2.1 Estrutura com fios de alumínio.....	100
7.3.3.3.1.2.2 Estrutura com fios pseudoelásticos.....	102

7.3.3.3.1.2.3 Estrutura com fios de efeito memória de forma .....	105
Capítulo 8 – Conclusão e sugestões para trabalhos futuros .....	109
Referências Bibliográficas .....	111
APÊNDICE 1 – Simulação do Ensaio de Tração .....	118
APÊNDICE 2 – Simulação da Estrutura com os Fios de SMA.....	123
ANEXO 1 – Classificações Internacionais de Patentes citadas, Buscas INPI e PATENTSCOPE .	136

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1.1 – Elevado da Linha Vermelha (Eller, 2011).....	17
Figura 2.1.2 – Ponte estaiada (Hibbeler, 2012).....	17
Figura 2.1.3 – Pórtico (Hibbeler, 2012).....	17
Figura 2.2.1 – Idealização em elementos finitos da estrutura de um ônibus (Rao, 2011). ....	19
Figura 2.2.2 – Teste dinâmico realizado no ônibus espacial <i>Enterprise</i> (Rao, 2011).....	19
Figura 2.2.3 – Tipos de esforços dinâmicos (Adeodato, 2014). ....	20
Figura 2.2.4 – Sistema massa-mola (Savi e Pacheco, 2002).....	20
Figura 3.1.1 – Diagrama de fases de equilíbrio do sistema NiTi (Adaptado de Lexcellent, 2013). ...	23
Figura 3.1.2 – Relação da temperatura inicial de transformação martensítica, Ms, e o teor de níquel (Adaptado de Lexcellent, 2013).....	23
Figura 3.2.1 – Efeito Memória de Forma (Adaptado de Pereira, 2009). ....	25
Figura 3.2.2 – Comportamento Pseudoelástico Induzido por Tensão (Adaptado de Pereira, 2009).....	25
Figura 3.3.1 – Representação gráfica dos parâmetros do modelo de Auricchio e Petrini (2004) (Averbug, G.G. 2016). ....	29
Figura 4.1.1 – Materiais Inteligentes: documentos patentários publicados por ano (adaptado de Lens, 2017a).....	32
Figura 4.2.1 – Número de documentos publicados contendo os termos de interesse no título, resumo ou reivindicações por ano (adaptado de Lens, 2017b).....	33
Figura 4.2.2 – Dez maiores depositantes de documentos contendo os termos de interesse no título, resumo ou reivindicações (adaptado de Lens, 2017b). ....	34
Figura 4.2.3 – Jurisdições com maiores números de documentos relevantes (adaptado de Lens, 2017b). ....	35
Figura 4.2.4 – Pedidos por origem do depositante (adaptado de Patent Inspiration, 2017). ....	36
Figura 4.2.5 – Dez classificações internacionais de patentes com maior número de documentos relevantes (adaptado de Lens, 2017b).....	37
Figura 4.2.6 – Stent auto-expansível helicoidal não-tecido (McHugo, 2016). ....	38
Figura 4.2.7 – Prótese de Cotovelo feita de SMA (adaptado de Batalu <i>et al.</i> , 2016). ....	38
Figura 4.2.8 – Agulha cirúrgica incluindo um elemento de SMA (adaptado de Suzuki e Hattori, 2015). ....	39
Figura 4.2.9 – Mangueira para reabastecimento em voo (adaptado de Lengyel <i>et al.</i> , 2017). ....	40
Figura 4.2.10 – Isolador de Vibrações (Ung <i>et al.</i> , 2015).....	40
Figura 4.2.11 – Sistema para modificar o formato de uma longarina estrutural (Lyn <i>et al.</i> , 2013). .	41
Figura 4.2.12 – Conjunto de válvula acionado eletronicamente para um motor de combustão interna (Riley <i>et al.</i> , 2013). ....	41
Figura 4.2.13 – Dispositivo de aleta de ar para um veículo (Bae, 2013).....	42

Figura 4.2.14 – Aparelho para absorver choques repetitivos (Hodgson, 2016).....	43
Figura 4.2.15 – Dispositivo de retorno automático para isolamento sísmico (Youhai <i>et al.</i> , 2014)..	43
Figura 4.2.15 – Atenuador de Vibrações (Zhuang <i>et al.</i> , 2016). .....	44
Figura 4.3.1 – Documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017). 45	
Figura 4.3.2 – Origem dos depositantes dos documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017). .....	46
Figura 4.3.3 – Maiores depositantes de documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017). .....	46
Figura 4.3.4 – Tipos de depositantes nacionais: pessoa física, empresa privada e universidade (adaptado de INPI, 2017). .....	47
Figura 4.3.5 – Quantidade de pedidos por classificação (adaptado de INPI, 2017). .....	48
Figura 4.3.6 – Luva com efeito memória de forma para a união de tubulações (Melo <i>et al.</i> , 2016). 49	
Figura 4.3.7 – Sistema de introdução de dispositivos através de tecidos corpóreos (Trilha Júnior, 2009). .....	49
Figura 4.3.8 – Braquete autoligável com lâmina deslizante em formato “W” com memória de forma (Lopes, 2011). .....	50
Figura 4.3.9 – Luva de liga com memória de forma (Zaragoza Labes <i>et al.</i> , 2016).....	51
Figura 4.3.10 – Luva de liga com memória de forma (Lopes, 2012).....	52
Figura 4.3.11 – Fio guia motor (Nascimento, 2010). .....	52
Figura 4.3.12 – Prótese para anastomose (Granja Filho, 2007). .....	53
Figura 5.1.1 – Etapas do método de elementos finitos (Riagusoff, 2012). .....	54
Figura 5.2.1 – Etapas de carregamento e intervalos de tempo (Silva, 2016).....	56
Figura 5.3.1 – Elementos básicos (Alawadhi, 2010).....	57
Figura 5.3.2 – Elemento de casca (Alawadhi, 2010).....	57
Figura 6.1.1 – Ensaio de tração (Silveira, 2017). .....	58
Figura 6.1.2 – Curvas de caracterização (Silveira, 2017).....	59
Figura 6.1.3 – Retas de caracterização (Silveira, 2017). .....	59
Figura 6.2.1 – Seção transversal do fio simulado.....	61
Figura 6.2.2 – Geometria do fio simulado.....	61
Figura 6.2.3 – Comparação numérico-experimental. ....	62
Figura 7.1.1 – Dispositivo com propósitos educacionais e de pesquisa para demonstrar o controle de vibrações estruturais utilizando materiais inteligentes (adaptada de Olmi <i>et al.</i> , 2007). .....	64
Figura 7.1.2 – Estrutura para controle de vibrações de um modelo de edifício (Kotani e Okabe, 2002). .....	65
Figura 7.1.3 – Simulador dinâmico com uma estrutura de teste (Kim e Nam, 2016). .....	65
Figura 7.1.4 – Pórtico reforçado com barras de SMA – dimensões em cm (adaptada de Liao e Mo, 2006). .....	66
Figura 7.1.5 – Pórtico reforçado com barras de SMA (Liao e Mo, 2006). .....	66
Figura 7.1.6 – Pórtico com amortecedor de SMA (Hu e Ahn, 2013).....	67
Figura 7.2.1 – Trilho de demonstração (Phywe, 2017).....	67
Figura 7.2.2 – Estrutura com mancais de apoio formados por juntas pinadas. ....	69
Figura 7.2.3 – Estrutura com mancais de apoio formados por juntas engastadas. ....	69

Figura 7.2.4 – Mancais: a) apoios pinados, b) apoios engastados. ....	70
Figura 7.2.5 – Barras verticais. ....	71
Figura 7.2.6 – Barras horizontais. ....	71
Figura 7.2.7 – Fixação das barras horizontais à chapa superior.....	72
Figura 7.2.8 – Vista frontal da estrutura.....	73
Figura 7.3.1 – Comparação entre o desenho da estrutura (a), e a sua idealização em elementos finitos (b). ....	74
Figura 7.3.2 – Malha de elementos finitos – estrutura com fios de SMA.....	76
Figura 7.3.3 – Análise de convergência. ....	76
Figura 7.3.4 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico.....	77
Figura 7.3.5 – Tensão x deformação – Fio de memória de forma – T = 25 °C.....	78
Figura 7.3.6 – Tensão x deformação – Fio de memória de forma – T = 55 °C.....	78
Figura 7.3.7 – Primeiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	81
Figura 7.3.8 – Segundo modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	82
Figura 7.3.9 – Terceiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	82
Figura 7.3.10 – Primeiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	84
Figura 7.3.11 – Segundo modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	85
Figura 7.3.12 – Terceiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.....	86
Figura 7.3.13 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.....	88
Figura 7.3.14 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.....	88
Figura 7.3.15 – Análise harmônica – Estrutura com fios de efeito memória de forma e de alumínio. ....	89
Figura 7.3.16 – Análise harmônica – Estrutura com fios de efeito memória de forma e de alumínio. ....	89
Figura 7.3.17 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.....	90
Figura 7.3.18 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.....	90
Figura 7.3.19 – Análise harmônica – Estrutura com fios de alumínio e com fios de efeito memória de forma. ....	91
Figura 7.3.20 – Análise harmônica – Estrutura com fios de alumínio e com fios de efeito memória de forma. ....	91
Figura 7.3.21 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de alumínio. ....	93
Figura 7.3.22 – Análise estática – Tensões x deformação – fio de alumínio.....	93
Figura 7.3.23 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de alumínio. ....	94

Figura 7.3.24 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	94
Figura 7.3.25 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico. ....	95
Figura 7.3.26 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	96
Figura 7.3.27 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	96
Figura 7.3.28 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	97
Figura 7.3.29 – Tensão x deformação – Fio de efeito memória de forma. ....	98
Figura 7.3.30 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	98
Figura 7.3.31 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	99
Figura 7.3.32 – Deslocamento em X – Fios diversos. ....	99
Figura 7.3.33 – Tensão x deformação – Fios diversos. ....	100
Figura 7.3.34 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de alumínio. ....	101
Figura 7.3.35 – Análise estática – Tensões x deformação - Estrutura com fios de alumínio. ....	101
Figura 7.3.36 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de alumínio. ....	102
Figura 7.3.37 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	102
Figura 7.3.38 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico. ....	103
Figura 7.3.39 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	104
Figura 7.3.40 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios pseudoelásticos. ....	104
Figura 7.3.41 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	105
Figura 7.3.42 – Tensão x deformação – Fio de efeito memória de forma. ....	105
Figura 7.3.43 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	106
Figura 7.3.44 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios de efeito memória de forma. ....	107
Figura 7.3.45 – Deslocamento em X – Fios diversos. ....	107
Figura 7.3.47 – Tensão x deformação – Fios diversos. ....	108

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Pedidos depositados por nacionais via PCT (adaptado de WIPO, 2017b) .....	51
Tabela 6.1- Propriedades mecânicas do fio pseudoelástico ensaiado (Silveira, 2017).....	60
Tabela 6.2 – Parâmetros utilizados na simulação. ....	62
Tabela 7.1 – Parâmetros do fio de memória de forma (adaptado de Brinson e Lammering, 1993)..	74
Tabela 7.2 – Parâmetros do fio de memória de forma (adaptado de Brinson e Lammering, 1993)..	75
Tabela 7.3 – Três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios pinados.....	80
Tabela 7.4 – Três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios engastados.....	83

## Capítulo 1 – Introdução

O desenvolvimento tecnológico das últimas três décadas aponta para uma maior utilização de materiais e sistemas inteligentes, aqueles que se adaptam às mudanças das condições ambientais e de operação através de alterações de propriedades, por exemplo, rigidez e forma, em diversos ramos de atividade. As aplicações das estruturas inteligentes incluem, por exemplo, redução de vibrações e monitoramento de integridade estrutural. Há também notável uso de materiais inteligentes no ramo de atuadores e sensores devido à crescente demanda de alto desempenho nos produtos projetados (Chopra e Sirohi, 2013; Smith, 2005).

Tais materiais inteligentes, que são amplamente utilizados atualmente, incluem polímeros e cerâmicos piezoelétricos, fluidos magneto-reológicos, materiais magnetostrictivos e ligas com memória de forma (Soh *et al.*, 2012). Estima-se que o mercado global de materiais inteligentes em 2010 era de aproximadamente US\$ 19,6 bilhões, aproximando-se de US\$ 22 bilhões em 2011 e mais de US\$ 40 bilhões em 2016, com uma taxa composta de crescimento anual de 12,8% entre 2011 e 2016 (Menna *et al.*, 2015).

As Ligas com Memória de Forma (*Shape Memory Alloys - SMAs*) têm sido pesquisadas e utilizadas devido a suas características e comportamentos singulares, associados a alterações microestruturais. Tais ligas metálicas são assim chamadas por exibirem a capacidade de recuperarem a sua forma inicial após um ciclo termomecânico apropriado. Ademais, sob determinadas condições, as SMAs são capazes de absorver e dissipar energia mecânica através de uma mudança de forma histerética e reversível quando submetidas a um carregamento mecânico cíclico. Essas características únicas das SMAs são responsáveis pela popularidade dessas ligas para aplicações relacionadas a sensores e atuadores, assim como absorvedores e dissipadores de vibração (Lexcellent, 2013; Lagoudas, 2008).

Entretanto, essas ligas também possuem características que limitam sua capacidade de atenuar vibrações, assim diminuindo o desempenho de dispositivos que apresentam comportamento pseudoelástico, como resposta de baixa frequência, dependência da amplitude de tensão, da temperatura e redução do laço de histerese com aumento da frequência de carregamento (Aguiar, 2011; Ozbulut e Hurlebaus, 2011; Casciati e Marzi, 2010).

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um projeto de estrutura treliçada com elementos de ligas com memória de forma, realizando simulações numéricas, baseadas no método de Elementos Finitos, para analisar o comportamento mecânico desta estrutura.

Os elementos que tipicamente compõem estruturas e os tipos de estruturas são introduzidos, trazendo exemplos de estruturas treliçadas e pórticos, além de problemas de vibrações em estruturas e a formulação desses problemas de vibrações em dinâmica estrutural.

Também é apresentada uma discussão sobre as ligas com memória de forma, contendo aspectos gerais sobre tais ligas, como histórico, tópicos sobre metalurgia, comportamento termomecânico dessas ligas e modelagem matemática desse comportamento.

É apresentada uma breve discussão sobre o estado da técnica referente às ligas com memória de forma, que inclui uma busca em bases de dados gratuitas por documentos patentários relacionados às ligas com memória de forma, de modo a mapear a informação tecnológica disponível sobre tais ligas. É realizada uma análise quantitativa e qualitativa sobre o estado da técnica relacionado, identificando a quantidade de documentos patentários sobre SMAs, as empresas que mais depositam documentos relacionados a tais ligas, as jurisdições com maior quantidade de depósitos, o país de origem dos depositantes e os ramos de atividade que apresentam maior quantidade de documentos patentários relacionados a essas ligas. São apresentados exemplos de aplicações de ligas com memória de forma, através de documentos patentários, nas áreas de biomedicina, aeroespacial, automobilístico e construção civil. Os documentos patentários sobre SMAs depositados no Brasil e depositados por brasileiros via PCT (Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes – *Patent Cooperation Treaty*) são analisados de modo a investigar produção de informação tecnológica sobre tais ligas no Brasil.

Ademais, é apresentada uma breve discussão sobre o método de elementos finitos, ressaltando algumas características gerais desse método e tecendo comentários sobre os tipos de não-linearidades e os principais tipos de elementos utilizados nas análises de elementos finitos.

Uma comparação numérico-experimental de um ensaio de tração de um fio de liga com memória de forma é incluída. Os resultados do ensaio em questão foram apresentados por Silveira (2017). Foi desenvolvido um código para o software Ansys APDL 18.1 com o objetivo de simular esse ensaio, identificando as propriedades termomecânicas desse fio de SMA pseudoelástico, disponível no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM) do CEFET/RJ, apresentando assim comparação entre os resultados desse ensaio experimental e tais simulações numéricas.

Por último, é apresentado um projeto de estrutura treliçada com elementos de ligas com memória de forma. Uma busca por anterioridades foi realizada de modo a definir as principais características e desafios de um projeto nessa área. São mostrados os desenhos da estrutura projetada e as simulações numéricas foram realizadas no software comercial Ansys 18.1 para definir as características dinâmicas e o comportamento mecânico da mesma.

## Capítulo 2 – Estruturas treliçadas e pórticos

Este capítulo trata de um levantamento das características das estruturas treliçadas e pórticos e dos problemas relacionados a vibrações que essas estruturas podem ser submetidas.

### 2.1 Estruturas

O termo *estrutura* se refere a um sistema de elementos conectados que é utilizado para suportar uma determinada carga. Alguns exemplos de estruturas são os prédios e pontes, assim como os cascos de embarcações, fuselagens de aeronaves, tanques e vasos de pressão. Durante a análise de uma estrutura, deve-se reconhecer os tipos de elementos que compõem a estrutura e classificá-la quanto sua forma e função (Leet *et al.*, 2010; Hibbeler, 2012).

#### 2.1.1 Tipos de elementos estruturais

Os elementos estruturais mais comuns são os tirantes, vigas e colunas. Os tirantes são elementos que suportam esforços trativos e por esta razão, são comumente delgados. As vigas são elementos geralmente horizontais projetados para resistir a momentos fletores gerados por cargas verticais. As colunas são elementos geralmente verticais que resistem a cargas axiais compressivas (Hibbeler, 2012).

#### 2.1.2 Tipos de estruturas

Alguns dos tipos de estruturas mais empregados em engenharia são as treliças, pórticos e cabos. As treliças são compostas por elementos delgados normalmente dispostos em padrões triangulares. Considera-se que os esforços nos elementos de uma treliça são axiais, podendo ser compressivos ou trativos. Os pórticos são compostos por vigas e colunas que podem ser fixados através de juntas rígidas ou pinos, apresentando-se em duas ou três dimensões, assim como as treliças. Outra forma comum de estruturas revela-se com a utilização de cabos, que são elementos normalmente flexíveis e suportam carregamentos de tração. Os cabos são usualmente pré-tracionados utilizando-se esticadores.

A Figura 2.1.1 mostra o elevador da Linha Vermelha na cidade do Rio de Janeiro, que é formado por uma estrutura treliçada, a Figura 2.1.2 mostra uma ponte estaiada, sustentada por cabos e a Figura 2.1.3 mostra um pórtico.



Figura 2.1.1 – Elevado da Linha Vermelha (Eller, 2011).



Figura 2.1.2 – Ponte estaiada (Hibbeler, 2012).



Figura 2.1.3 – Pórtico (Hibbeler, 2012).

## 2.2 Vibrações em Estruturas

O desenvolvimento de materiais relativamente resistentes e leves, como aço, ferro fundido e alumínio, assim como o maior entendimento a respeito das propriedades dos materiais e dos carregamentos estruturais levou a diminuição da massa das estruturas comumente empregadas nos últimos dois séculos. Paralelamente, o desenvolvimento de máquinas mais eficientes e com maiores velocidades de rotação tem aumentado a magnitude das forças dinâmicas em estruturas. Logo, esse processo contínuo relacionado ao aumento de esforços dinâmicos com a diminuição da massa e do amortecimento nas estruturas leva a uma maior necessidade de analisar o desempenho dinâmico das estruturas projetadas (Beards, 1996).

As vibrações indesejadas, que ocorrem em grande parte das máquinas, estruturas e sistemas dinâmicos, não causam apenas movimentos não-desejados, ruídos e carregamentos dinâmicos que podem levar a fadiga e falha de estruturas e máquinas, mas também perdas de energia e diminuição do desempenho dos componentes. Outra consequência indesejável das vibrações é produzir desconforto físico e mental nos operadores e usuários dos sistemas de engenharia (Aguilar, 2011; Beards, 1996).

Portanto, torna-se essencial realizar uma análise de vibrações em projetos de estruturas, sendo muitas vezes necessário o uso de dispositivos atenuadores ou mesmo dispositivos de controle dessas vibrações indesejáveis. Essa análise de vibrações é feita através de modelos matemáticos para prever as frequências naturais e a resposta dinâmica da estrutura a uma dada excitação. Tal modelagem matemática envolve a simplificação da estrutura analisada de maneira a produzir informações relevantes e com acuracidade aceitável. O método de Elementos Finitos é comumente empregado para a análise de vibrações de estruturas, principalmente aquelas com geometria e carregamentos complexos.

A título de conhecimento histórico, cabe ressaltar que até meados da década de 1970, os estudos de vibração, inclusive aqueles que lidavam com sistemas de engenharia complexos, eram realizados, muitas vezes, usando modelos simplificados, apresentando poucos graus de liberdade. Entretanto, o surgimento de computadores digitais de alta velocidade, a partir da década de 1950, e o desenvolvimento simultâneo do método dos elementos finitos permitiu o uso de computadores digitais para realizar análises de vibração numericamente detalhadas de sistemas mecânicos, veiculares e estruturais complexos, que podem possuir milhares de graus de liberdade. Embora a nomenclatura “método dos elementos finitos” seja relativamente recente, seu conceito é utilizado há séculos. Por exemplo, matemáticos antigos encontraram a circunferência de um círculo, aproximando-o como um polígono, onde cada lado do polígono, na notação atual, pode ser chamado de elemento finito. O método de elementos finitos como conhecido hoje foi apresentado por Turner, Clough, Martin e Topp para a

análise de estruturas de aeronaves (Rao, 2011). A Figura 2.1.1 mostra uma idealização em elementos finitos da estrutura de um ônibus.

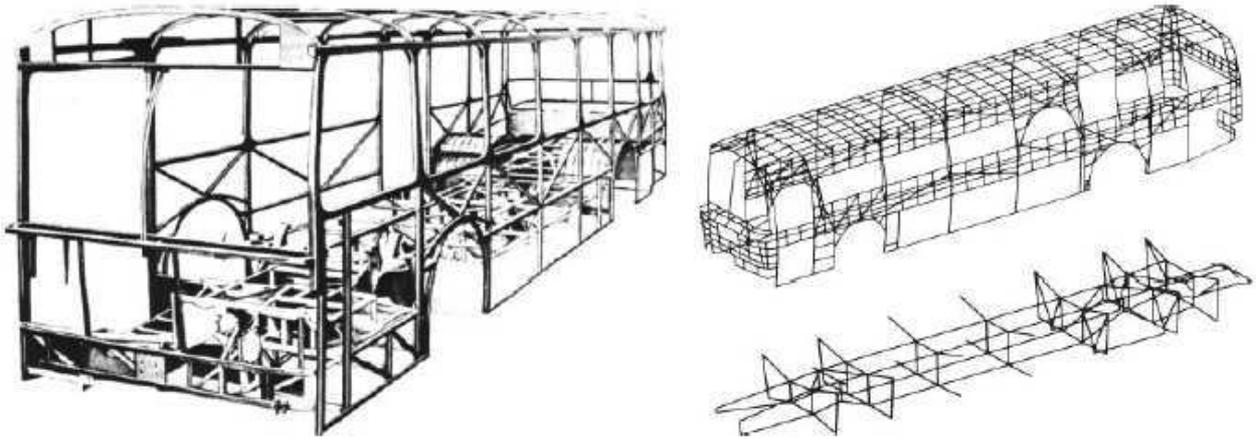


Figura 2.2.1 – Idealização em elementos finitos da estrutura de um ônibus (Rao, 2011).

A simulação numérica, dada por um modelo matemático resolvido, por exemplo, através do método de elementos finitos, pode ser confirmada através de testes dinâmicos, que podem ser conduzidos em modelos físicos de escala reduzida, como testes em túneis de vento de modelos de aeronave, e em estruturas em escala real. Outros usos relevantes dos testes dinâmicos estão associados à obtenção de informações a respeito do amortecimento estrutural e das cargas de operação, a monitorar a operação de uma máquina ou estrutura para diagnosticar a necessidade de manutenção, assim como determinar que modificações na massa, rigidez e/ou amortecimento poderiam melhorar o desempenho da estrutura (Craig e Kurdila, 2006). A Figura 2.2.2 mostra um teste dinâmico realizado no ônibus espacial *Enterprise*.



Figura 2.2.2 – Teste dinâmico realizado no ônibus espacial *Enterprise* (Rao, 2011).

## 2.2.1 Formulação dos Problemas de Vibrações em Estruturas

As vibrações em estruturas são vibrações mecânicas que promovem movimentos dos corpos pertencentes a essas estruturas devido a efeitos externos que são dependentes do tempo. Logo, uma grande preocupação que surge no estudo de vibrações em estruturas é determinar o instante e condições em que esse movimento se torna indesejado, ou seja, determinar as amplitudes que podem ser prejudiciais à estrutura em análise.

Estruturas podem ser submetidas a esforços de natureza dinâmica que podem ser periódicas ou não-periódicas. Em alguns casos, um esforço não-periódico pode ser transiente ou impulsivo, assim como um esforço periódico pode ter comportamento harmônico (Adeodato, 2014). A Figura 2.2.3 mostra os principais tipos de esforços os quais uma estrutura pode ser submetida.

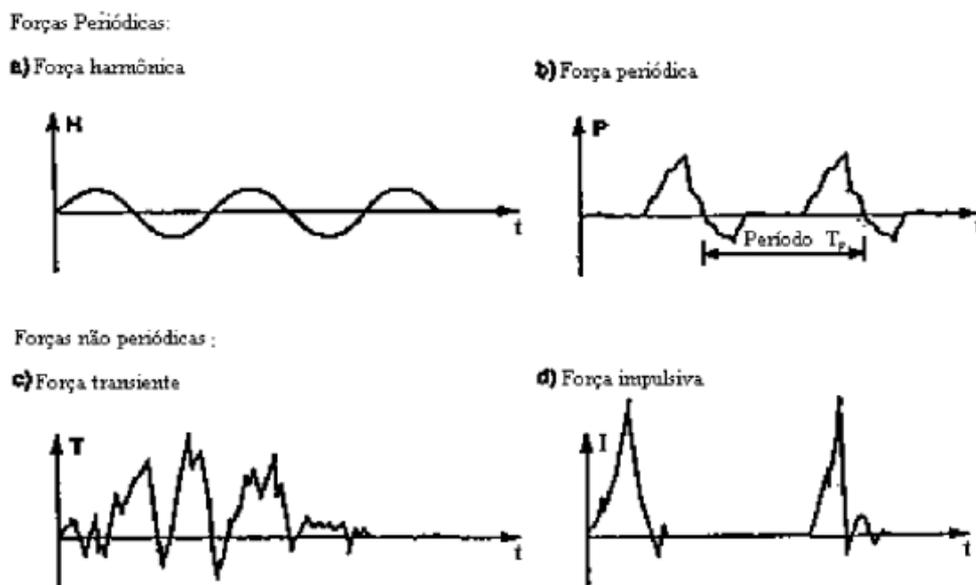


Figura 2.2.3 – Tipos de esforços dinâmicos (Adeodato, 2014).

Segundo Beards (1996), os problemas de vibrações podem ser idealizados através de modelos simplificados envolvendo sistemas massa-mola. A Figura 2.2.4 mostra um esquema de um sistema massa-mola.

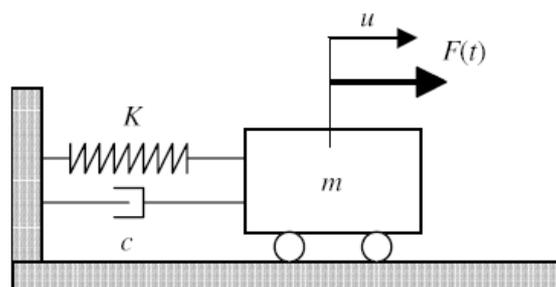


Figura 2.2.4 – Sistema massa-mola (Savi e Pacheco, 2002).

O estudo das vibrações em estruturas pode ser dividido em quatro naturezas distintas (Rao, 2011), a saber:

i) *Vibrações livres não amortecidas*: São aquelas as quais, por inércia, a massa tende a oscilar de forma harmônica simples sem que um elemento amortecedor atue sobre o sistema.

ii) *Vibrações livres amortecidas*: São aquelas as quais, por inércia, a massa tende a oscilar de forma harmônica simples com um elemento amortecedor atuando sobre o sistema.

iii) *Vibrações forçadas não amortecidas*: São aquelas nas quais uma força externa age sobre o sistema massa-mola. Algumas fontes desse tipo de vibração em estruturas são: rotação desbalanceada de componentes de máquina, vento, corrente marítima e excitações de base. Muitas forças externas são periódicas, mas caso não sejam, podem ser representadas através de séries harmônicas de funções de Fourier. Neste caso particular, não há atuação de um elemento amortecedor.

iv) *Vibrações forçadas amortecidas*: Assemelham-se às vibrações forçadas não amortecidas, entretanto possuem elementos amortecedores que atuam sobre o sistema, fazendo com que este tenha diminuídas suas amplitudes de vibrações.

Os diversos tipos de vibrações citadas acima são impostos às estruturas quando estão em uso. Muitas das situações descritas são inevitáveis a essas estruturas, por isso seus projetos devem levar em conta os efeitos dos esforços dinâmicos e quando for o caso, devem ser previstos elementos atenuadores de vibrações, para evitar danos as mesmas.

## Capítulo 3 – Ligas com Memória de Forma

As Ligas com Memória de Forma (SMA - *Shape Memory Alloy*) são materiais metálicos que apresentam comportamento termomecânico complexo e propriedades singulares. Essas características das SMAs ocorrem devido às transformações de fase martensíticas, que, para tais ligas, podem ser induzidas por temperatura e/ou tensão mecânica. Por possuírem tais características, essas ligas têm sido pesquisadas e utilizadas ao longo de décadas. O presente capítulo será dividido nas seguintes partes: aspectos gerais sobre as SMAs; comportamento termomecânico; e modelagem matemática.

### 3.1 Aspectos gerais sobre SMAs

As primeiras ligas com memória de forma (SMAs), formadas por Au-Cd, foram desenvolvidas na década de 1930, entretanto, sem atrair muita atenção de pesquisadores e engenheiros neste primeiro estágio de desenvolvimento. No início da década de 1960, o efeito memória de forma, caracterizado pela “memória” de um formato original não-deformado após um tratamento termomecânico apropriado, foi descoberto também para ligas NiTi, que logo se tornaram populares, tanto pela massiva publicidade dada pelo laboratório norte-americano Naval Ordnance Laboratory, quanto pelas suas propriedades mecânicas, satisfatórias para diversas aplicações naquele momento.

Apesar de tal interesse inicial a respeito das SMAs, a análise dos fenômenos que ocorrem nessas ligas e os processos de transformação de fase martensítica responsáveis por tais fenômenos ainda apresentam lacunas e, portanto, têm sido intensamente estudados, desde a década de 1970, através de extensas pesquisas nessa área (Lexcelent, 2013; Otsuka e Ren, 2005).

As ligas de NiTi são, até à atualidade, as ligas com memória de forma de maior interesse comercial e de aplicações, devido a essas características singulares, possibilitando diversas aplicações. Algumas propriedades das ligas de NiTi podem ser observadas através de um diagrama de fases de equilíbrio do sistema NiTi, como mostrado na Figura 3.1.1 e de um gráfico que mostra a relação da temperatura inicial de transformação martensítica,  $M_s$ , e o teor de níquel, mostrado na Figura 3.1.2.

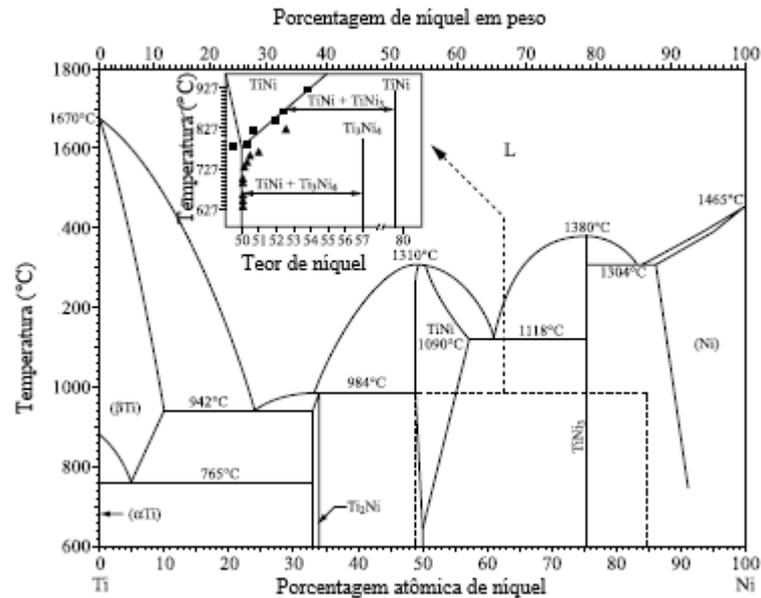


Figura 3.1.1 – Diagrama de fases de equilíbrio do sistema NiTi (Adaptado de Lexcellent, 2013).

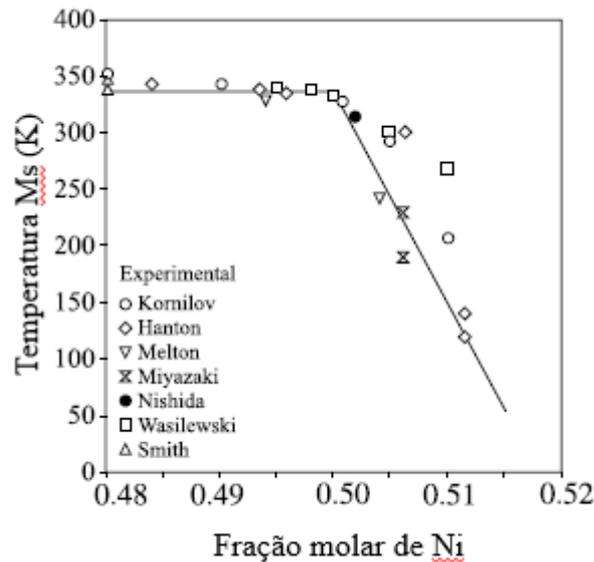


Figura 3.1.2 – Relação da temperatura inicial de transformação martensítica,  $M_s$ , e o teor de níquel (Adaptado de Lexcellent, 2013).

A Figura 3.1.2 mostra que a temperatura  $M_s$  máxima no sistema NiTi é próxima de 70°C e que essa temperatura praticamente independe da composição, para ligas com composição entre 48 e 50% de Ni. Além disso, resta evidente que um pequeno aumento no teor de Ni causa a diminuição de  $M_s$ , para ligas com composição acima de 50%. Segundo Lexcellent (2013), tal fenômeno é explicado pela presença de um domínio bi-fásico de  $Ti_2Ni + \beta$ , com uma concentração dessa fase  $\beta$  que se mantém equiatômica, no caso de ligas com concentração abaixo de 50% de Ni, como mostrado na Figura 3.2.1.

Ademais, o mesmo cita que, para ligas com concentração acima de 50%, é necessário realizar um tratamento térmico, mantendo por período prolongado a liga a 600 °C, a partir do domínio dessa fase  $\beta$ , de modo a permitir a precipitação de  $TiNi_3$  ou  $Ti_2Ni_3$ , o que diminui o teor de níquel da fase  $\beta$ , aumentando a temperatura de transformação, como mostrado na Figura 3.1.1.

As ligas de NiTi também podem apresentar uma fase intermediária, formada através de resfriamento, antes da transformação martensítica. Essa fase intermediária é comumente conhecida como fase *R*, que costuma ser deletéria para a maior parte das aplicações, pois sua transformação concorre com a transformação martensítica e ainda apresenta pequenos laço de histerese e efeito memória de forma (Lexcellent, 2013; Otsuka e Ren, 2005).

O complexo comportamento termomecânico das SMAs, devido às transformações microestruturais que essas ligas são sujeitadas, possibilita suas características funcionais. Ressalta-se que tais características funcionais justificam a posição dessas ligas como um dos *materiais inteligentes* de maior interesse no ramo acadêmico e em diversas indústrias nas últimas décadas.

## 3.2 Comportamento termomecânico

Os principais fenômenos de interesse que as ligas com memória de forma apresentam são o efeito memória de forma e a pseudoelasticidade, que se relacionam à transformação de fase martensítica. Essas ligas apresentam duas fases: a austenítica e martensítica. Suas frações volumétricas dependem da temperatura e do estado de tensões ao qual a amostra está submetida.

### 3.2.1 Efeito Memória de Forma

O efeito memória de forma acontece quando a liga está submetida a temperaturas inferiores à de formação da martensita. Neste efeito, a martensita induzida por temperatura (martensita maclada) experimenta transformação de fase, tornando-se martensita não-maclada, ou induzida por tensão, do ponto A até o B, na Figura 3.2.1. Após a retirada do carregamento, a martensita induzida por tensão é estável. Por isso, há uma deformação residual no ponto C. É necessário aquecer o material até à temperatura de austenitização para recuperar a deformação residual e retornar a forma original.

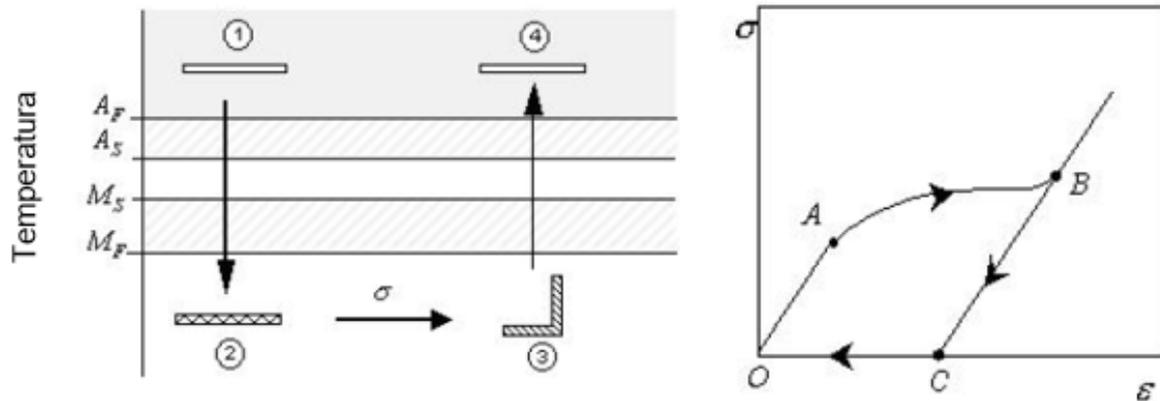


Figura 3.2.1 – Efeito Memória de Forma (Adaptado de Pereira, 2009).

Logo, algumas das principais aplicações bem-sucedidas do efeito memória de forma são relacionadas a atuadores, pois, para recuperar o estado inicial do elemento de SMA, é necessário apenas aquecê-lo a uma temperatura na faixa de 30 a 60 °C, ou seja, temperaturas relativamente baixas. Outras aplicações típicas do efeito memória de forma são elementos sensores, por exemplo detectores de fumaça e conectores de tubulações.

### 3.2.2 Efeito Pseudoelástico

O efeito pseudoelástico acontece quando a liga está em uma temperatura acima da sua temperatura de austenitização, portanto apresentando a fase austenítica estável. Considerando esta temperatura constante, este efeito ocorrerá caso a tensão a qual o material está submetido alcance a tensão crítica característica da liga para a transformação martensítica. A martensita gerada por esta transformação é induzida pela tensão mecânica e torna-se instável quando o carregamento é retirado, retornando ao estado austenítico original. Um esquema deste efeito será mostrado na Figura 3.2.2.

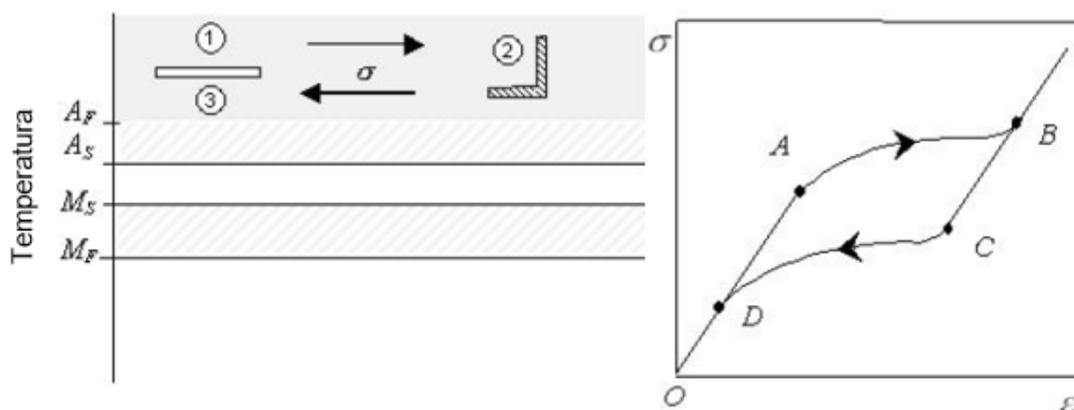


Figura 3.2.2 – Comportamento Pseudoelástico Induzido por Tensão (Adaptado de Pereira, 2009).

O fenômeno físico da pseudoelasticidade é relacionado, portanto, às transformações direta e reversa sob influência de tensão. Como os caminhos  $A \rightarrow B$  e  $C \rightarrow D$ , exemplificados na Figura 3.2.2, não são os mesmos, o comportamento é tipicamente histerético (Lexcelent, 2013; Lagoudas, 2008). A pseudoelasticidade, em decorrência de suas características, como exemplos a absorção de energia pela formação do laço de histerese e pela possibilidade de recuperação total de deformação, permite a aplicação das SMAs em diversas aplicações, por exemplo: absorvedores de vibrações, que podem ser projetados para apresentar deformação que possibilite a transformação de fase martensítica induzida por tensão; fios ortodônticos, que tipicamente apresentam um platô de tensão durante a transformação direta, exercem assim uma força constante nos dentes; e em armações de óculos, que após serem deformadas, retornam a sua forma original pela simples retirada do carregamento.

### 3.3 Modelagem matemática

Devido ao grande interesse pelas potencialidades únicas das ligas com memória de forma, que derivam de seu complexo comportamento termomecânico, há um crescente interesse pelo desenvolvimento de modelos matemáticos capazes de descrever as principais características dessas ligas. Segundo Paiva (2000), esse comportamento termomecânico das SMAs pode ser modelado de duas maneiras principais, ou seja, sob perspectivas microscópica e macroscópica. A abordagem macroscópica, aqui discutida, se interessa pelas características fenomenológicas das ligas com memória de forma.

O modelo de Auricchio e Petrini (2004), que explora conceitos da teoria da elastoplasticidade, foi aqui adotado por ser o modelo constitutivo implementado no *software* comercial de análise pelo método de elementos finitos ANSYS, que será empregado nas simulações numéricas a serem realizadas. De acordo com Ansys Inc. (2017) e Silva (2016), esse modelo é desenvolvido a partir da teoria do potencial para a energia livre de Helmholtz:

$$\psi(\varepsilon, \varepsilon_{tr}, T) = \frac{1}{2}E(\varepsilon - \varepsilon_{tr})^2 + \beta\langle T - M_f \rangle \|\varepsilon'_{tr}\| + \frac{1}{2}h\|\varepsilon'_{tr}\|^2 + I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr}) \quad (3.1)$$

sendo  $E$  o tensor de tensão elástico do material,  $\varepsilon$  a deformação total,  $\varepsilon_{tr}$  a deformação de transformação total,  $\varepsilon'_{tr}$  a deformação de transformação deviatória,  $\beta$  é um parâmetro do material,  $T$  é a temperatura,  $M_f$  é a temperatura abaixo da qual a austenita não é observada em um estado livre de tensões,  $h$  é um parâmetro do material relacionado ao endurecimento do material durante a transformação de fase e  $I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr})$  é uma função introduzida para satisfazer a restrição na norma de transformação definida como:

$$I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr}) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \|\varepsilon'_{tr}\| \leq \bar{\varepsilon}_L \\ +\infty & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

Auricchio e Petrini (2004) e Ansys Inc. (2017) mostram que:

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon} = E(\varepsilon - \varepsilon_{tr}) \\ X_{tr} &= -\frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon'_{tr}} = S - [\beta \langle T - M_f \rangle + h \|\varepsilon'_{tr}\| + \gamma] \frac{\varepsilon'_{tr}}{\|\varepsilon'_{tr}\|} \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que  $S$  é a tensão deviatória e  $\gamma$  é uma função definida como:

$$I_{\varepsilon'_{tr}}(\varepsilon'_{tr}) = \begin{cases} 0 & 0 \leq \|\varepsilon'_{tr}\| < \bar{\varepsilon}_L \\ \geq 0 & \|\varepsilon'_{tr}\| = \bar{\varepsilon}_L \end{cases} \quad (3.4)$$

sendo  $\bar{\varepsilon}_L$  a máxima deformação de transformação.

De acordo com Ansys Inc. (2017), diversos testes experimentais mostram um comportamento assimétrico das SMAs em tração e compressão, o que sugere descrever essas ligas como um material isotrópico com uma superfície limite do tipo Prager-Lode. Portanto, assume-se a seguinte função:

$$F(X_{tr}) = \sqrt{2J_2} + m \frac{J_3}{J_2} - R \quad (3.5)$$

onde  $X_{tr}$  é a tensão de transformação,  $J_2$  e  $J_3$ , são, respectivamente, o segundo e terceiro invariantes da tensão de transformação,  $m$  é um parâmetro do material associado com a dependência de Lode, e  $R$  é o raio do domínio elástico. A evolução da deformação de transformação de fase é dada por:

$$\dot{\varepsilon}_{tr} = \dot{\xi} \bar{\varepsilon}_L \frac{\partial F}{\partial \sigma} \quad (3.6)$$

onde  $\xi$  é uma variável interna denominada multiplicador de deformação de transformação. Segundo Auricchio e Petrini (2004) e Ansys Inc. (2017),  $\xi$  e  $F(X_{tr})$  devem obedecer às condições de Kuhn-Tucker, estas definidas por:

$$\dot{\xi} \geq 0 \quad (3.7)$$

$$\xi F(X_{tr}) = 0$$

Tipicamente, os módulos elásticos da austenita e da martensita são diferentes. Logo, nota-se que durante a transformação de fase, o tensor de rigidez elástico,  $E$ , varia com a deformação. A

equação que define esse tensor de rigidez elástico como função da deformação de transformação,  $\varepsilon_{tr}$ .  $E_A$  é o tensor de rigidez elástico da austenita e  $E_M$ , o da martensita:

$$E = \frac{\|\varepsilon'_{tr}\|}{\varepsilon_L} (E_M - E_A) + E_A \quad (3.8)$$

O coeficiente de Poisson da austenita e da martensita é considerado igual nesta modelagem.

### 3.3.1 Parâmetros do Modelo de Auricchio e Petrini

É necessário determinar parâmetros da liga com memória de forma em estudo para implementar o modelo no software Ansys 18.1. Uma característica que faz esse modelo de Auricchio e Petrini (2004) ser de grande utilidade é fato de ele permitir simular tanto o comportamento pseudoelástico, quanto o fenômeno da memória de forma, através da definição de sete parâmetros distintos (Averbug, G.G. 2016):

- $h$  – Coeficiente de endurecimento. É o coeficiente angular da curva tensão-deformação durante a transformação de fase direta e reversa. Unidade: Pascal (Pa).
- $T_0$  – Temperatura de referência em um estado livre de tensões aplicadas. Unidade: Kelvin (K).
- $R$  – Raio do domínio elástico. Representa metade da altura do laço de histerese. Unidade: Pascal (Pa).
- $\beta$  – Fator de dependência da tensão com a temperatura. É o coeficiente angular da curva tensão-temperatura, modelada como uma reta. Unidade: Pascal sobre Kelvin (Pa/K).
- $\varepsilon_L$  – Deformação máxima atingida ao final da transformação de fase. Unidade: adimensional.
- $E_M$  – Módulo de elasticidade da martensita. Unidade: Pascal (Pa).
- $m$  – Parâmetro de dependência de Lode. Indica a simetria ou assimetria entre as tensões características trativas e compressivas das SMAs. Unidade: adimensional.

A Figura 3.3.1 mostra uma representação gráfica dos parâmetros do modelo de Auricchio e Petrini (2004), que tem como grande característica considerar a variação do módulo de elasticidade devido à transformação de fase.

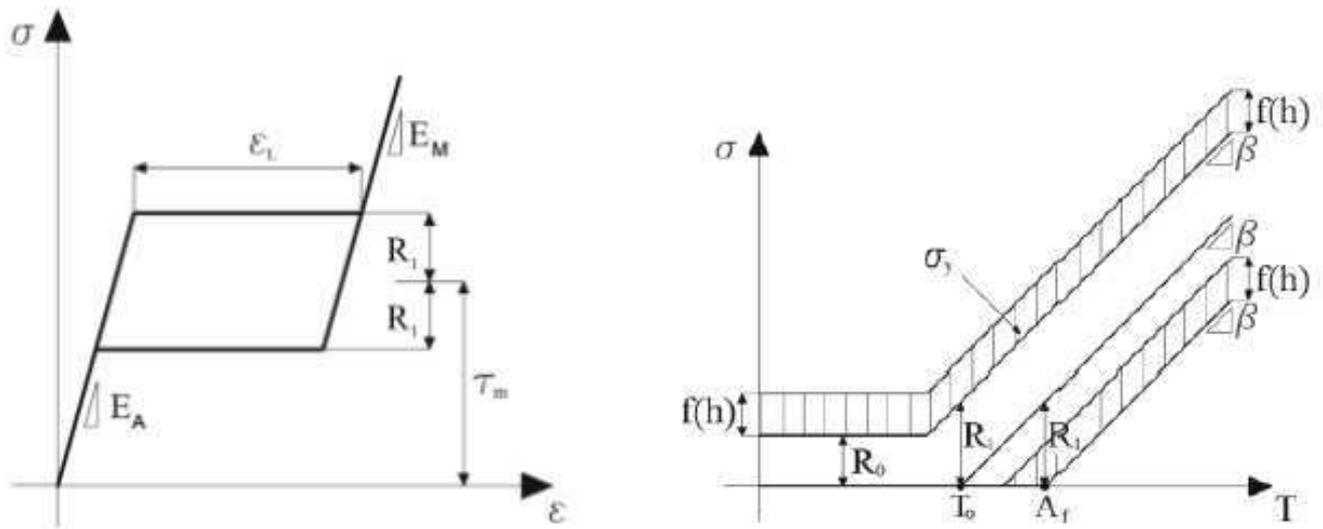


Figura 3.3.1 –Representação gráfica dos parâmetros do modelo de Auricchio e Petri (2004)  
(Averbug, G.G. 2016).

## **Capítulo 4 – Buscas por patentes relacionadas às Ligas com Memória de Forma**

O presente capítulo trata do estado da técnica relacionado às ligas com memória de forma. Serão discutidas algumas aplicações dessas ligas, através de uma busca em bancos de dados gratuitos de patentes, como o Lens, PatentScope e o portal do INPI (Instituto Nacional da Propriedade Industrial). Ademais, são feitos comentários a respeito da pesquisa sobre SMA, ressaltando os resultados obtidos pela comunidade acadêmica às aplicações encontradas nessa busca.

De modo a auxiliar o entendimento sobre os critérios adotados na presente busca por documentos patentários, o Anexo 1 (adaptado de World Intellectual Property Organization - WIPO, 2017a) mostra uma tabela contendo explicações sobre as classificações internacionais de patentes citadas no presente trabalho.

### **4.1 Aspectos gerais sobre o estado da técnica relacionado a SMAs**

Na presente seção, o estado da técnica relacionado às ligas com memória de forma é discutido através de um breve histórico a respeito das ligas com memória de forma documentos acadêmicos e de uma busca por documentos patentários.

#### **4.1.1 Breve histórico a respeito da pesquisa acadêmica sobre SMAs**

A década de 1990 foi de grande importância para o desenvolvimento técnico-científico das ligas com memória de forma. Por exemplo, durante essa década foram massivamente publicados documentos científicos sobre as SMAs, possibilitando um suficiente entendimento do comportamento dessas ligas.

Por exemplo, o fenômeno denominado efeito memória de forma reversível, que é alcançado após submeter o material a processo de treinamento que permite associar uma forma a cada fase, foi intensamente estudado nessa década (Zhang *et al.*, 1991, Hebda e White, 1995, Zhang *et al.*, 1997, Goo e LExcellent, 1997 e Prader e Kneissl, 1997 apud Paiva, 2000).

Da mesma forma, o entendimento de que essas ligas apresentam diferentes propriedades mecânicas em função de sua microestrutura e que alterações em sua composição química influenciam as temperaturas inicial e final de transformação de fase, o que é fundamental para as aplicações práticas das SMAs, também foi alcançado em um período próximo a essa década (Lei e Wu, 1991 e Funakubo, 1987 apud Paiva, 2000).

De fundamental importância para a área de projetos, o que também propicia um aumento no interesse em utilizar essas ligas em aplicações práticas, diversos trabalhos referentes à modelagem constitutiva das SMAs foram publicados a partir da década de 1990, o que permitiu uma melhor compreensão do comportamento termomecânico dessas ligas a partir de então.

Por exemplo, alguns dos modelos publicados nessa década são: o modelo polinomial de Falk (1990), baseado na teoria de Devonshire; os modelos baseados em plasticidade, como Silva (1995), Souza *et al.* (1998), Motta *et al.* (1999), Auricchio e Lubliner (1997), Auricchio *et al.* (1997), Auricchio e Sacco (1997). Alguns modelos com restrições internas também datam desse período, como Fremond (1996) e Savi e Braga (1993).

Os modelos com cinética de transformação assumida, ou seja, aqueles que consideram que a transformação de fase é regida por uma função conhecida, tornaram-se muito populares e muitos datam do mesmo período. Pelo fato de esses modelos terem sido extensamente comprovados através de experimentos, eles ocupam, desde suas publicações, um importante espaço na modelagem das SMAs (Tanaka e Nagaki, 1982, Liang e Rogers, 1990, Brinson, 1993, Ivshin e Pence, 1994 e Boyd e Lagoudas, 1996 apud Paiva, 2000).

#### **4.1.2 Busca inicial por documentos patentários sobre SMAs**

A estratégia da busca inicial por documentos patentários concentrou-se nos documentos depositados em mais de cem escritórios nacionais de patentes de todo o mundo que apresentassem em seu texto integral, por exemplo, os termos *shape memory alloy*, *nitinol*, *memory metal*, *memory alloy* entre outros.

A partir dessa busca, verificou-se que o número de publicações de documentos patentários a respeito das SMAs começou a crescer em torno da década de 1990 e vem crescendo desde então: por exemplo, no ano de 1990, foram publicados 696 documentos relacionados às SMAs e, em 2016, foram publicados 11.213 documentos, o que representa uma variação de mais de 1500% nesse período (Lens, 2017a).

A presente busca inicial por documentos patentários relacionados a ligas com memória de forma, revela que a partir da década de 2000 o número de documentos patentários vem aumentando de modo substancial. Tal fato pode evidenciar o alcance de uma certa maturidade no interesse da indústria por essas ligas. Concomitantemente, as pesquisas acadêmicas de diversas naturezas – metalurgia, comportamento termomecânico, modelagem e simulação – propiciaram um maior entendimento das diversas características e propriedades das SMAs, que não são encontradas em materiais convencionais.

Ainda, através dessa busca inicial, nota-se que existe um grande interesse de empresas da área de saúde e biomedicina pelas ligas com memória de forma. Algumas das características que possibilitam inúmeras aplicações variadas nessa área são: a biocompatibilidade, resistência a corrosão e temperaturas de transformação relativamente baixas, o que possibilita que essas transformações de fase ocorram dentro de organismos biológicos, por exemplo, no corpo humano.

Identificou-se que as ligas com memória de forma são um dos principais tipos de *materiais inteligentes* e têm grande interesse da indústria e da academia, pois possuem características e propriedades únicas, que possibilitam aplicações práticas que não são, muitas vezes, realizáveis com materiais convencionais, ou quando o são, não têm o mesmo desempenho que as SMAs.

De forma a medir o interesse da indústria por tais *materiais inteligentes*, fez-se uma análise comparativa da quantidade de documentos patentários publicados por ano para os principais tipos de *materiais inteligentes*, a saber, piezoelétricos, fluidos magneto-reológicos, materiais magnetostrictivos e ligas com memória de forma, de acordo com Soh *et al.*, 2012 e Savi e Steffen, 2012.

A Figura 4.1.1 mostra a quantidade de documentos patentários publicados por ano para cada um desses tipos de materiais inteligentes entre os anos de 2007 e 2016. Constata-se que dentre esses materiais, aquele com o maior número de documentos patentários publicados dentro do período analisado são os materiais piezoelétricos (235.852 documentos), seguidos das ligas com memória de forma (85.670 documentos), dos materiais magneto-strictivos (19.053 documentos) e dos fluidos magneto-reológicos (2933 documentos), respectivamente. Nota-se, por exemplo, que entre os anos de 2014 e 2016, aproximadamente 10.000 documentos patentários relacionados a SMAs foram publicados a cada ano em todo mundo.

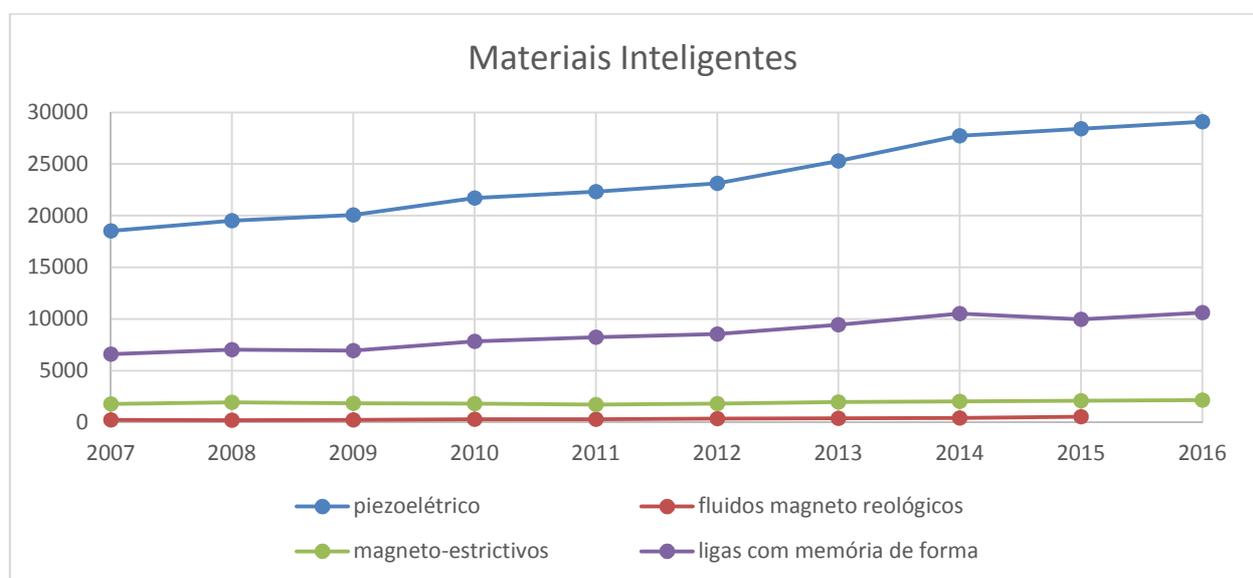


Figura 4.1.1 – Materiais Inteligentes: documentos patentários publicados por ano (adaptado de Lens, 2017a).

Apesar de possuírem desvantagens, como alto custo de produção e difícil controle de composição química, é possível notar que há um intenso interesse pelas ligas com memória de forma, como evidenciado nas buscas por documentos patentários realizadas. Nota-se que o contexto tecnológico atual propicia um terreno fértil para invenções e inovações relacionadas aos materiais e estruturas inteligentes.

## 4.2 Busca por Documentos Patentários mais relevantes

Embora seja possível identificar algumas tendências, como o aumento do interesse da indústria por uma determinada tecnologia, através de uma busca por termos presentes em todo o texto integral de documentos patentários, como aquela busca revelada na seção 4.1.2, a determinação de documentos relevantes de uma dada tecnologia muitas vezes requer uma estratégia de busca mais eficiente.

Uma estratégia comumente empregada para identificar tais documentos relevantes é restringir a busca ao título, resumo ou às reivindicações. Essa estratégia foi adotada no presente trabalho e conduziu aos resultados que serão mostrados e discutidos a seguir.

### 4.2.1 Estratégia de busca e resultados

Termos como *shape memory alloy*, *nitinol*, *memory metal* e *memory alloy* foram buscados no título, resumo ou nas reivindicações dos documentos patentários. A Figura 4.2.1 mostra a quantidade de documentos publicados que contenham esses termos nessas partes dos documentos patentários.

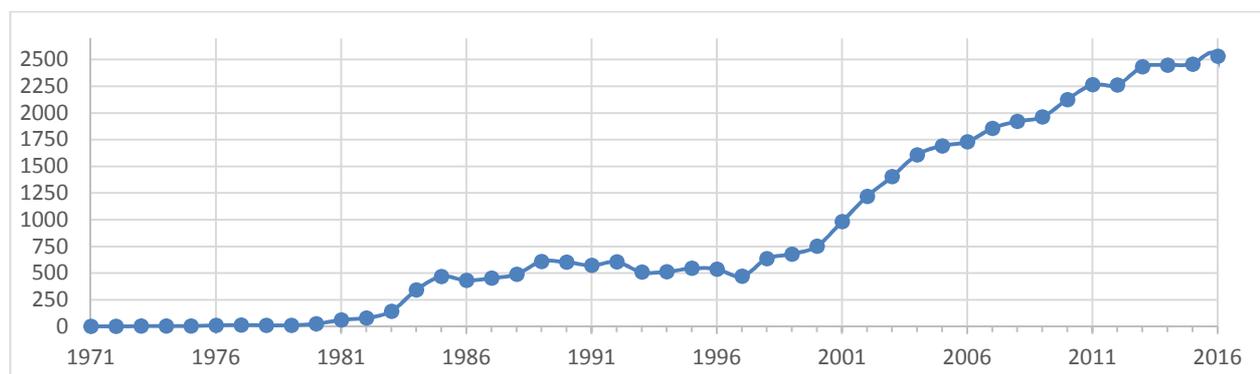


Figura 4.2.1 – Número de documentos publicados contendo os termos de interesse no título, resumo ou reivindicações por ano (adaptado de Lens, 2017b).

Apesar de o número de documentos encontrados ser menor que aquele apresentado na busca em todo o texto dos documentos patentários, apresentada na seção 4.1, a tendência de crescimento é

a mesma, indicando um interesse maior dos agentes econômicos da indústria em não apenas revelar o conhecimento técnico sobre as ligas com memória de forma, mas também em reivindicar a exclusividade das tecnologias desenvolvidas com tais materiais.

A título exemplificativo, da Figura 4.2.1, depreende-se que, em 1990, foram publicados 602 documentos relevantes. Foram divulgados 751 desses documentos em 2000; 2.117 documentos no ano de 2010; e 2.525 documentos no ano de 2016. Portanto, evidencia-se um crescimento de 319% entre os anos de 1990 e 2016, o que representa esse aumento no interesse da indústria pelas ligas com memória de forma, aqui associado com o concomitante aumento do conhecimento técnico-científico sobre tais ligas metálicas.

As estatísticas referentes aos dez maiores depositantes também apresentam a mesma tendência geral apontada na seção 4.1, ou seja, o predomínio de empresas da área de saúde, como Boston Scientific Scimed, Scimed Life Systems, Cook Inc e Medtronic, porém a presença de empresas de outros ramos tecnológicos é fortemente notada, como pode ser visto na Figura 4.2.2.

Por exemplo, a empresa com o maior número de documentos contendo os termos de interesse no título, resumo ou reivindicações foi a GM Global Technology Operations, do setor automobilístico, apresentando 643 documentos. Empresas do setor eletro-eletrônico, como Matsushita Electric, Hitachi e Furukawa Electric e a Boeing, do setor aeroespacial também figuram entre os dez maiores depositantes desses documentos de interesse apontados.

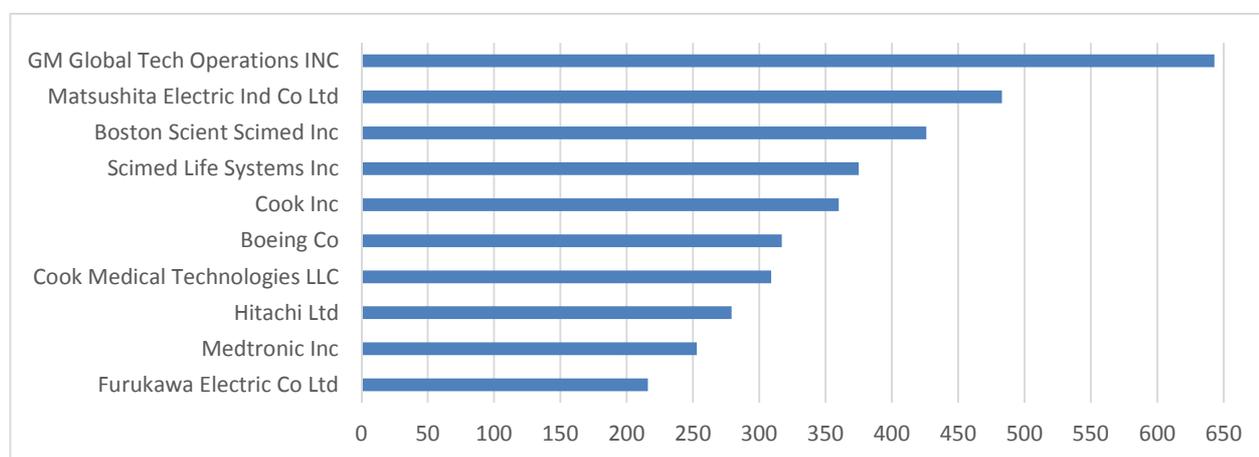


Figura 4.2.2 – Dez maiores depositantes de documentos contendo os termos de interesse no título, resumo ou reivindicações (adaptado de Lens, 2017b).

A Figura 4.2.3 mostra as jurisdições com maior quantidade de documentos relevantes. Esta análise por jurisdições com maior quantidade de pedidos de patentes busca apontar as regiões que possuem maior interesse de proteção por parte dos agentes econômicos. Assim, verifica-se que o país com maior número de depósitos de documentos relevantes foi os Estados Unidos, com 16.206 documentos, seguido pelo Japão, com 7.144 documentos, a China, com 4.642, assim como há 3.136

desses documentos no Escritório Europeu de Patentes. Além disso, há 5.629 pedidos depositados via PCT (*Patent Cooperation Treaty* – Tratado de Cooperação em Matéria de Patentes) entre esses documentos relevantes. Isso evidencia, por exemplo, o grande interesse em proteger tecnologias associadas às SMAs nas principais economias globais.

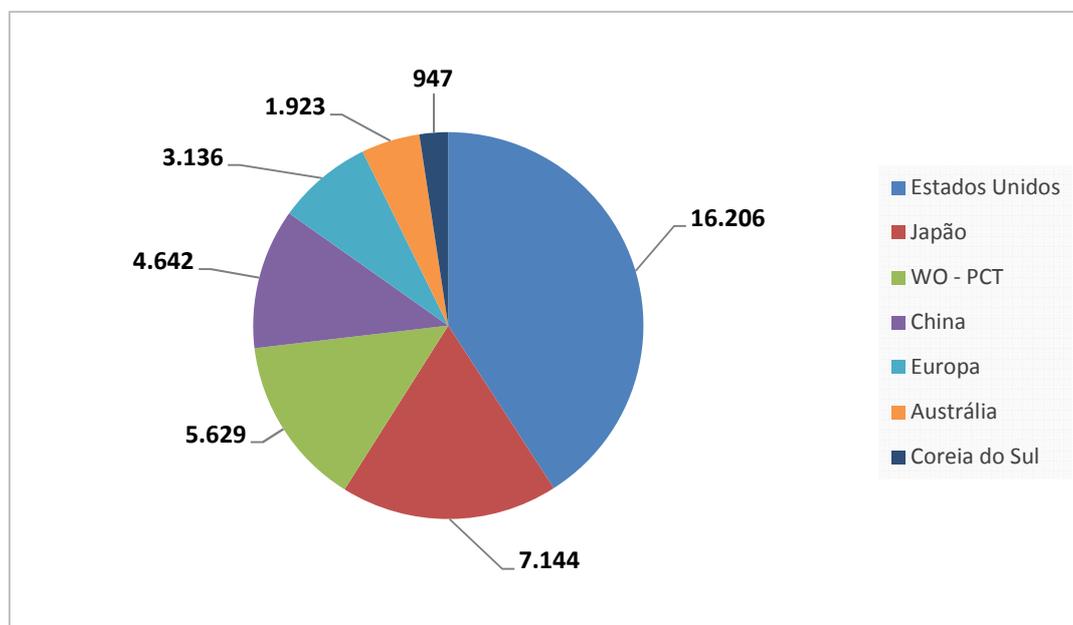


Figura 4.2.3 – Jurisdições com maiores números de documentos relevantes (adaptado de Lens, 2017b).

De modo a investigar em quais países mais se produz informação tecnológica a respeito das ligas com memória de forma, determinou-se a origem dos depositantes dos pedidos de patentes sobre tais ligas. A Figura 4.2.4 mostra a quantidade de pedidos depositados por nacionais de países selecionados.

Constata-se que 13.415 pedidos de patente em todo o mundo têm depositantes de origem norte-americana, 7.330 de origem japonesa, 2.987 de origem chinesa, 1.851 de origem alemã, 1.153 de origem sul-coreana e 239 de origem australiana. Na América Latina, o Brasil é líder nesse quesito, com 36 pedidos de patente com depositantes nacionais, seguido da Argentina (33 pedidos) e da Bolívia (16 pedidos). Entretanto, entre os BRICS (Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul), o país é o penúltimo, a frente apenas da África do Sul (14 pedidos) – dentro desse grupo, a líder é a China (citada anteriormente), seguida da Rússia (61 pedidos) e da Índia (58 pedidos).

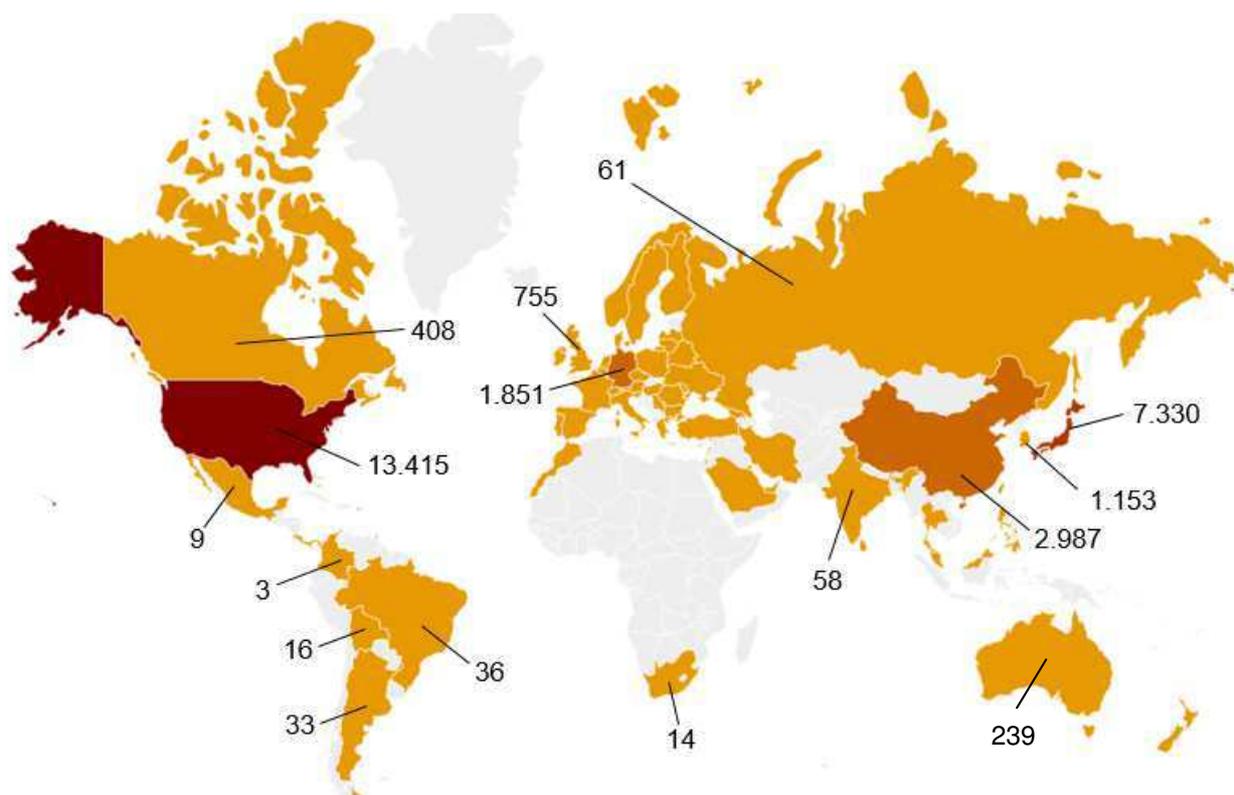


Figura 4.2.4 – Pedidos por origem do depositante (adaptado de Patent Inspiration, 2017).

A Figura 4.2.5 mostra as dez classificações internacionais de patentes com maior quantidade de documentos relevantes. A partir dessa figura, também nota-se o predomínio de tecnologias referentes às ligas com memória de forma na área de saúde, como instrumentos cirúrgicos e dispositivos e métodos associados (classe A61B17), filtros implantáveis em vasos sanguíneos, próteses e dispositivos para impedir o colapso de estruturas tubulares do corpo, por exemplo *stents* (classe A61F2) e catéteres (classe A61M25).

Através dessa busca nota-se que outras aplicações de grande relevância das SMAs são dispositivos mecânicos que utilizam a expansão ou contração de corpos devido ao aquecimento, arrefecimento, umedecimento, secagem ou similar (classe F03G7) e documentos relacionados à alterações da estrutura física de metais não ferrosos ou ligas por tratamento térmico ou por trabalho a quente ou a frio (classe C22F1).

As necessidades intrínsecas desses ramos de maior interesse, aqui determinados através das classificações internacionais de patentes com maior número de documentos relevantes, refletem as principais características e propriedades das ligas com memória de forma, ou seja, a biocompatibilidade, resistência à corrosão, e o retorno a um determinado formato após um tratamento termomecânico adequado.

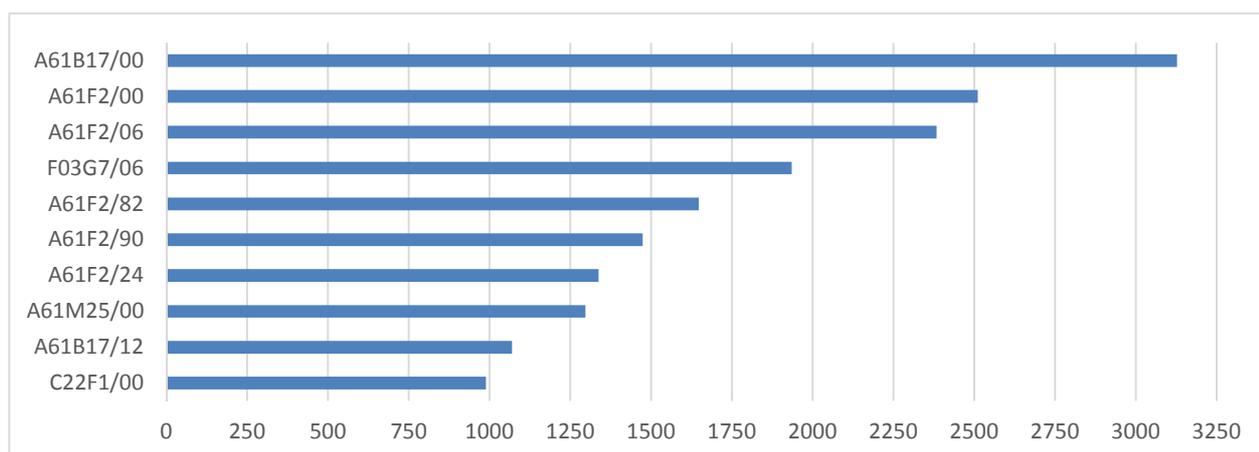


Figura 4.2.5 – Dez classificações internacionais de patentes com maior número de documentos relevantes (adaptado de Lens, 2017b).

## 4.2.2 Exemplos de aplicações por ramos de atividade

De modo a ilustrar a tecnologia desenvolvida com as ligas com memória de forma, serão apresentados exemplos de aplicações envolvendo tais ligas nos ramos de atividade de biomedicina, aeroespacial, automobilístico e de construção civil através de documentos patentários.

### 4.2.2.1 Biomedicina

As principais características das ligas com memória de forma que possibilitam o seu uso em aplicações em biomedicina são a biocompatibilidade, resistência à corrosão e a faixa de temperatura de transformação ser tipicamente próxima da temperatura do corpo humano. Algumas aplicações típicas dessas ligas nesse ramo são dispositivos cardiovasculares, ortopédicos e cirúrgicos.

McHugo (2016), na patente US 9,387,099 (B2), revela um stent auto-expansível helicoidal não-tecido com fios de liga de memória de forma para implantação, por exemplo, no sistema gastrointestinal, como mostrado na Figura 4.2.6, e um método de fabricação eficiente do mesmo, mantendo as vantagens das estruturas desse tipo de stent. O stent possui um primeiro fio helicoidal (item 102), de formato configurado, e um segundo fio helicoidal (item 104), de formato ajustado. O primeiro fio (item 102) e o segundo fio (item 104) não são tecidos ou trançados em conjunto como com stents de fio tradicionais. Em vez disso, o primeiro fio (item 102) e o segundo fio (item 104) são cada um configurados em um padrão helicoidal, e o segundo fio (item 104) é colocado sobre o primeiro fio (item 102), em que cada um do primeiro fio (item 102) e do segundo fio (item 104) é esticado mecanicamente de modo a forçar tais fios conjuntamente, para assegurar a estabilidade mecânica do dispositivo.

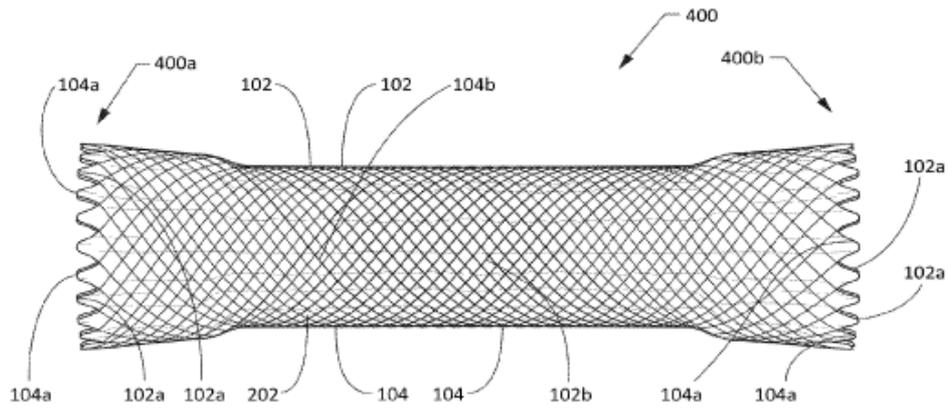


Figura 4.2.6 – Stent auto-expansível helicoidal não-tecido (McHugo, 2016).

Batalu *et al.* (2016), através do pedido de patente de invenção RO 131379 (A0), revelam uma prótese de cotovelo biocompatível de liga NiTi, ilustrada pela Figura 4.2.7, que substitui um cotovelo humano afetado por acidentes ou doenças, revelada pelo pedido de patente. Essa prótese elimina o uso de componentes auxiliares para conectar os componentes do úmero e da ulna em um implante de cotovelo totalmente restringido. A conexão entre os componentes do úmero e da ulna é baseada no efeito memória de forma da liga metálica do componente do úmero, cuja ativação ocorre a uma temperatura ligeiramente inferior à temperatura do corpo humano, entre 30 e 33 °C. Essa conexão alcança duas posições: aberta (antes da conexão) e fechada (após a conexão). A temperatura do corpo humano (aproximadamente 36 °C) ou uma solução salina aquecida ativam esse componente do úmero, que se fecha. Inicialmente, o componente do úmero está aberto, mantido resfriado, entre 1 e 3 °C. O procedimento cirúrgico se inicia com a identificação e dissecação do nervo ulnar seguida da excisão da cabeça radial. As extremidades do úmero e da ulna são preparadas e usinadas de acordo com os componentes escolhidos. Em seguida, os dois componentes são implantados para permitir a integração biológica. Após a implantação, as extremidades dos componentes do úmero da ulna são alinhadas e o acoplamento é aquecido com uma solução salina a uma temperatura entre 38 e 40 °C. O acoplamento é fechado e o cotovelo é movido através da amplitude de movimento total e a estabilidade é verificada. O nervo ulnar é deslocado e a ferida se fecha de maneira usual.

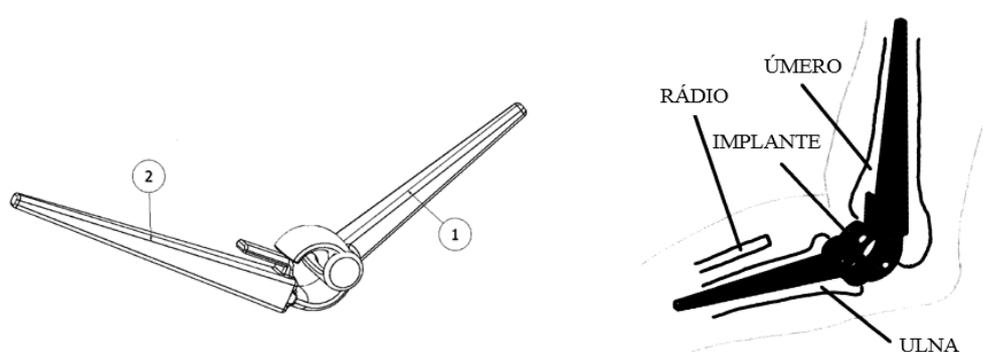


Figura 4.2.7 – Prótese de Cotovelo feita de SMA (adaptado de Batalu *et al.*, 2016).

Suzuki e Hattori (2015), através do pedido de patente de invenção publicado como US 2015/0039008 (A1), revelam um instrumento de sutura, mostrado na Figura 4.2.8, capaz de reduzir o tempo de operação necessário para ligar uma ferida e cauterizar a mesma. Nesse pedido é revelada uma agulha cirúrgica incluindo um elemento de liga com memória de forma treinado para retornar, a uma temperatura igual ou superior ao seu ponto de transformação, à sua forma original. O uso da agulha cirúrgica dessa invenção torna desnecessário empregar uma agulha de sutura roscada, além de encurtar o tempo de operação necessário para ligar uma parte incisada ou uma ferida em um órgão tal como o trato digestivo no corpo ou a pele ou semelhante, permitindo ainda a cauterização da ferida.

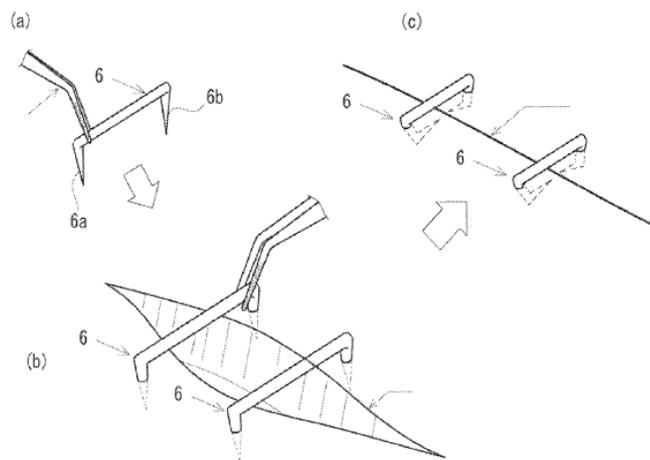


Figura 4.2.8 – Agulha cirúrgica incluindo um elemento de SMA (adaptado de Suzuki e Hattori, 2015).

#### 4.2.2.2 Aeroespacial

Os efeitos memória de forma e pseudoelástico, típicos das ligas com memória de forma, são de grande interesse para a indústria aeroespacial. Algumas aplicações recorrentes das SMAs nesse ramo envolvem, por exemplo, aeronaves de asas fixas, de asas rotativas e naves espaciais.

Lengyel *et al.* (2017), através da patente US 9,631,744 (B2), revelam uma mangueira para reabastecimento em voo, mostrada na Figura 4.2.9, que inclui uma trança interna possuindo fios pseudoelásticos de liga com memória de forma. É mostrado neste documento que esses fios pseudoelásticos são submetidos a transformações de fase induzidas por tensão de modo a absorver energia, amortecendo as oscilações dessa mangueira quando está em operação.

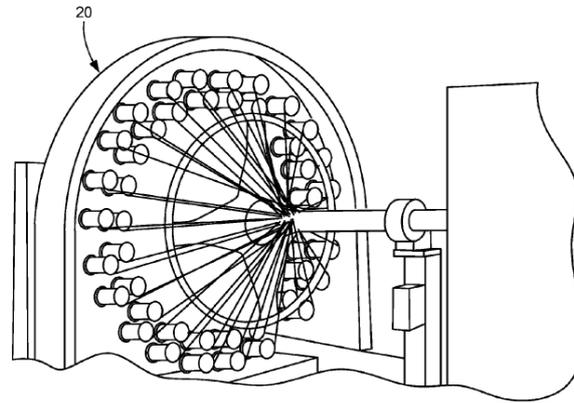


Figura 4.2.9 – Mangueira para reabastecimento em voo (adaptado de Lengyel *et al.*, 2017).

Ung *et al.* (2015), na patente KR 101552053 (B1), mostram um isolador de vibrações disposto entre dispositivos de montagem e a estrutura hospedeira para proteger equipamentos frágeis sujeitos a vibração e choque, por exemplo em aeronaves, veículos de lançamento e satélites. A Figura 4.2.10 mostra esse isolador de vibrações compreendendo um elemento circular de SMA (item 10), inserido entre elementos de retenção superior e inferior (itens 20 e 30).

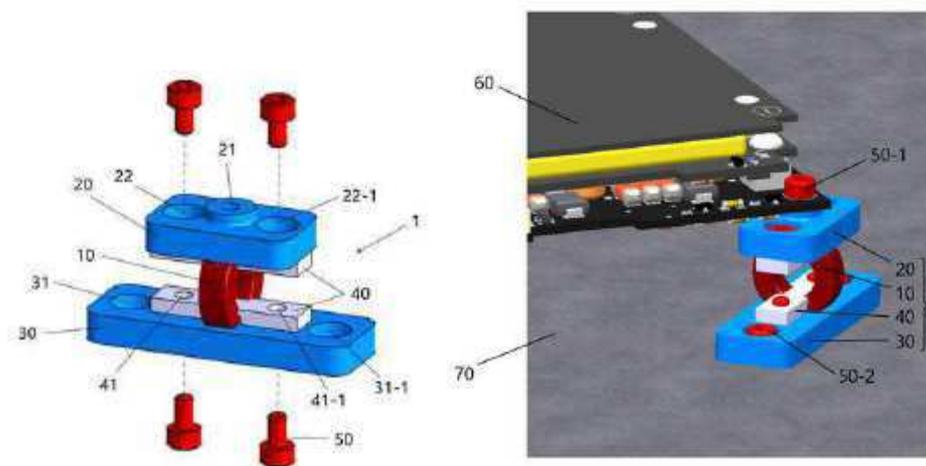


Figura 4.2.10 – Isolador de Vibrações (Ung *et al.*, 2015).

Lyn *et al.* (2013), no pedido de patente EP 2664537 (A2), revelam um sistema para modificar o formato de uma longarina estrutural. Neste documento, é citado que tais longarinas estruturais são usadas em asas de aviões e pás de rotor para enrijecer e moldar estruturas. Além disso, sistemas de atuação mecânicos e/ou elétricos complexos são comumente empregados para modificar o formato dessas estruturas, porém apresentam como desvantagens as dimensões e o peso. O sistema revelado nesse documento, ilustrado na Figura 4.2.11, objetiva superar essas desvantagens e inclui uma pluralidade de tiras estruturais adjacentes (itens 52, 54) alinhadas axialmente para formar a longarina estrutural (item 44). Ainda, é revelado que pelo menos uma das tiras estruturais é feita de liga com memória de forma. Tal sistema também inclui um sistema de controle de temperatura (item 56) para

controlar uma temperatura das tiras de liga de memória de forma (item 54). O calor aplicado às tiras faz com que a longarina estrutural (item 44) se torça ou se dobre, aplicando assim o efeito memória de forma das SMAs.

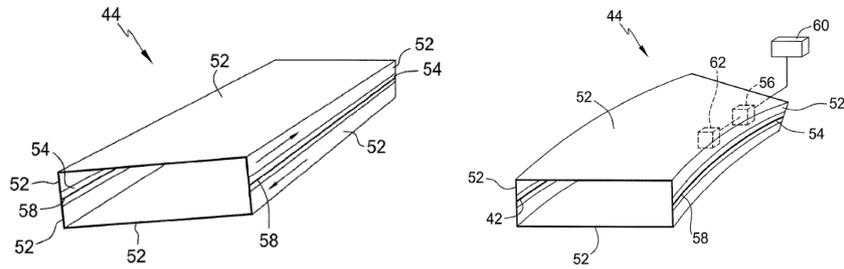


Figura 4.2.11 – Sistema para modificar o formato de uma longarina estrutural (Lyn *et al.*, 2013).

### 4.2.2.3 Automobilístico

As principais aplicações das ligas com memória de forma na indústria automobilística são em sensores e atuadores. Cabe ressaltar que nos veículos modernos, a quantidade desses componentes vem aumentando consideravelmente, o que possibilita maior conforto e eficiência no uso de tais veículos.

Riley *et al.* (2013), mostram, na patente US 8,434,436 (B2), um conjunto de válvula acionado eletronicamente para um motor de combustão interna, mostrado na Figura 4.2.12, em que tal conjunto de válvula (item 500) compreende uma haste e uma pluralidade de segmentos de liga de memória de forma (itens 502, 504, 506) em comunicação operacional com a haste de válvula, em que cada segmento de liga de memória de forma é acionável individualmente, e a atuação dos diferentes segmentos de SMA causa diferentes elevações das válvulas. Segundo o documento, esse conjunto de válvula, que ocupa um menor espaço do que os atuadores hidráulicos e eletromagnéticos, gera uma melhoria na eficiência e desempenho do motor de combustão interna.

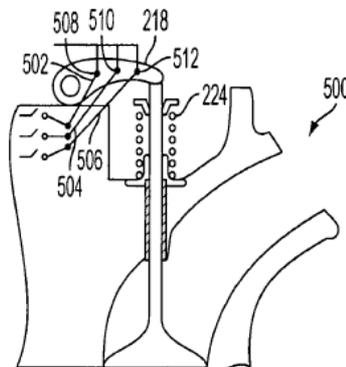


Figura 4.2.12 – Conjunto de válvula acionado eletronicamente para um motor de combustão interna (Riley *et al.*, 2013).

Bae (2013), revela, através do pedido de patente de invenção KR 20130026875 (A), um dispositivo de aleta de ar para um veículo, ilustrado na Figura 4.2.13, com o intuito de evitar que um motor se sobreaqueça. Tal dispositivo (item 1) compreende um elemento elástico (item 10) e uma unidade de abertura e fechamento (item 100). O elemento elástico está ligado a uma resistência (item 20) disposta em um ventilador de arrefecimento do veículo. O elemento elástico é feito de uma liga com memória de forma que tem o formato modificado dependendo da temperatura. Essa unidade de abertura e fechamento é instalada entre uma grelha frontal e um radiador, e gira de acordo com a contração e relaxamento do elemento elástico de SMA. A unidade de abertura e fechamento está conectada ao elemento elástico por um elemento de conexão (item 30) para controlar a quantidade de ar externo que flui no radiador, arrefecendo então o motor.

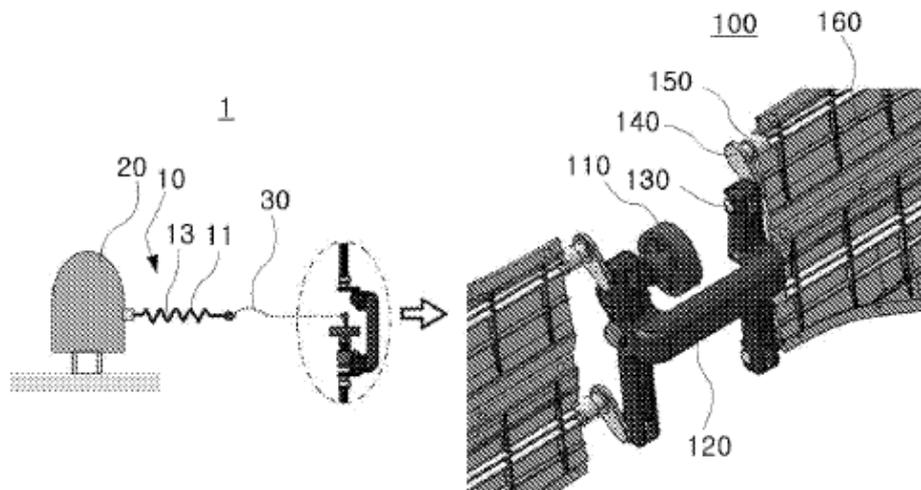


Figura 4.2.13 – Dispositivo de aleta de ar para um veículo (Bae, 2013).

#### 4.2.2.4 Construção civil

As características únicas das ligas com memória de forma também encontram diversas aplicações no ramo de engenharia civil. Neste ramo, as SMAs são utilizadas principalmente como atuadores, dissipadores passivos de energia e amortecedores, prevenindo, por exemplo, falhas decorrentes de abalos sísmicos, ventos, ondas e outros tipos de vibrações.

Hodgson (2016) revela, na patente de US 9,410,592 (B2), um aparelho para absorver choques repetitivos que compreendendo uma estrutura e um elemento absorvedor de choques de ligas com memória de forma. A Figura 4.2.14 mostra um dos exemplos de aparelho revelados, compreendendo um ou mais anéis de SMA (item 65) montados a suportes (item 64) em uma estrutura (itens 62 e 63) de maneira tal que o choque recebido pela estrutura a partir de uma dada direção mudar o formato dos anéis de SMA para um formato elíptico. Os elementos absorvedores de choque são preferencialmente de SMA

pseudoelástica, opcionalmente em combinação com SMA martensítica. Os aparelhos revelados são úteis para muitos propósitos, por exemplo, a proteção contra impactos e choques em pontes, edifícios, bem como aparelhos médicos, eletrônicos e veículos.

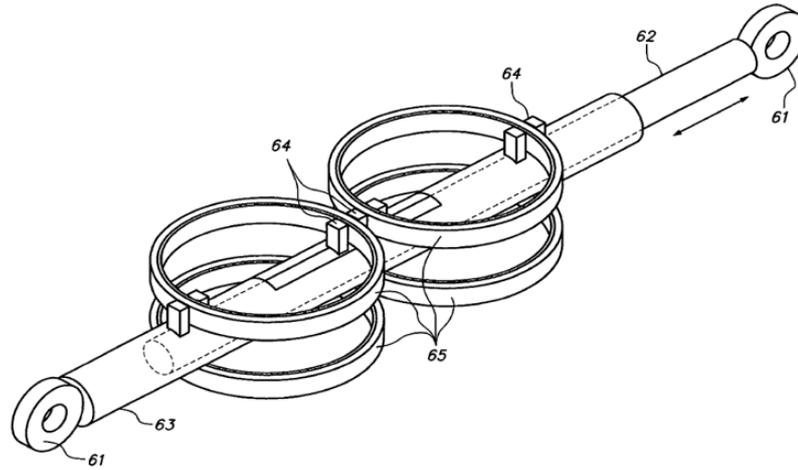


Figura 4.2.14 – Aparelho para absorver choques repetitivos (Hodgson, 2016).

Youhai *et al.* (2014), através do pedido de patente de invenção CN103867625 (A), descrevem um dispositivo de retorno automático para isolamento sísmico com elementos de liga com memória de forma. O dispositivo, mostrado na Figura 4.2.15, compreende um tubo cilíndrico transversal (item 1), uma passagem deslizante transversal (item 2), uma biela (item 3), um tubo de cilindro vertical (item 4), um pistão vertical (item 5), uma mola tensionadora comum (item 6), um fio de SMA transversal (item 7), um fio de SMA vertical (item 9) e um poste vertical de fixação (item 13). O pedido ainda ensina que a capacidade de retorno automático nas direções transversal e vertical são combinadas, obtendo assim o isolamento sísmico multidirecional e a redução das vibrações sísmicas.

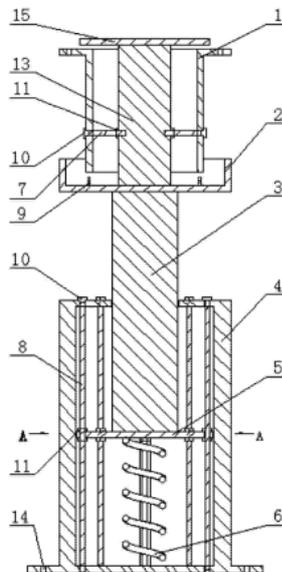


Figura 4.2.15 – Dispositivo de retorno automático para isolamento sísmico (Youhai *et al.*, 2014).

Zhuang *et al.* (2016) apresentam, na patente de modelo de utilidade CN205000484 (U), um atenuador de vibrações que utiliza molas helicoidais de Ligas com Memória de Forma, que podem ser submetidas a grandes deslocamentos e deformações, e tal atenuador podendo ser instalado em estruturas prediais para resistir a fortes terremotos e ventanias. Ademais, tal atenuador tem alta durabilidade e resistência à corrosão. A Figura 4.2.15 mostra este atenuador, que compreende um eixo central (item 1), uma luva externa (item 2) e molas helicoidais de Ligas com Memória de Forma (item 3).

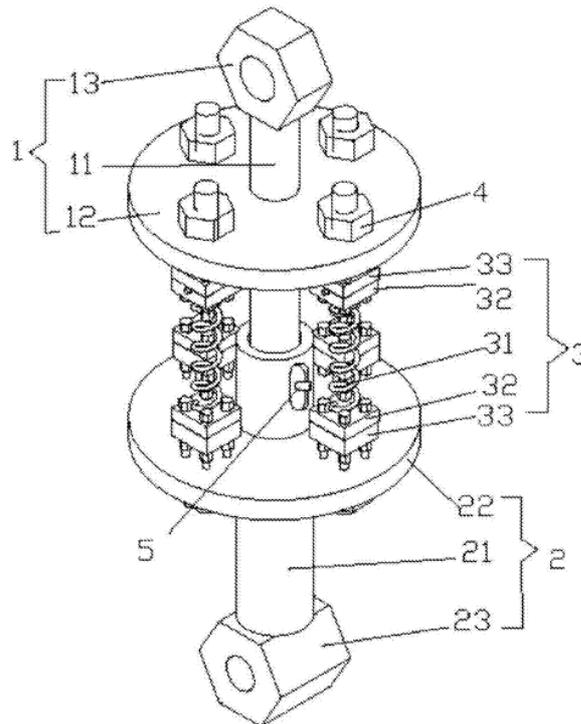


Figura 4.2.15 – Atenuador de Vibrações (Zhuang *et al.*, 2016).

### 4.3 Documentos Patentários relacionados a ligas com memória de forma no Brasil

O Brasil é um dos países que se destacam na atividade científica sobre materiais e estruturas inteligentes, ramo em que as ligas com memória de forma têm papel crucial. A exploração das características singulares das SMAs em áreas como bioengenharia, engenharia aeroespacial, robótica e controle de vibrações é uma tendência global e diversos grupos de pesquisa envolvendo universidades brasileiras e parceiros internacionais levaram a criação do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estruturas Inteligentes em Engenharia (INCT/EIE). Outro marco foi a criação do Comitê de Materiais e Estruturas Inteligentes da Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas (Savi e Steffen, 2012).

Em vista disso, buscou-se investigar os documentos patentários relacionados às SMAs depositados no Brasil e aqueles depositados via PCT cujos requerentes ou inventores sejam brasileiros. Foi realizada uma busca utilizando os termos como *ligas com memória de forma*, *nitinol*, *shape memory alloy*, *nitinol*, *memory metal*, *memory alloy* nas bases de dados do Instituto Nacional da Propriedade Industrial e PatentScope, da Organização Mundial da Propriedade Intelectual para definir esses documentos.

### 4.3.1 Documentos depositados no Brasil

A estratégia de busca por documentos relacionados às ligas com memória de forma depositados no Brasil concentrou-se nos documentos que contivessem em seu título ou resumo o termo *liga com memória de forma* e suas variantes. Foram encontrados 72 documentos relevantes para a presente busca, como mostrado no Anexo 2 (INPI, 2017). Destes pedidos, 70 são pedidos de patentes de invenção e 2 de modelo de utilidade. A Figura 4.3.1 mostra a quantidade desses documentos publicados por ano.

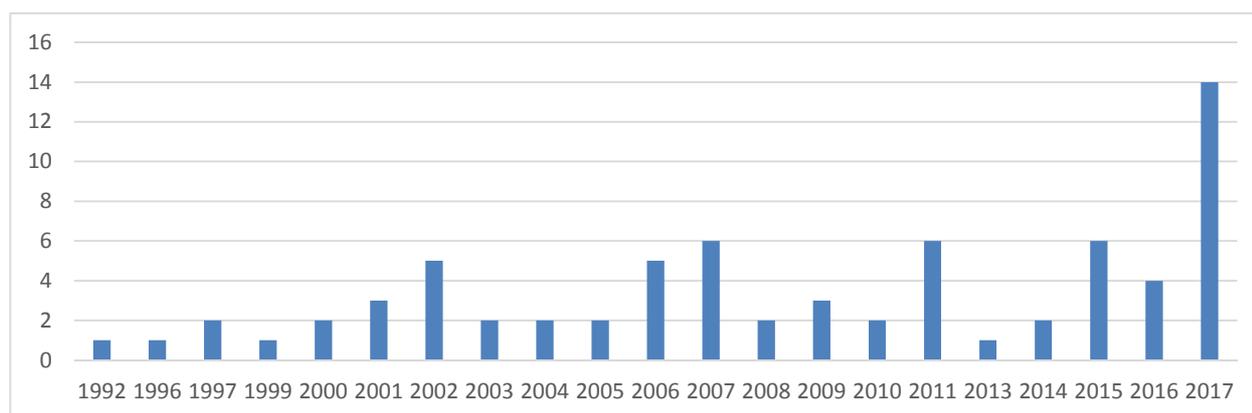


Figura 4.3.1 – Documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017).

Observa-se na Figura 4.3.1 uma distribuição irregular na quantidade de pedidos publicados sobre as ligas com memória de forma desde 1992, apresentando alguns anos de pico, como 2002, 2006, 2007, 2011, 2015 e 2017. Um exemplo dessa irregularidade pode ser constatado entre os anos de 2011 e 2017: em 2011, foram publicados 6 pedidos relevantes, nenhum em 2012, 1 em 2013, 2 em 2014, 6 em 2015, 4 em 2016 e 14 em 2017 (até o dia 31/07/2017).

Apesar dessa irregularidade quanto à quantidade de pedidos publicados, é possível verificar tendências a respeito do interesse dos agentes econômicos em explorar tecnologias relacionadas às ligas com memória de forma no Brasil. A Figura 4.3.2 mostra que dos pedidos publicados pelo INPI, 86% foram depositados por estrangeiros e apenas 14% por nacionais.

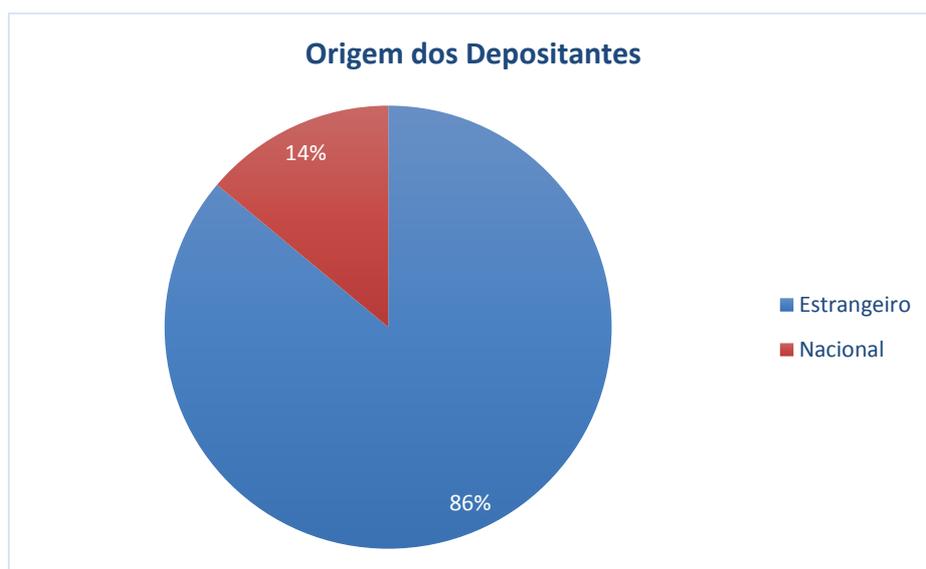


Figura 4.3.2 – Origem dos depositantes dos documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017).

A tendência apontada na análise da Figura 4.3.2 retrata, de modo exemplificativo, o interesse de patentear tecnologias no Brasil, ou seja, tal interesse é majoritariamente de agentes econômicos estrangeiros, como mostrado por Carvalho (2016). A Figura 4.3.3 mostra os principais depositantes de pedidos de patentes relacionadas às ligas com memória de forma no Brasil.

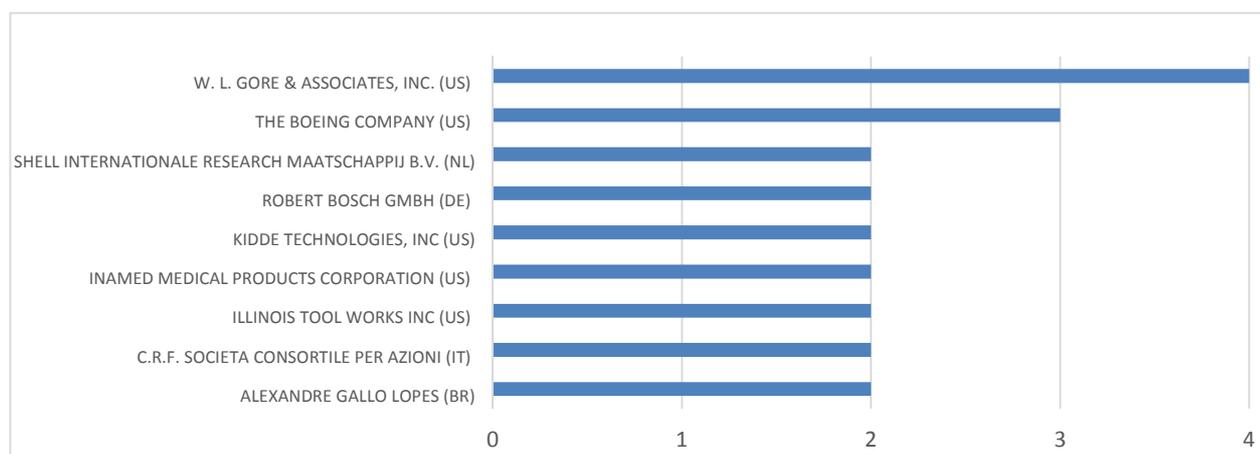


Figura 4.3.3 – Maiores depositantes de documentos publicados no Brasil relacionados a SMAs (adaptado de INPI, 2017).

Os ramos de atividade das maiores depositantes no Brasil de documentos relacionados às SMAs correspondem, embora com algumas peculiaridades, a aqueles das maiores depositantes a nível mundial. Há o predomínio de empresas do ramo da saúde (W.L. Gore & Associates, Inamed Medical Products e Alexandre Gallo Lopes), aeroespacial (Boeing e Kidde), automobilístico (C.R.F Società

Consortile per Azioni) e eletro-eletrônico (Bosch). Quanto às peculiaridades citadas, cabe ressaltar a presença da Shell, do ramo petrolífero.

Quanto aos depositantes nacionais, os tipos de depositantes foram classificados em pessoa física, empresa privada e universidade. Tal classificação visa estudar o interesse dos agentes econômicos nacionais em proteger tecnologias relacionadas às ligas com memória de forma, assim como os principais padrões e tendências desses depositantes. Ao todo, foram depositados por nacionais 10 pedidos de patente relacionados a tais ligas, sendo 8 pedidos de patente de invenção e 2 de modelo de utilidade.

A Figura 4.3.4 ilustra que 60% dos depositantes nacionais são pessoas físicas, 30% universidades e 10% empresas privadas. Essa figura mostra o aparente pequeno interesse da indústria nacional em proteger tecnologias relacionadas às SMAs. A expressiva parcela de depósitos feitos por pessoas físicas e universidades brasileiras evidencia que o conhecimento relacionado a esses ligas no Brasil ainda é muito restrito ao ambiente acadêmico e a exploração econômica desse conhecimento é, majoritariamente, um empreendimento individual.



Figura 4.3.4 – Tipos de depositantes nacionais: pessoa física, empresa privada e universidade (adaptado de INPI, 2017).

Por último, as classificações internacionais de patentes com maiores números de depósitos no Brasil foram analisadas objetivando-se inferir quais ramos de atividade são mais relevantes para esta tecnologia no país. A Figura 4.3.5 apresenta resultados similares ao que acontece globalmente, ou seja, há o predomínio de patentes relacionadas à área de saúde (classificação A61), com 24 pedidos no total; máquinas e equipamentos elétricos (classificação H01), com 7 pedidos; e metalurgia, ligas ferrosas ou não-ferrosas e tratamentos relacionados (classificação C22) e veículos em geral (classificação B60), com 5 pedidos cada.

Dessa forma, constata-se que as tendências globais quanto ao interesse em proteger tecnologias relacionadas às ligas com memória de forma, com algumas peculiaridades, se repetem no Brasil. Inclusive, alguns agentes econômicos com número expressivo de depósitos relacionados a tais ligas no mundo todo também são um dos principais depositantes no Brasil, como a Boeing. Entretanto, evidenciou-se que a indústria nacional ainda tem pequeno interesse em proteger essas tecnologias, já que os depósitos realizados por nacionais foram predominantemente feitos por pessoas físicas e universidades. Isso evidencia que as atividades de agentes brasileiros no mercado relacionado às SMAs, por enquanto, é possivelmente restrito ao meio acadêmico e a empreendimentos individuais.

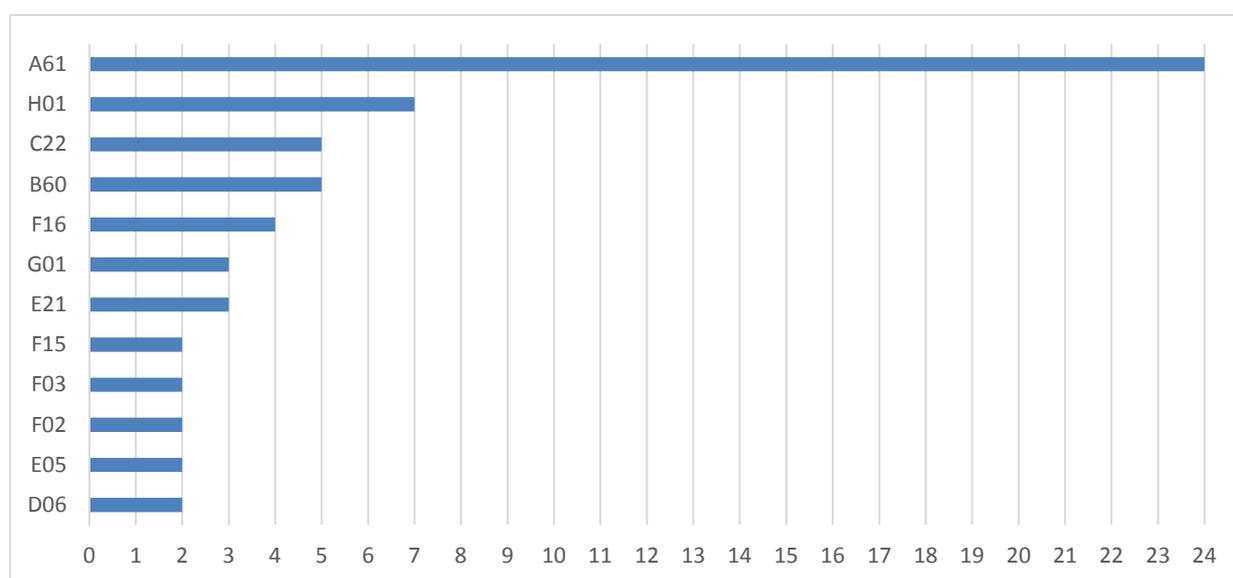


Figura 4.3.5 – Quantidade de pedidos por classificação (adaptado de INPI, 2017).

#### 4.3.1.1 Exemplos de documentos patentários relacionados a ligas com memória de forma depositados no Brasil

Melo *et al.* (2016), por meio do pedido de patente de invenção BR102013029247-8 A2, apresentam uma luva com efeito memória de forma para a união de tubulações, ilustrada pela Figura 4.3.6, elaborada com ligas metálicas compostas de Cu, Al, Be, Nb e Ni. É descrito como vantagem dessa invenção a possibilidade desta luva ser armazenada em condições de temperatura entre  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  e  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  por um período indeterminado de tempo. O campos de aplicação dessa invenção são as indústrias química, petroquímica, agroindústria e outros setores que utilizem tubulações metálicas em processos de produção ou para a conservação ambiental.

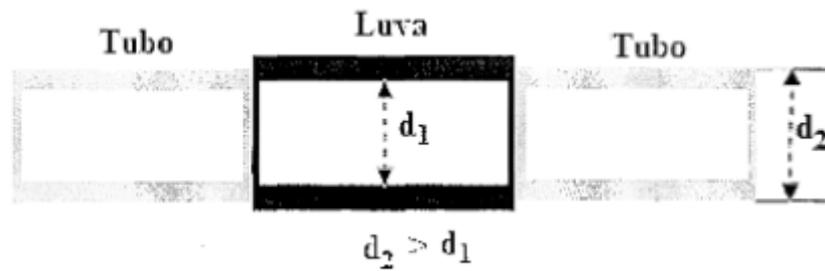


Figura 4.3.6 – Luva com efeito memória de forma para a união de tubulações (Melo *et al.*, 2016).

Trilha Júnior (2009) revela, no pedido de patente de invenção PI0701768-5 A2, um sistema de introdução de dispositivos através de tecidos corpóreos, por exemplo em procedimentos de laparoscopia. O sistema, mostrado na figura 4.3.7, compreende um laparoscópio (item 28), um corpo central (item 38), um elemento introdutório (item 29), uma mola com memória com memória de forma (item 27). Essa invenção compreende ainda um sistema de retração do elemento introdutório que, quando há uma redução brusca na força aplicada no gume do elemento, recolhe esse elemento introdutório no instante em que ele rompe uma estrutura, evitando assim que a estrutura adjacente seja agredida. Para que a próxima estrutura seja transpassada, a mola com memória de forma é aquecida por meio de uma corrente elétrica, modificando sua forma e empurra a base do sensor de força, expondo o gume do elemento introdutório, o que permite a perfuração da próxima estrutura.

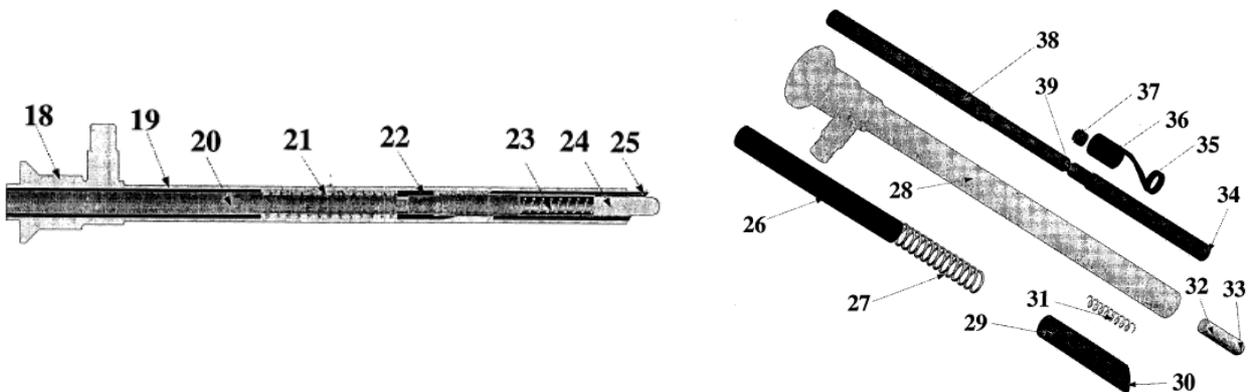


Figura 4.3.7 – Sistema de introdução de dispositivos através de tecidos corpóreos (Trilha Júnior, 2009).

Lopes (2011) mostra, no pedido de patente de modelo de utilidade MU 8902352-8 Y1, um braquete autoligável, mostrado na Figura 4.3.8, utilizado em tratamentos ortodônticos compreendendo um mecanismo de abertura e fechamento viabilizado por uma lâmina deslizante em formato “W” com memória de forma (item 5). É ainda descrito que a escolha da liga metálica e o seu processo metalúrgico para a fabricação e têmpera da lâmina deslizante, permitem que as forças de abertura e fechamento sejam calibradas especificamente para essas tarefas, o que facilita o trabalho do profissional e proporciona conforto ao paciente, por minimizar ou não provocar dor durante as operações de abertura e fechamento.

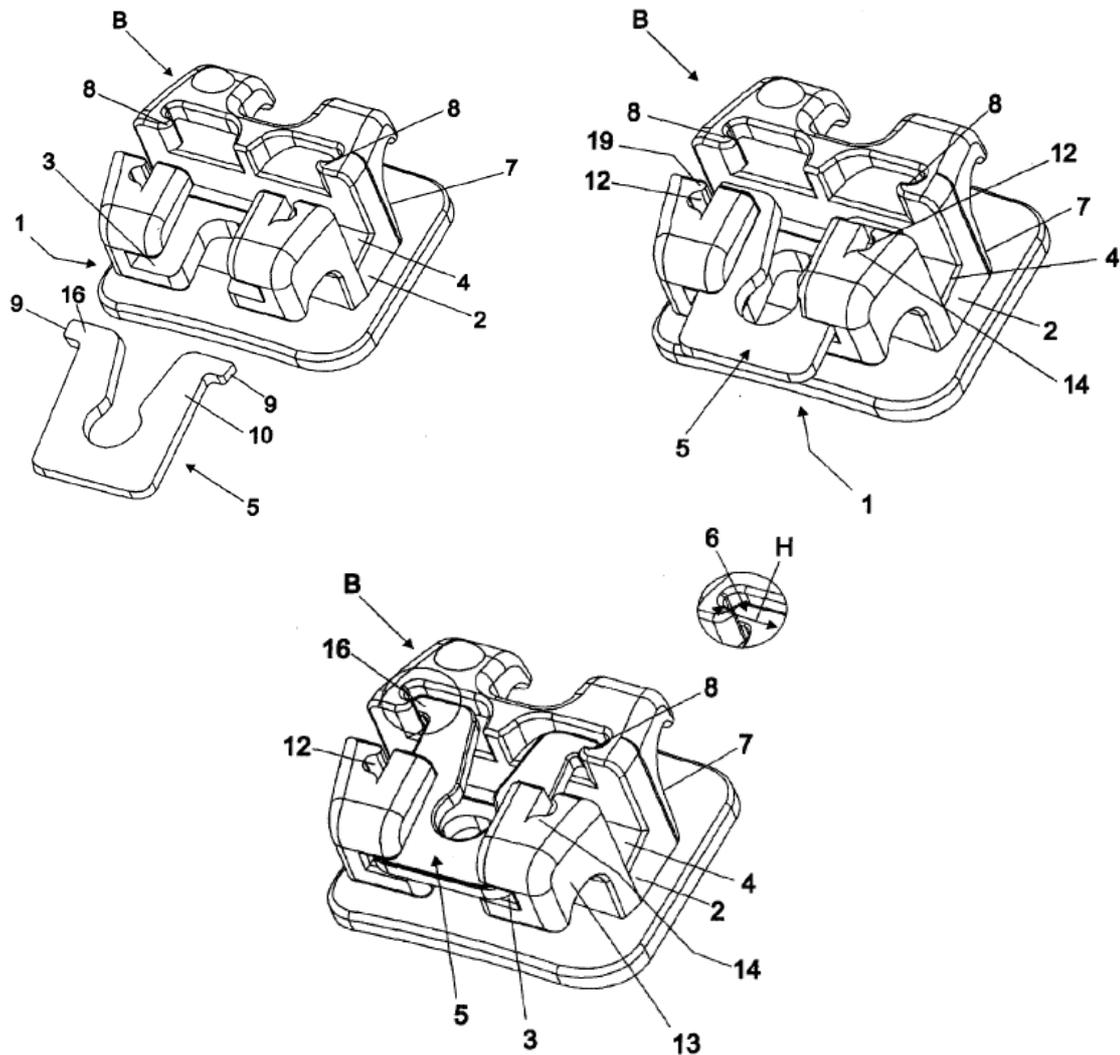


Figura 4.3.8 – Braquete autoligável com lâmina deslizante em formato “W” com memória de forma (Lopes, 2011).

### 4.3.2 Documentos depositados por agentes econômicos nacionais via PCT

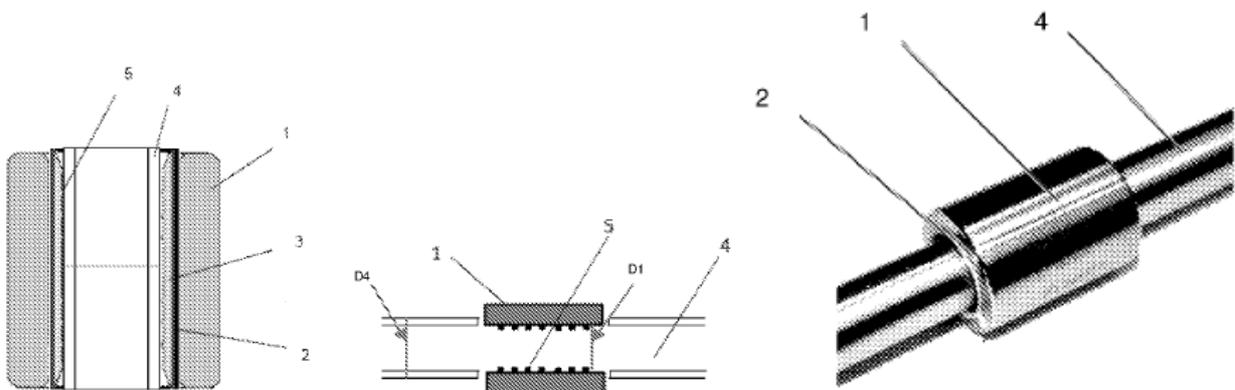
De modo a encontrar os documentos patentários relacionados às ligas com memória de forma depositados por brasileiros via PCT, utilizou-se a ferramenta de busca PATENTSCOPE. O Anexo 3 mostra os resultados da busca feita nesta base de dados. Os campos de busca usados foram Nacionalidade do Requerente (brasileira) e documentos que contivessem na sua primeira página termos como *ligas com memória de forma*, *shape memory alloy* ou *nitinol*.

Foram depositados 4 documentos via PCT relacionados às ligas com memória de forma por nacionais, como mostrado na Tabela 4.1 abaixo. Desta, verifica-se que as principais tendências dos depósitos feitos por agentes econômicos brasileiros via PCT são semelhantes àsquelas dos depósitos feitos por nacionais no INPI, ou seja, há o predomínio da área de saúde (classificações internacionais A61C 7/28, A61M 25/09 e A61B 17/11) e de depósitos feitos por pessoas físicas (75%).

Tabela 4.1 – Pedidos depositados por nacionais via PCT (adaptado de WIPO, 2017b)

Pedido internacional	Data de depósito	Data de publicação	Título	Depositante	Classificação Internacional
WO2016/172772	27/04/2015	03/11/2016	Conexão em material de liga de memória de forma e seus usos	FMC Technologies do Brasil LTDA	F16L 13/14
WO2012/019262	11/08/2011	16/02/2012	Amarrio de ligação pré-fabricado com atrito variável	Alexandre Gallo Lopes	A61C 7/28
WO2010/118488	12/04/2010	21/10/2010	Fio guia motor	Luiz Mauricio Soares do Nascimento	A61M 25/09
WO2007/140557	06/06/2006	13/12/2007	Prosthesis for anastomosis	Luiz Gonzaga Granja Filho	A61B 17/11

Zaragoza Labes *et al.* (2016), através do pedido internacional de patente WO2016/172772 A1, revelam uma conexão para tubulações hidráulicas, mostrada na Figura 4.3.9, compreendendo luva de liga com memória de forma (item 1), fabricada originalmente com diâmetro interno menor que o diâmetro externo da tubulação e que possui internamente uma camada de revestimento de material dieletrico (item 2) e uma camada de material anti-corrosivo (item 3), que possui porções proeminentes projetadas para agarrar a superfície externa da tubulação. É descrito que essa conexão é resistente à fragilização por hidrogênio e à corrosão, assim como possibilita uma diminuição substancial de custos e complexidade de implantação, operação, montagem e manutenção, além de se garantir melhor confiabilidade em sistemas de tubulações de equipamentos submarinos.

Figura 4.3.9 – Luva de liga com memória de forma (Zaragoza Labes *et al.*, 2016).

Lopes (2012), por meio do pedido internacional de patente WO 2012/019262 (A1), mostra um amarrio de ligação fabricado em nitinol, ilustrado na figura 4.3.10. Esse amarrio (item 1) perfaz um contorno retangular e apresenta extremidades livres (item 2) passíveis de serem defletidos, adequando a necessidade de fixação do arco (item 3) ao braquete (item 5), redundando para uma força de atrito variável.

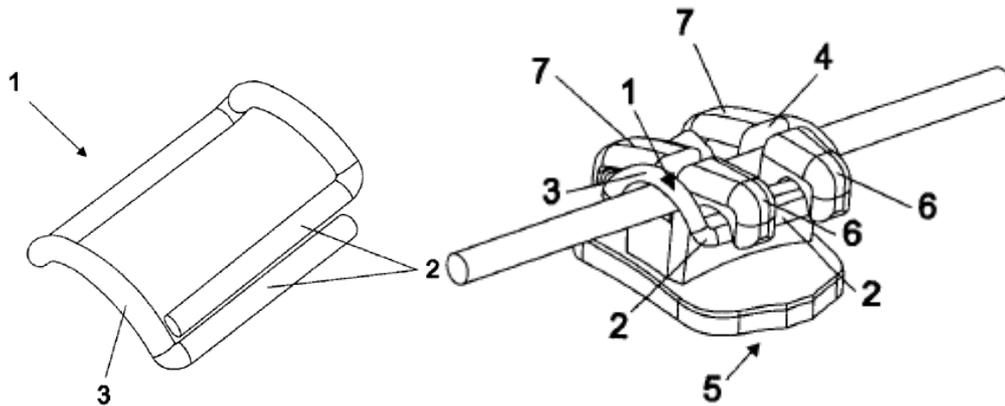


Figura 4.3.10 – Luva de liga com memória de forma (Lopes, 2012).

Nascimento (2010), através do pedido internacional de patente WO 2010/118488 (A1), apresenta um fio guia motor para cirurgias endovasculares, ilustrado na figura 4.3.11, que pode ser fabricado com nitinol. É descrito que essa invenção possibilita a realização de procedimentos endovasculares com de modo seguro e permite o direcionamento da guia e de todo o sistema para o local desejado. Ademais, é citado que, dependendo do tipo de cirurgia endovascular, esse dispositivo pode ser utilizado separadamente ou em conjunto com guias e cateteres existentes.

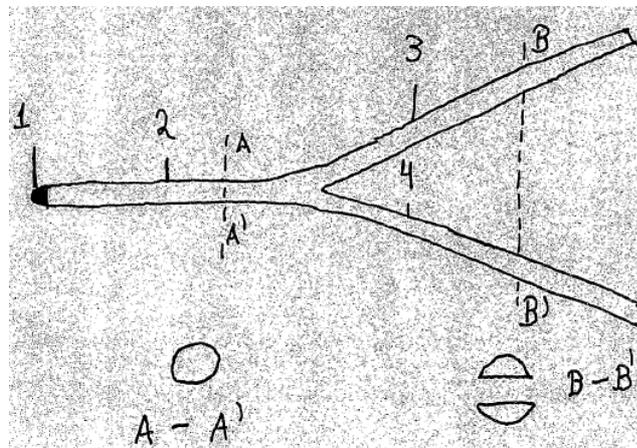


Figura 4.3.11 – Fio guia motor (Nascimento, 2010).

Granja Filho (2007), através do pedido internacional de patente WO 2007/140557 (A2), revela uma prótese para anastomose (comunicação entre dois vasos ou canais), mostrada na Figura 4.3.12, que pode ser fabricada em nitinol. É descrito que o flange da prótese possui uma pluralidade de aerturas espaçadas na sua periferia, o que permite que a prótese seja suturada fora da anastomose, apenas para sua fixação no tecido, veia, artéria, entre outros, assim, eliminando um dos principais problemas nessa área, que é a introdução de corpos estranhos dentro do lúmen.

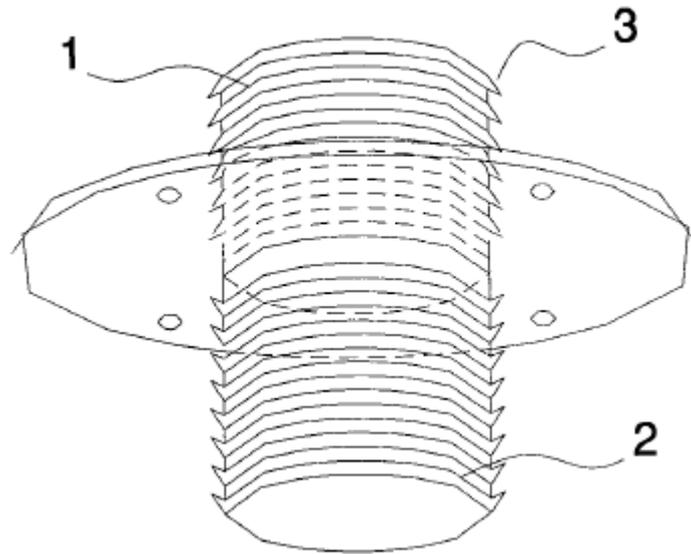


Figura 4.3.12 – Prótese para anastomose (Granja Filho, 2007).

## Capítulo 5 – Método de Elementos Finitos

O método de elementos finitos é amplamente utilizado para simular o comportamento de estruturas. Atualmente, ele é empregado por diversos *softwares* comerciais, entre eles o Ansys 18.1, que é utilizado nas simulações numéricas a serem apresentadas.

### 5.1 Modelagem de estruturas através do método de elementos finitos

O método de elementos finitos é um método numérico para solução de problemas físicos governados por uma equação diferencial ou por um teorema de energia. Esse método possui duas características que o distinguem de outros procedimentos numéricos convencionais, a saber: o método utiliza uma formulação integral para gerar um sistema de equações algébricas e usa funções suaves e definidas em trechos para aproximar os valores incógnitos (Segerlind, 1984).

As etapas desenvolvidas em uma análise por Elementos finitos são (Alawadhi, 2010):

- *Pré-processamento*: deve-se criar e discretizar o domínio em elementos finitos, dividindo-o em nós e elementos. Após, deve-se aplicar as condições de contorno, condições iniciais e carregamentos. Então, desenvolvem-se as equações por elementos e uma matriz de rigidez global é construída.
- *Solução*: o conjunto de equações algébricas, lineares ou não-lineares, é resolvido para se obter os valores nodais.
- *Pós-processamento*: Nesta fase, utiliza-se a solução obtida para encontrar os valores de interesse, como tensões equivalentes, fluxos térmicos, entre outros.

A Figura 5.1.1 ilustra as etapas para a aplicação do método de elementos finitos, assim como um resumo de cada uma dessas etapas (Riagusoff, 2012).

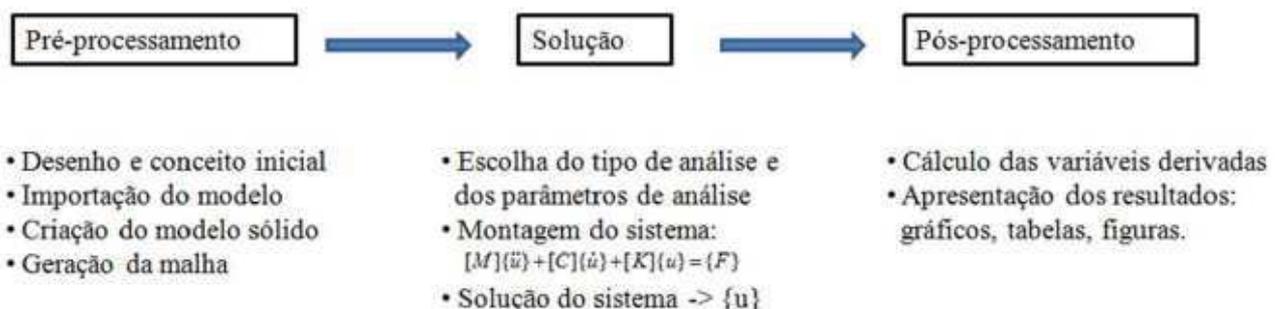


Figura 5.1.1 – Etapas do método de elementos finitos (Riagusoff, 2012).

A equação do movimento resultante para um sistema mecânico dinâmico é dada por:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{F\} \quad (4.1)$$

em que  $[M]$  é a matriz de massa,  $[C]$  é a matriz de amortecimento,  $[K]$  é a matriz de rigidez,  $\{\ddot{x}\}$  é o vetor de aceleração,  $\{\dot{x}\}$  é o vetor de velocidade,  $\{x\}$  é o vetor de deslocamento e  $\{F\}$  é o vetor de forçamento externo aplicado. Essa equação pode ser resolvida numericamente pelo método de elementos finitos. A partir dessa equação, pode-se definir o tipo de análise a ser realizado, por exemplo, as análises estruturais comumente empregadas são: estática estrutural, transiente estrutural, modal e harmônica.

No caso particular de análises estática estrutural, considera-se que os vetores de aceleração e velocidade, ou seja,  $\{\ddot{x}\}$  e  $\{\dot{x}\}$ , respectivamente, são nulos, gerando então a seguinte equação, que define este problema estático:

$$[K]\{x\} = \{F\} \quad (4.2)$$

## 5.2 Não-linearidades

A solução de problemas físicos através de uma abordagem não-linear representa uma descrição mais realista desses fenômenos, entretanto essas análises não-lineares são tipicamente mais complexas do que as análises lineares. As não-linearidades podem ser divididas em duas naturezas distintas: geométricas e constitutivas.

As não-linearidades geométricas estão associadas ao movimento, ou seja, devem ser consideradas na análise quando a estrutura é submetida grandes deslocamentos, deformações ou rotações. Já as não-linearidades constitutivas são aquelas associadas ao comportamento do sistema, por exemplo, relação tensão-deformação não-linear, mudanças de condições do ambiente ou o período de tempo em que um carregamento é aplicado (Savi, 2006).

Segundo Ansys (2017), as análises não-lineares são solucionadas em um processo quase-estático, caracterizado pela aplicação gradual da carga. Através do software Ansys, a aplicação de carga ocorre em três níveis operacionais, ilustradas pela Figura 4.2.1.

i) o nível superior consiste em um falso transiente através da aplicação de etapas de carregamento definidos explicitamente através de um intervalo de tempo. Assume-se que a carga varia linearmente entre as etapas de carregamento;

ii) em cada etapa, pode-se direcionar a aplicação gradual da carga, organizando-a em subetapas de intervalos de tempo;

iii) a cada subetapa, o software Ansys realiza um número de iterações de equilíbrio para obter a convergência da solução.

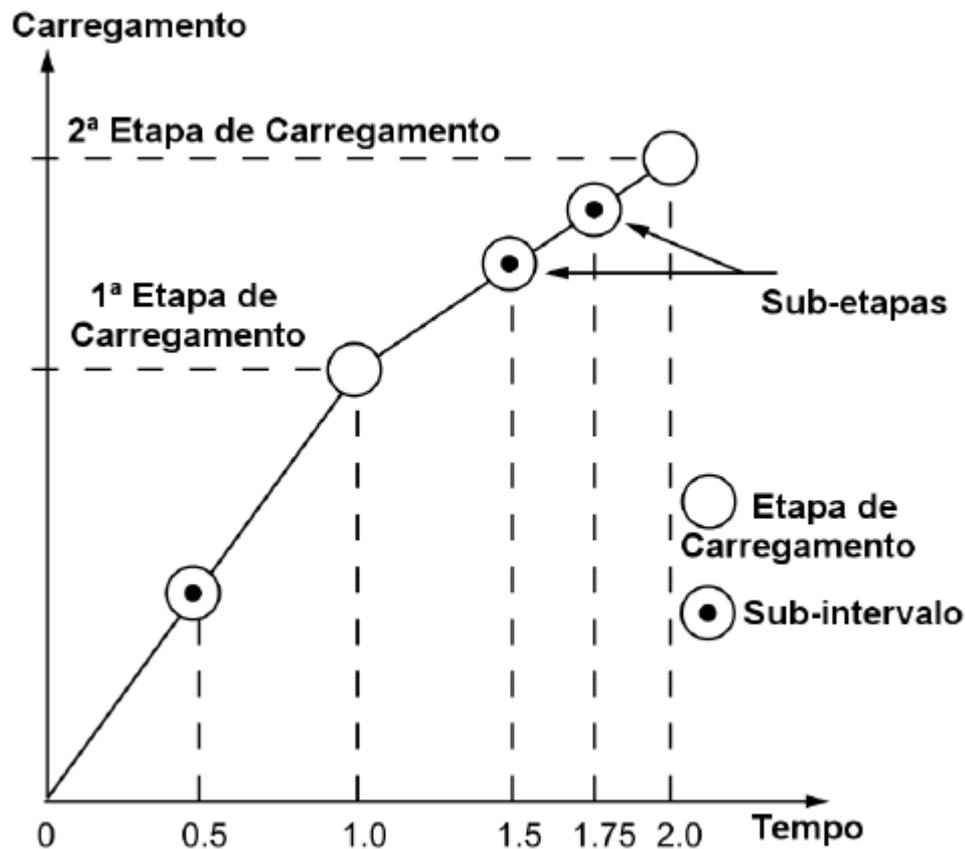


Figura 5.2.1 – Etapas de carregamento e intervalos de tempo (Silva, 2016).

### 5.3 Tipos de Elementos

Uma questão de central importância em toda análise através do método de elementos finitos é definir os tipos de elementos a serem empregados na idealização da estrutura em estudo. Deve-se avaliar cuidadosamente a estrutura de interesse para escolher adequadamente os elementos a serem utilizados, em virtude dos diversos tipos de elementos disponíveis nos *softwares* de simulação e de suas especificidades, comportamentos e limitações.

Dependendo do problema analisado, os elementos podem ter diferentes formas, como exemplos, linhas, áreas ou volumes. Os elementos de linha são empregados para modelar treliças ou vigas, já os elementos de área podem ser retangulares ou triangulares e são utilizados para modelar áreas bidimensionais, como placas planas, e os elementos de volume são utilizados para modelar corpos tridimensionais (Alawadhi, 2010).

Há um quarto tipo de elemento, denominado elemento de casca, que não se enquadra nos tipos anteriores, pois, apesar de serem bidimensionais em sua natureza, mas sua área pode ser curvada

para modelar uma estrutura tridimensional. Os elementos de casca são tipicamente eficientes para modelar corpos com espessura fina. A Figura 5.3.1 mostra os elementos básicos, ou seja, elementos de linha, área e volume, já a Figura 5.3.2 ilustra o elemento de casca.

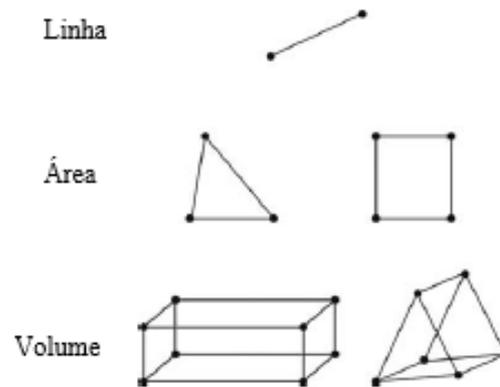


Figura 5.3.1 – Elementos básicos (Alawadhi, 2010).

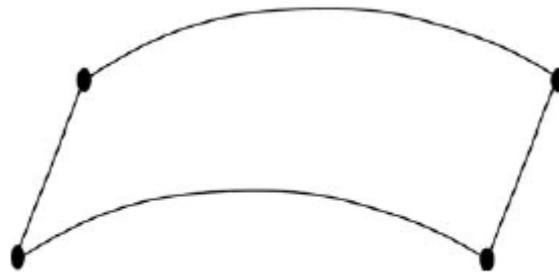


Figura 5.3.2 – Elemento de casca (Alawadhi, 2010).

## Capítulo 6 – Comparação Numérico-Experimental de Ensaio de Tração de um Fio de Liga com Memória de Forma

Esse capítulo apresenta uma comparação entre resultados experimentais, resultantes de um ensaio de tração de fios de SMAs pseudoelásticos realizados no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM) do CEFET/RJ (Silveira, 2017), e as simulações numéricas realizadas através do pacote computacional comercial de elementos finitos Ansys 18.1, utilizando o modo de programação paramétrica APDL (*Ansys Parametric Design Language*).

### 6.1 Ensaio de tração

Silveira (2017) mostra a caracterização de um fio pseudoelástico de liga com memória de forma com 0,48 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento. Essa caracterização objetivou identificar as tensões características de mudança de fase e seus respectivos módulos elasticidade. Para alcançar resultados estáveis, esse fio passou por um treinamento, ou seja, foi submetido a ensaios de tração realizados de maneira cíclica. A Figura 6.1.1 mostra a realização desse ensaio.



Figura 6.1.1 – Ensaio de tração (Silveira, 2017).

De acordo com Silveira (2017), foram realizados cinco ensaios neste fio. Cada ensaio foi composto de vinte ciclos, nos quais foram considerados os 17º, 18º e 19º ciclos para a caracterização. É relatado que o 20º ciclo não foi aproveitado por ter apresentado não-conformidades. Como resultado dos ensaios, foram definidas 15 curvas para essa caracterização, mostradas na Figura 6.1.2.

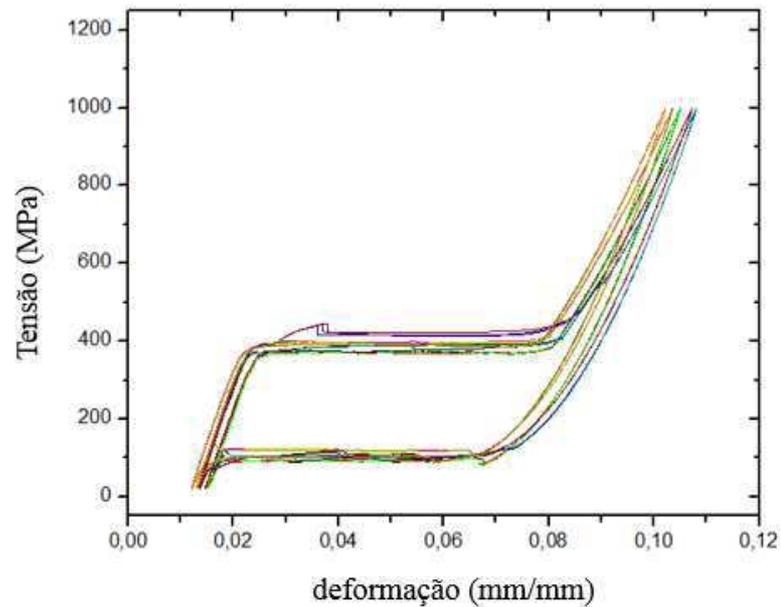


Figura 6.1.2 – Curvas de caracterização (Silveira, 2017).

A Figura 6.1.3 mostra as quatro retas resultantes dessas curvas de caracterização. Nota-se que a deformação residual foi removida. Essas retas foram obtidas através do método dos mínimos quadrados e determinam as propriedades de interesse do fio pseudoelástico em questão.

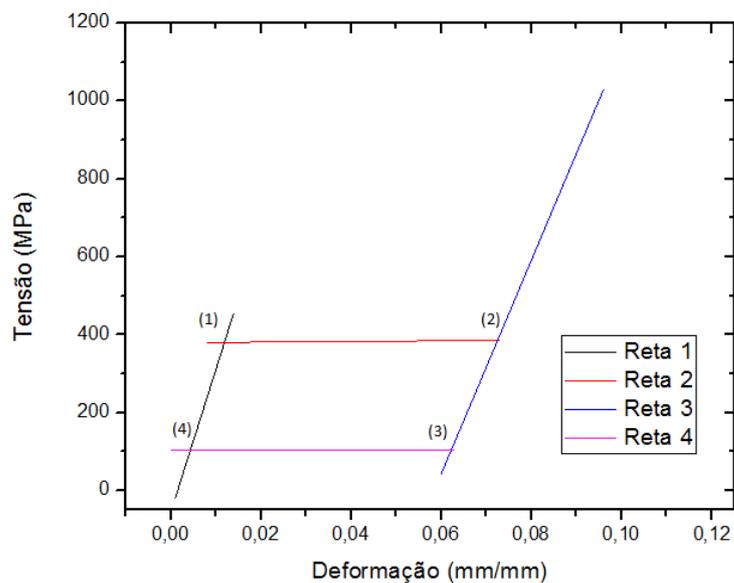


Figura 6.1.3 – Retas de caracterização (Silveira, 2017).

Da Figura 6.1.3, Silveira (2017) obteve as propriedades mecânicas do fio pseudoelástico ensaio. Tais propriedades são mostradas na Tabela 6.1.

Tabela 6.1- Propriedades mecânicas do fio pseudoelástico ensaiado (Silveira, 2017).

Parâmetros do fio pseudoelástico			
	Módulo de Elasticidade (GPa)	Deformação (mm/mm)	Tensão (MPa)
Reta 1 - Austenita	36,7	-	-
Reta 3 - Martensita	27,4	-	-
Ponto (1) - Formação de Martensita	-	0,010	380,9
Ponto (2) - Martensita	-	0,071	386,1
Ponto (3) - Recuperação Austenita	-	0,061	104,2
Ponto (4) - Austenita	-	0,003	104,2

## 6.2 Simulação do ensaio de tração

Com o objetivo de calibrar o modelo de Auricchio e Petrini (2004), presente no *software* Ansys 18.1 foi realizada uma simulação numérica utilizando os parâmetros do fio pseudoelástico em estudo obtidos por Silveira (2017). O Apêndice 1 apresenta o código APDL utilizado para elaborar a simulação numérica do presente capítulo.

O fio pseudoelástico de liga com memória de forma ensaiado, possuindo de 0,48 mm de diâmetro e 150 mm de comprimento, foi modelado no Ansys através de um elemento tipo viga, denominado BEAM188. Esse elemento foi escolhido pelo fato de representar de maneira adequada a geometria do fio e por possuir suporte da função *TB, SMA*, do *software* Ansys 18.1, referente ao modelo de Auricchio e Petrini (2004).

Foi feita uma análise de convergência da malha com o objetivo de definir o tamanho de elemento e o número de etapas de carregamento adequados para a presente simulação. A área da seção transversal do fio foi dividida em dez divisões angulares e cinco divisões radiais, assim como o comprimento do mesmo foi dividido em dez elementos igualmente espaçados, compondo uma malha regular. Em relação ao número de etapas de carregamento, foram definidas oitenta etapas no total, sendo quarenta etapas de carregamento crescente e quarenta etapas de carregamento decrescente (descarregamento). A Figura 6.2.1 mostra a seção transversal do fio simulado e a Figura 6.2.2 mostra uma figura em perspectiva ilustrando toda a geometria desse fio.

O carregamento simulado foi um deslocamento prescrito, na forma de um carregamento triangular de deslocamento prescrito com uma amplitude máxima de 15 mm, aplicado em uma extremidade do fio, sendo que a outra extremidade foi considerada engastada.

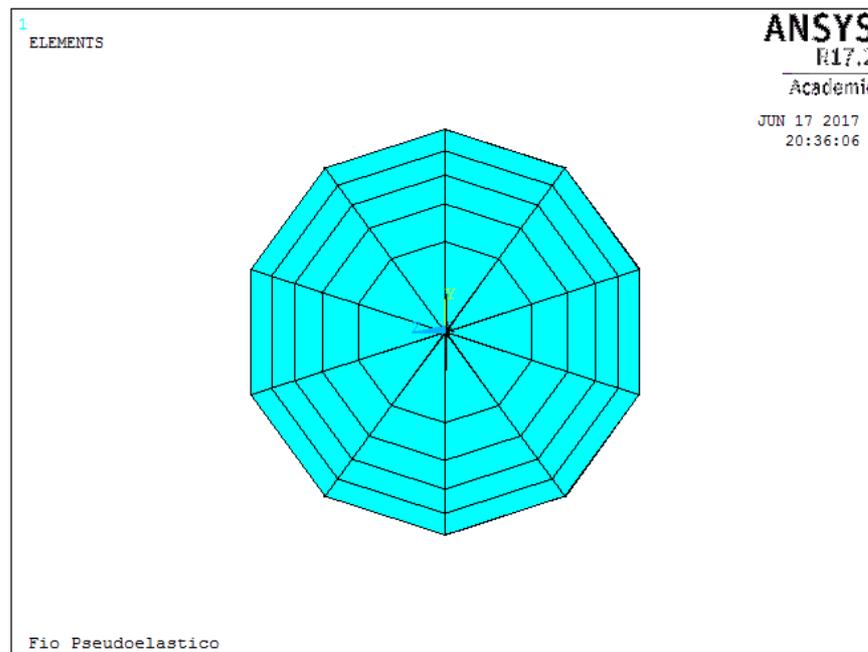


Figura 6.2.1 – Seção transversal do fio simulado.

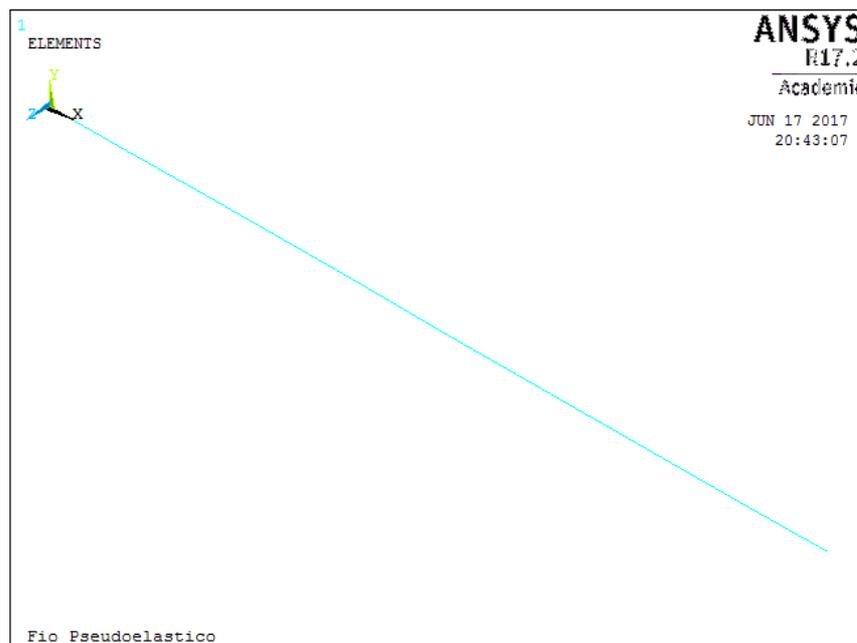


Figura 6.2.2 – Geometria do fio simulado.

A partir dos dados experimentais do ensaio de tração, apresentados na Tabela 6.1, foi possível obter os sete parâmetros necessários para implementar o modelo de Auricchio e Petrini (2004) no software Ansys APDL 18.1. A Tabela 6.2 mostra esses sete parâmetros, empregados na simulação numérica.

Tabela 6.2 – Parâmetros utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor	Descrição
C1	56,8 MPa	Coeficiente de endurecimento
C2	288,2 K	Temperatura de referência em um estado livre de tensões aplicadas
C3	115,0 MPa	Raio do domínio elástico
C4	6 MPa/K	Fator de dependência da tensão com a temperatura
C5	0,075 mm/mm	Deformação máxima atingida ao final da transformação de fase
C6	27,4 GPa	Módulo de elasticidade da martensita
C7	0,0	Parâmetro de dependência de Lode

A Figura 6.2.3 mostra os resultados obtidos por essa simulação numérica em comparação com os resultados experimentais de Silveira (2017). A partir da análise dessa figura, é possível verificar que a simulação numérica aqui apresentada foi capaz de representar de maneira adequada os resultados obtidos no ensaio experimental.

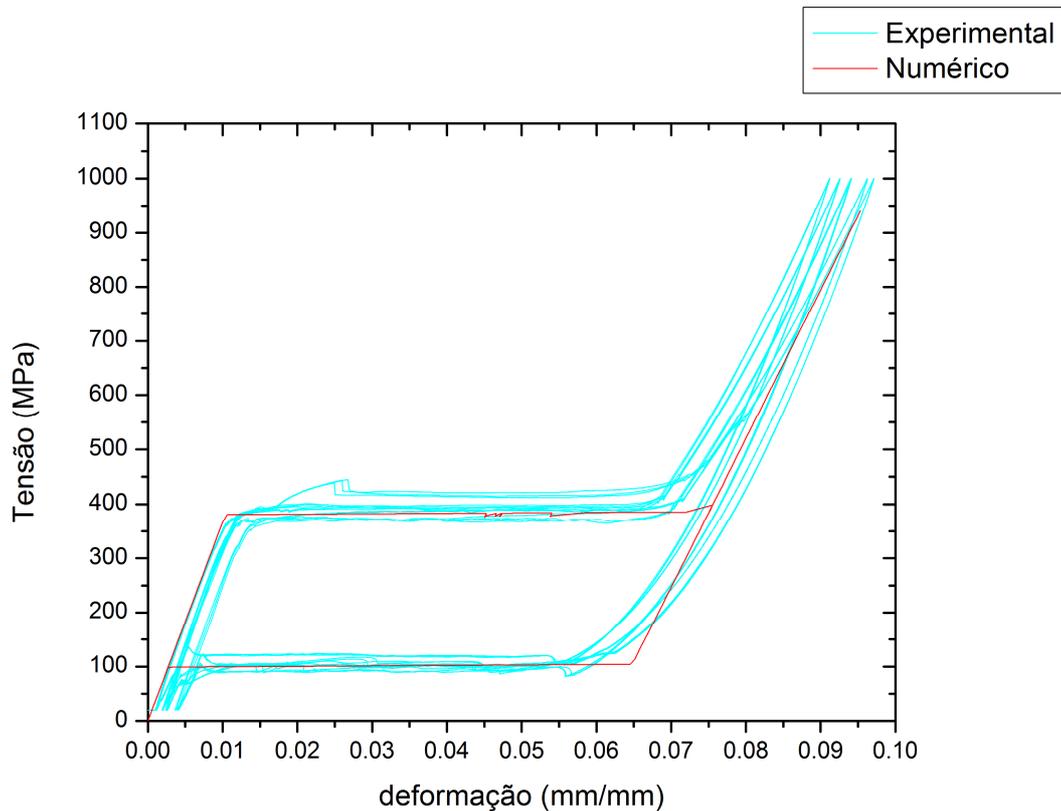


Figura 6.2.3 – Comparação numérico-experimental.

## Capítulo 7 – Projeto de Estrutura Treliçada com Elementos de Ligas com Memória de Forma

Esse capítulo apresenta o projeto de uma estrutura treliçada (tipo pórtico) de pequeno porte para fins educacionais reforçada com elementos de ligas com memória de forma. Essa estrutura foi projetada para ser montada em equipamentos para análise dinâmica de estruturas disponíveis no Laboratório de Análise do Comportamento Termomecânico de Materiais (LACTM) do CEFET/RJ.

É mostrada uma busca de anterioridades relevantes para o projeto, de modo a definir as principais características e dificuldades de objetos anteriores nessa área e, assim, direcionar o presente projeto.

Por fim, são mostrados os desenhos dessa estrutura, juntamente com uma descrição detalhada de sua montagem e funcionamento, bem como as simulações numéricas realizadas no Ansys 18.1 com objetivo de definir as características dinâmicas da mesma.

### 7.1 Busca por anterioridades

Foi realizada uma busca por documentos do estado da técnica relevantes para estruturas treliçadas com elementos de ligas com memória de forma. Esses documentos anteriores são artigos científicos e documentos patentários.

Foram buscados documentos que apresentassem estruturas, como treliças e pórticos, reforçados por elementos de ligas com memória de forma para atenuar, absorver ou dissipar energia mecânica proveniente de vibrações. As ferramentas de busca utilizadas foram o Google Acadêmico e bases de dados de patentes como Lens, Google Patents e Espacenet.

Os termos utilizados nessa busca por anterioridades foram *pórtico reforçado*, *fios*, *barras* e *ligas com memória de forma*, *vibrações*, *impacto* e *choque* e seus análogos em língua inglesa, respectivamente, *braced frame*, *wires*, *bars* e *shape memory alloy*, *vibration*, *impact* e *shock* de modo a representar as principais características técnicas da estrutura projetada.

Nas buscas pelos documentos patentários mais relevantes para o presente projeto, utilizou-se, além das palavras-chave supra, as classificações internacionais G09B 23/08, referente a modelos para fins científicos relacionados à física (estática ou dinâmica), e A63H 33/04, referente a brinquedos tipo blocos, tiras ou peças similares para armar construções. Além disso, foram estudados documentos patentários da classificação internacional E04B 1/98, referente a estruturas com elementos de proteção contra vibrações ou choques, pois este é um campo de aplicação próximo do objeto deste projeto final.

### 7.1.1 Anterioridades relevantes para a presente estrutura

Olmi *et al.* (2007) revelam um dispositivo com propósitos educacionais e de pesquisa para demonstrar o controle de vibrações estruturais utilizando materiais inteligentes. Esse dispositivo, ilustrado na Figura 7.1.1, compreende uma plataforma com um motor com massa desbalanceada posicionado na parte superior da estrutura que induz as vibrações nesta. Fios de SMA ativados via efeito Joule são utilizados para controlar a rigidez da estrutura e um amortecedor de fluido magneto reológico (MR) é utilizado para controlar o coeficiente de amortecimento desta. Além disso, um sensor piezocerâmico (PZT) permite inferir as vibrações na estrutura.

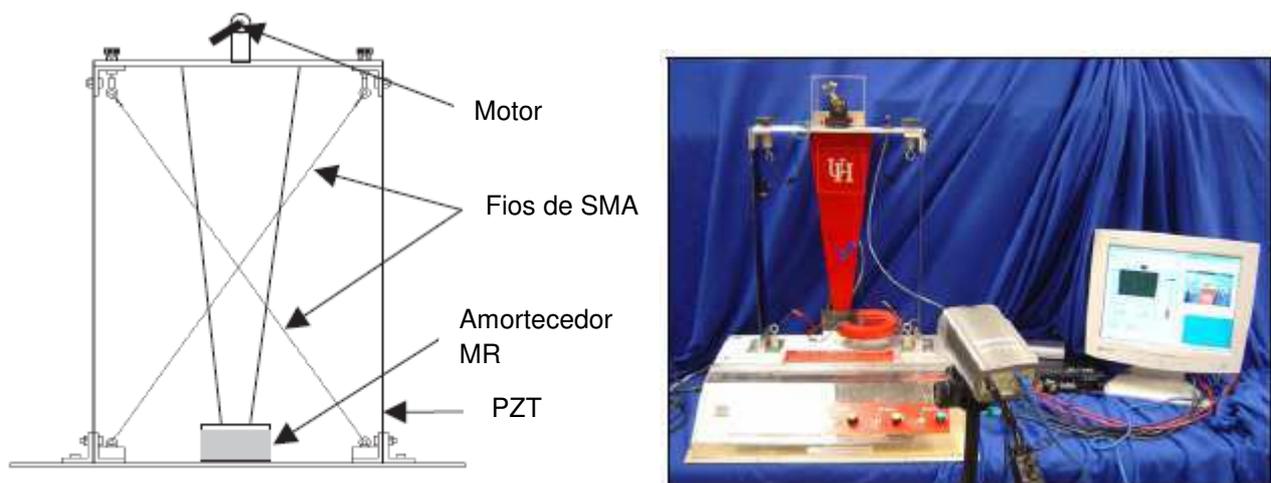


Figura 7.1.1 – Dispositivo com propósitos educacionais e de pesquisa para demonstrar o controle de vibrações estruturais utilizando materiais inteligentes (adaptada de Olmi *et al.*, 2007).

Kotani e Okabe (2002) revelam, através do pedido de patente JP2002169460 (A), uma estrutura para controle de vibrações de um modelo de edifício mostrada na Figura 7.1.2. Essa estrutura compreende um dispositivo para reproduzir vibrações (item 2) que permite o ajuste da frequência de vibração; um modelo de edifício (item 4) montado nesse dispositivo para reproduzir vibrações; e um dispositivo para controlar vibrações (item 3) que é acoplado ao modelo de edifício. Nessa estrutura, as vibrações são geradas pelo movimento rotativo de uma roda excêntrica disposta no dispositivo para reproduzir vibrações (item 2) e o dispositivo para controlar vibrações (item 3) é um pêndulo suspenso fixado no modelo de edifício. A Figura 7.1.2 ainda ilustra o efeito da movimentação desse pêndulo para o controle das vibrações nessa estrutura.

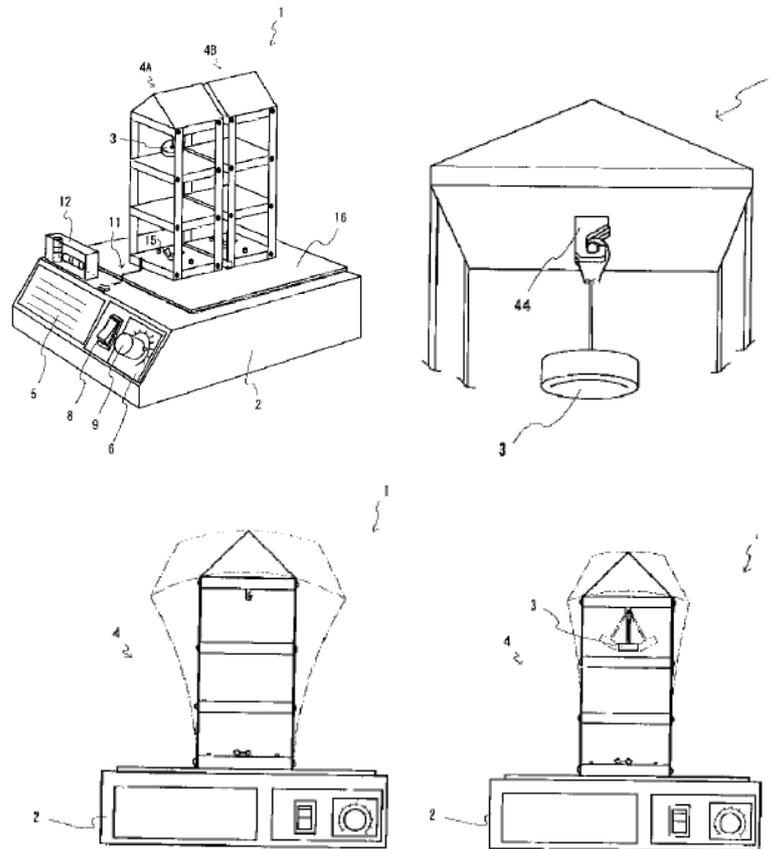


Figura 7.1.2 – Estrutura para controle de vibrações de um modelo de edifício (Kotani e Okabe, 2002).

Kim e Nam (2016) apresentam, na patente KR101624875 (B1), um simulador dinâmico com uma estrutura de teste que pode simular um ensaio sísmico, como mostrado na Figura 7.1.3. Esse simulador compreende uma mesa (item 20) que é fixada a estrutura de teste (item 10); um atuador (item 30); um membro-guia (item 40); e um sensor (item 50), que pode ser um acelerômetro, um sensor de movimento ou uma célula de carga, podendo assim ser utilizado para detectar e mensurar movimentos na estrutura de teste.

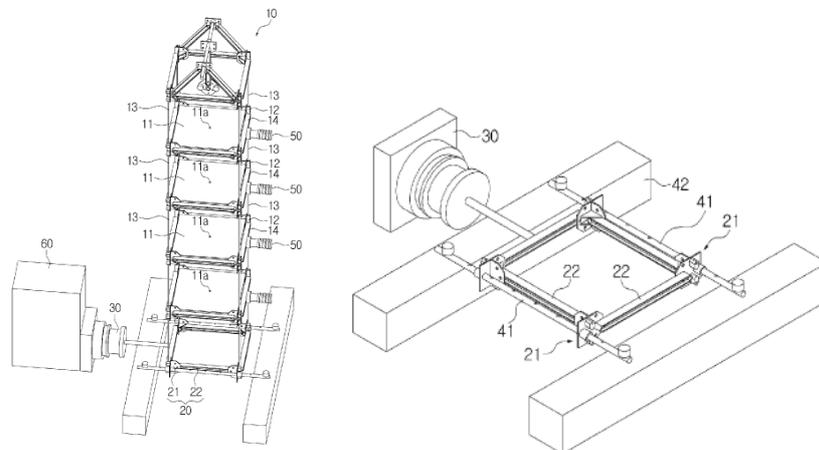


Figura 7.1.3 – Simulador dinâmico com uma estrutura de teste (Kim e Nam, 2016).

## 7.1.2 Outros documentos do estado da técnica

Liao e Mo (2006) apresentam resultados de testes realizados em mesas vibratórias de um pórtico de concreto reforçado com barras de SMA. Essas barras são de liga pseudoelástica de NiTi e suas extremidades eram conectadas a barras de aço através de esticadores, utilizados para pré-deformar as barras de SMA de maneira ajustável. As barras de SMA utilizadas têm 75 cm de comprimento e 1,24 cm de diâmetro. Nos testes realizados, utilizou-se os sismogramas dos terremotos de El Centro, Kobe e Chi-Chi para determinar as acelerações da excitação de base aplicadas à estrutura. As Figuras 7.1.4 e 7.1.5 mostram o pórtico projetado e testado.

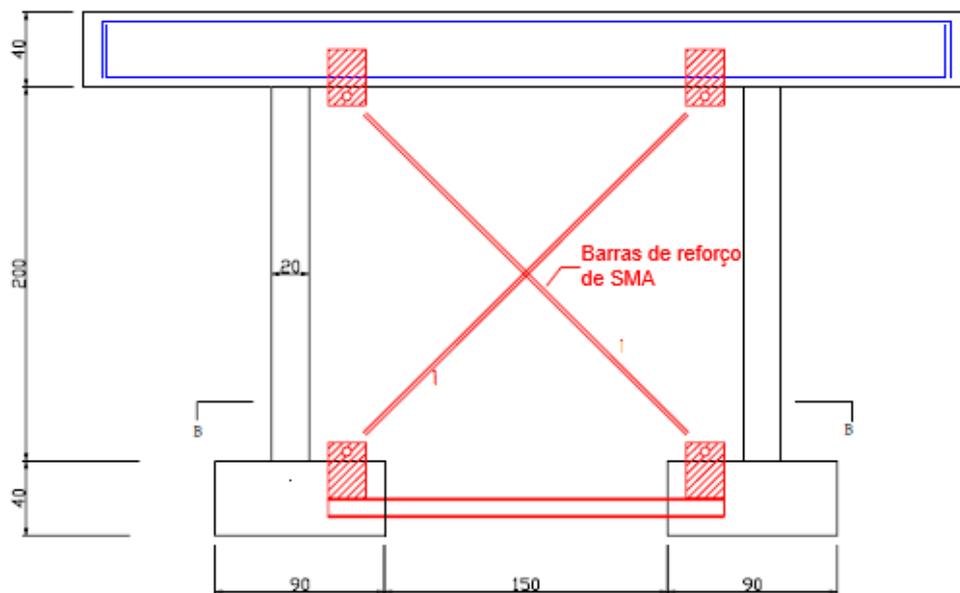


Figura 7.1.4 – Pórtico reforçado com barras de SMA – dimensões em cm (adaptada de Liao e Mo, 2006).



Figura 7.1.5 – Pórtico reforçado com barras de SMA (Liao e Mo, 2006).

Hu e Ahn (2013) revelam, na patente KR101468167 (B1), um pórtico projetado para apresentar bom desempenho em fenômenos sísmicos, mostrado na Figura 7.1.6. O pórtico inclui colunas (item 11) e uma viga (item 13); uma barra de reforço (item 30) instalada na estrutura deste pórtico; e um amortecedor de tubos (item 50) interposto entre a barra de reforço e o pórtico ou entre as barras de reforço para formar uma primeira porção de encaixe e uma segunda porção de encaixe que estão encaixadas na barra de reforço ou no pórtico. O amortecedor de tubos possui um primeiro tubo cilíndrico (item 51) e um segundo tubo cilíndrico (item 53) conectado ao primeiro tubo na direção longitudinal. É revelado que os tubos desse amortecedor são feitos de liga com memória de forma.

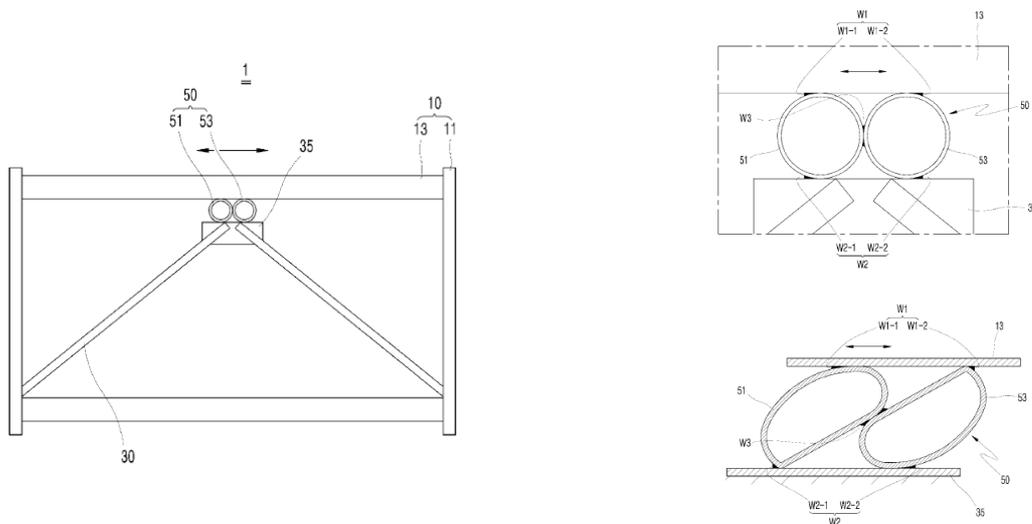


Figura 7.1.6 – Pórtico com amortecedor de SMA (Hu e Ahn, 2013).

## 7.2 Estrutura projetada

Foi projetada uma estrutura de pequeno porte com o objetivo de ser estudada através de testes dinâmicos e simulações numéricas. Essa estrutura foi desenvolvida e dimensionada para ser utilizada em equipamentos para análise dinâmica de estruturas disponíveis no LACTM do CEFET/RJ, como o trilho de demonstração linear mostrado na Figura 7.2.1.

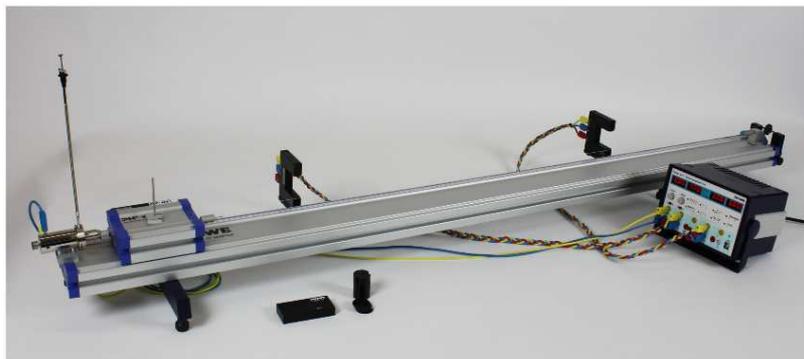


Figura 7.2.1 – Trilho de demonstração (Phywe, 2017).

No aparato experimental disponível no LACTM, o carrinho da Figura 7.2.1 pode ser conectado a um *shaker*. Portanto, a presente estrutura foi projetada para ser fixamente conectada a esse carrinho. Devido às dimensões desse aparato experimental, as principais restrições de projeto dessa estrutura são as suas dimensões e seu peso, pois já que a mesma deve ser fixada no carrinho, deve-se evitar uma estrutura muito pesada e/ou com grandes dimensões.

Em virtude das restrições de projeto, essa estrutura é formada por barras prismáticas, chapas e mancais em alumínio, de modo a resultar em uma estrutura com baixo peso. Cabe também ressaltar que neste projeto todas as peças são previstas para serem de alumínio, exceto os fios de ligas com memória de forma e os isoladores, que são de material polimérico, para evitar problemas em relação ao fenômeno de corrosão galvânica.

Um importante requisito para a estrutura desse projeto é que ele seja desmontável e modular, ou seja, que possa ser adaptado para diversos equipamentos e que possam ser efetuadas alterações em seus componentes. Portanto, as conexões foram definidas como juntas aparafusadas. Ademais, a estrutura possui mancais que são fixados em uma chapa, sendo esta chapa fixada no carrinho exemplificado pela Figura 7.2.1, através de uniões parafusadas que aproveitam os furos preexistentes nesse carrinho.

Seguindo a ideia inicial de projetar uma estrutura modular e de modo a ampliar as possibilidades de testes, a presente estrutura se apresenta em duas configurações: a primeira possui os mancais de apoio formados por juntas pinadas, conforme Figura 7.2.2, e a segunda possui os mancais de apoio formados por juntas engastadas, conforme Figura 7.2.3.

Além disso, as Figuras 7.2.2 e 7.2.3 mostram outra característica dessas configurações, que é permitir que as características dinâmicas das estruturas sejam modificadas, já que é possível anexar massas, a serem fixadas na chapa superior através de um furo roscado presente na mesma, bem como o diâmetro e material do fio, que pode ser de material linear elástico, como o alumínio e aço, ou de SMA, podem ser escolhidos, assim como uma pré-tensão pode ser determinada através dos olhais esticadores de fio, de modo a definir uma determinada rigidez de interesse. Para o caso dos fios de ligas com memória de forma, pode-se adotar fios com comportamento pseudoelástico ou memória de forma a temperatura ambiente.

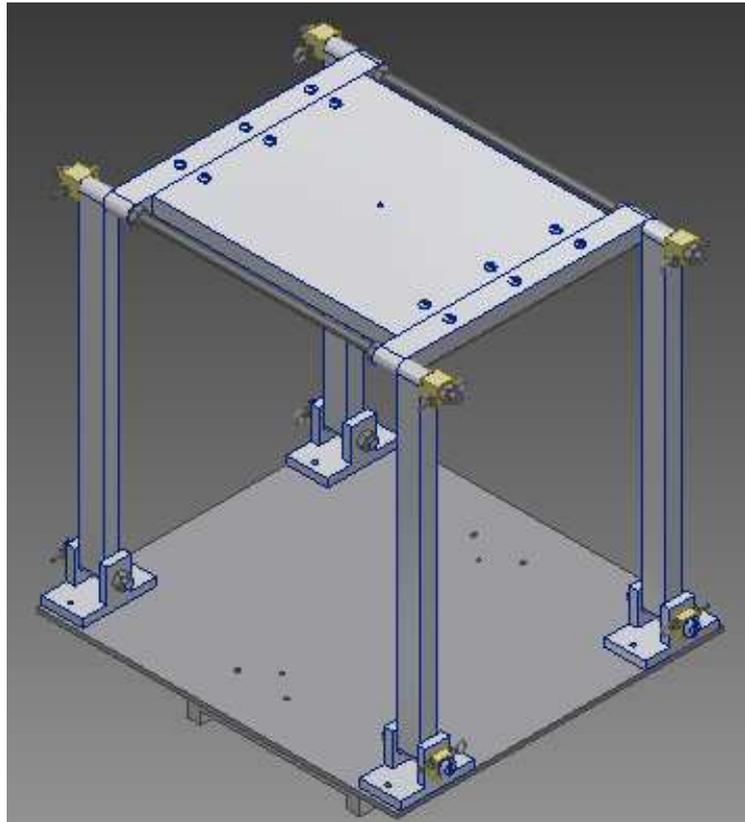


Figura 7.2.2 – Estrutura com mancais de apoio formados por juntas pinadas.

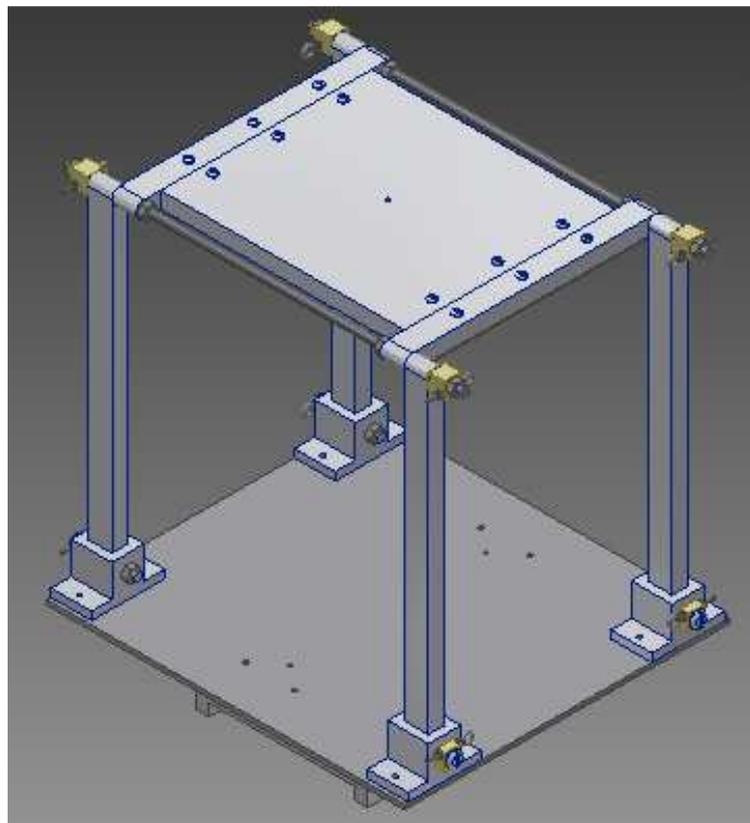


Figura 7.2.3 – Estrutura com mancais de apoio formados por juntas engastadas.

### 7.2.1 Descrição detalhada da estrutura

Conforme descrito na seção anterior, a presente estrutura se apresenta em duas configurações distintas, como mostrado nas Figuras 7.2.2 e 7.2.3, sendo que a única diferença entre essas configurações é o tipo de apoio que cada uma emprega, como estabelecido. Em virtude disso, as características explicitadas na presente seção se referem a essas duas configurações, exceto quando expressamente se define qual configuração está sendo descrita.

A estrutura possui altura total de 225 mm, largura total de 200 mm e profundidade total de 220 mm. Uma chapa de alumínio, por exemplo, de 220 mm x 200 mm x 3 mm é fixada, através de parafusos, ao carrinho exemplificado na Figura 7.2.1. Sobre essa mesma chapa, estão fixados os mancais, que podem ser de juntas pinadas, mostrado na Figura 7.2.4 a), e engastadas, mostrado na Figura 7.2.4 b), dependendo da configuração em questão. Cada mancal possui um elemento isolador inferior, composto de material polimérico, por exemplo ABS (acrilonitrilo-butadieno-estireno) ou nylon, que tem dupla função: isolar eletricamente a estrutura, caso se utilize uma corrente elétrica para aquecer o fio de SMA; e permitir o ajuste da pré-tensão nesse fio de SMA, através dos olhais esticadores.

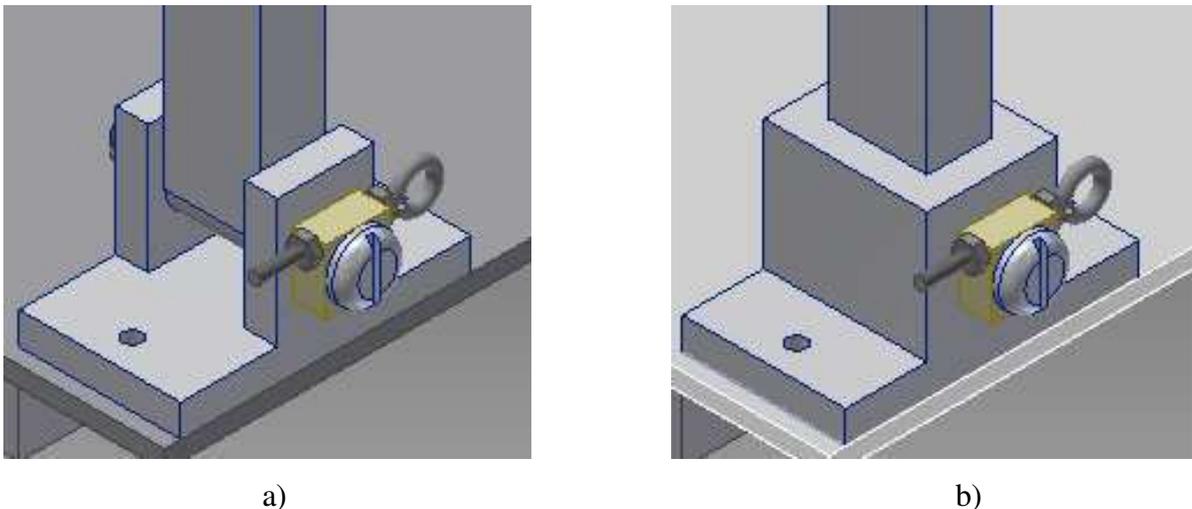


Figura 7.2.4 – Mancais: a) apoios pinados, b) apoios engastados.

Em cada mancal, são fixadas, através de juntas parafusadas, barras prismáticas de seção retangular feitas preferencialmente de alumínio e orientadas na direção vertical, como mostrado na Figura 7.2.5. Cada barra vertical tem, por exemplo, 210 mm de comprimento, 10 mm de largura e 15 mm de espessura. As extremidades inferior e superior dessas barras têm formato semicircular com 5 mm de raio e possuem furos de 5 mm de diâmetro com mesmo centro que esse semicírculo, para fixação dessas barras aos mancais e às barras horizontais.

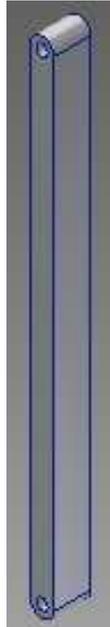


Figura 7.2.5 – Barras verticais.

A estrutura apresenta barras prismáticas de seção retangular feitas preferencialmente de alumínio e orientadas na direção horizontal, como mostrado na Figura 7.2.6. Cada barra horizontal tem, por exemplo, 160 mm de comprimento, 10 mm de largura e 15 mm de espessura. Assim como nas barras verticais, as extremidades inferior e superior das barras horizontais têm formato semicircular com 5 mm de raio e possuem furos de 5 mm de diâmetro com mesmo centro que esse semicírculo, para fixação dessas barras horizontais às barras verticais e aos elementos isoladores superiores, por exemplo, através de um fuso roscado. As barras horizontais têm, por exemplo, três furos passantes com centros colineares de 3 mm de diâmetro, para a fixação dessas barras horizontais à chapa superior.

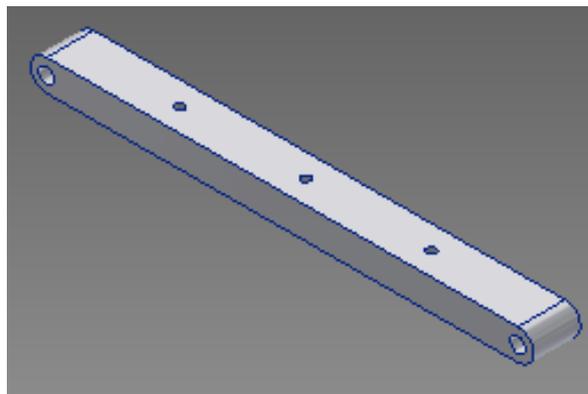


Figura 7.2.6 – Barras horizontais.

A Figura 7.2.7 mostra a fixação das barras horizontais à chapa superior. Essa fixação é feita através de parafusos fixados a uma chapa inferior de pequena espessura, por exemplo de 1 mm. A chapa superior tem as dimensões de, por exemplo, 130 mm x 150 mm x 10 mm. O centro dessa chapa superior

apresenta um furo para a fixação de massas externas, como outras chapas, tarugos e outras peças. A possibilidade de fixar massas externas à estrutura apresenta a vantagem de alterar as frequências naturais da estrutura sem mudar sua configuração de modo permanente. Logo, uma das maneiras de ajustar as características dinâmicas da presente estrutura, entre elas sua massa, é fixar, de modo removível, massas externas a chapa superior.

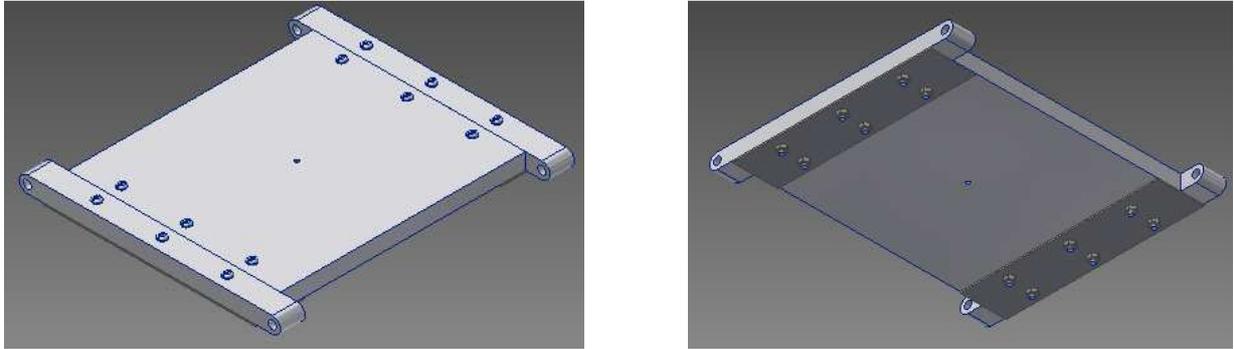


Figura 7.2.7 – Fixação das barras horizontais à chapa superior.

A Figura 7.2.8 mostra a vista frontal da estrutura. É possível notar a fixação da chapa de alumínio ao carrinho e dos mancais à dita chapa. A estrutura apresenta elementos isoladores superiores e inferiores, que possuem olhais esticadores fixados a esses elementos isoladores através de porcas. Esses olhais esticadores têm como função acomodar os fios de SMA (não mostrados). Através do aperto desses olhais esticadores, é possível determinar uma pré-tensão nos fios de SMA e assim alterar a rigidez da estrutura. Caso seja necessário, pode-se inserir terminações elétricas nesses fios de SMA para aquecê-los por meio do efeito Joule. Como os elementos isoladores são feitos de material polimérico, isola-se eletricamente os fios de SMA, evitando assim que a estrutura esteja eletricamente carregada, o que poderia causar acidentes relacionados a choques elétricos.

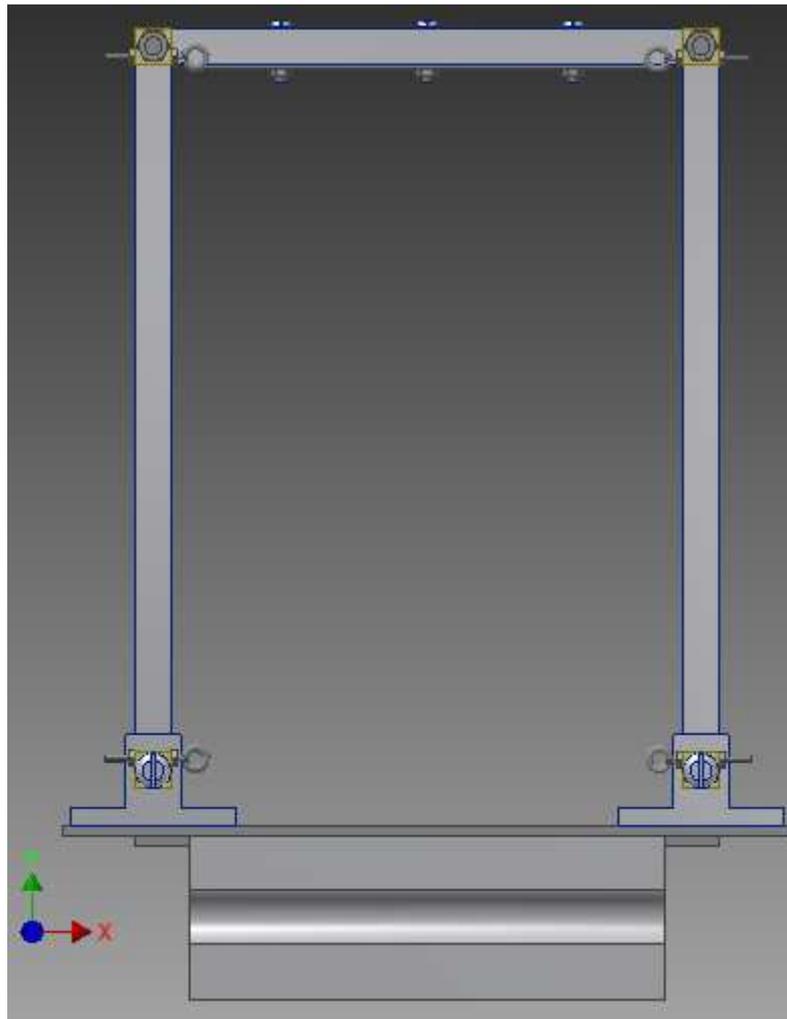


Figura 7.2.8 – Vista frontal da estrutura.

### 7.3 Simulação numérica da estrutura

Foi realizada uma simulação numérica da estrutura do presente projeto através do método de elementos finitos, no software Ansys 18.1. O Apêndice 2 mostra o código referente à estrutura com os fios de ligas com memória de forma, sejam estes pseudoelásticos ou de memória de forma, bem como com fios lineares-elásticos, de alumínio.

O objetivo das simulações aqui realizadas é analisar o comportamento mecânico da estrutura com fios de material linear-elástico, bem como as modificações apresentadas através da utilização dos fios pseudoelásticos e de memória de forma.

A Figura 7.3.1 mostra uma comparação entre o desenho da estrutura, Figura 7.3.1. a), e a sua idealização em elementos finitos, Figura 7.3.1. b).

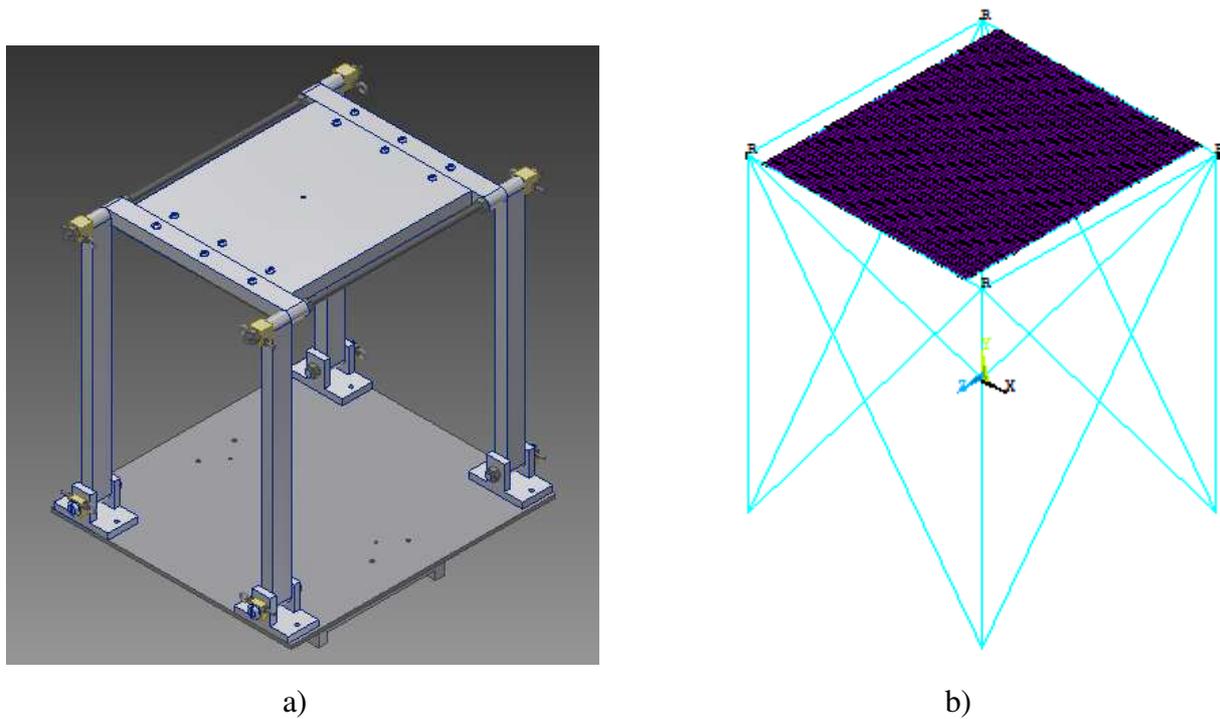


Figura 7.3.1 – Comparação entre o desenho da estrutura (a), e a sua idealização em elementos finitos (b).

### 7.3.1 Geometria e malha

Cabe ressaltar que, a título exemplificativo, foram estudados dois tipos de fio de SMA nas simulações numéricas realizadas: um fio pseudoelástico a temperatura ambiente e um fio de memória de forma a temperatura ambiente, e um fio de alumínio. O fio pseudoelástico tem as mesmas propriedades termomecânicas que o fio ensaiado por Silveira (2017), mostradas na Tabela 6.2. O fio de memória de forma tem as propriedades termomecânicas mostradas nas Tabelas 7.1 e 7.2. Já os outros componentes da estrutura foram considerados de alumínio, como preferencialmente definido para o presente projeto.

Tabela 7.1 – Parâmetros do fio de memória de forma (adaptado de Brinson e Lammering, 1993).

Módulos, massa específica	Temperaturas de transformação	Constantes de transformação	Deformação residual máxima
$E_a = 67 \text{ GPa}$	$M_f = 9 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_M = 8 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$	$\varepsilon_L = 0,067$
$E_M = 26,3 \text{ GPa}$	$M_S = 18,4 \text{ }^\circ\text{C}$	$C_A = 13,8 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$	
$\theta = 0,55 \text{ MPa}/^\circ\text{C}$	$A_S = 34,5 \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_s^{cr} = 100 \text{ MPa}$	
$\rho = 6448,1 \text{ kg/m}^3$	$A_f = 49 \text{ }^\circ\text{C}$	$\sigma_f^{cr} = 170 \text{ MPa}$	

Tabela 7.2 – Parâmetros do fio de memória de forma (adaptado de Brinson e Lammering, 1993).

Parâmetro	Valor	Descrição
C1	696,5 MPa	Coeficiente de endurecimento
C2	322,2 K	Temperatura de referência em um estado livre de tensões aplicadas
C3	85,3 MPa	Raio do domínio elástico
C4	13,8 MPa/K	Fator de dependência da tensão com a temperatura
C5	0,082 mm/mm	Deformação máxima atingida ao final da transformação de fase
C6	26,3 GPa	Módulo de elasticidade da martensita
C7	0,0	Parâmetro de dependência de Lode

A Figura 7.3.2 mostra a malha da estrutura com fios de SMA. Foi realizada uma escolha criteriosa a respeito dos elementos escolhidos para idealizar os componentes da estrutura, assim como uma análise de convergência para definir o tamanho adequado dos elementos. Esta análise de convergência, mostrada na Figura 7.3.3, teve como critério o valor da primeira frequência natural da estrutura reforçada com fios de alumínio.

Os fios de SMA foram simulados como elementos BEAM188, de tipo viga. A escolha desse elemento se deu pelo fato de não apenas reproduzir as características geométricas do fio, mas também pelo fato deste elemento ter suporte para a função TB, SMA do Ansys, que é a função que reproduz o comportamento das ligas com memória de forma.

As barras prismáticas, verticais e horizontais, e os fusos roscados também foram idealizadas como elementos BEAM188, devido a versatilidade desse tipo de elemento, quanto as diversas possibilidades de geometrias de seção transversal.

A chapa superior foi idealizada como elemento SHELL181, de casca, pois esse tipo de elemento apresenta boa eficiência para esse componente. As juntas das barras verticais e horizontais com o fuso roscado foi idealizada como uma junta rotativa, através do elemento MPC184. O elemento MPC184 é um elemento de dois nós que tem apenas um grau primário de liberdade, ou seja, a rotação relativa sobre o eixo de revolução. Esse elemento impõe restrições cinemáticas, de modo que os nós que formam o elemento têm os mesmos deslocamentos. Além disso, apenas uma rotação relativa é permitida sobre esse eixo de revolução, enquanto as rotações sobre as outras duas direções não são permitidas.

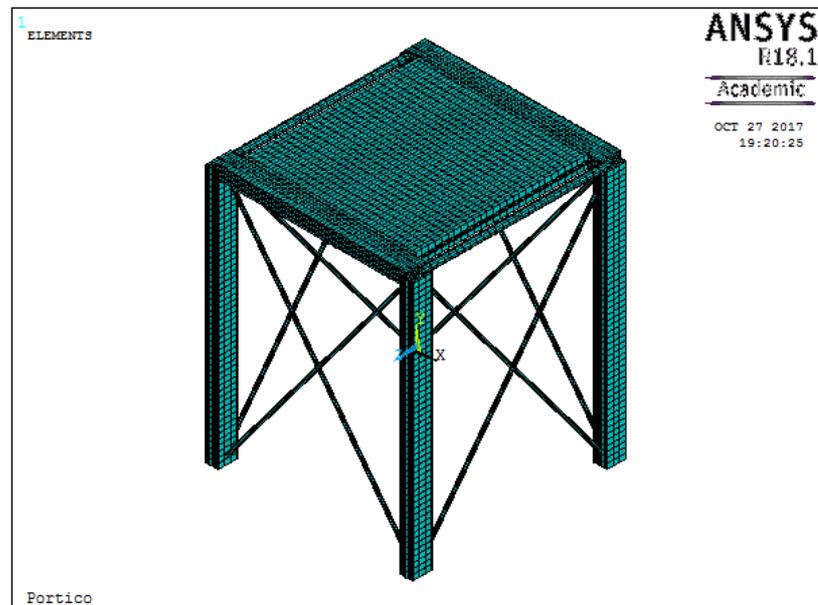


Figura 7.3.2 – Malha de elementos finitos – estrutura com fios de SMA.

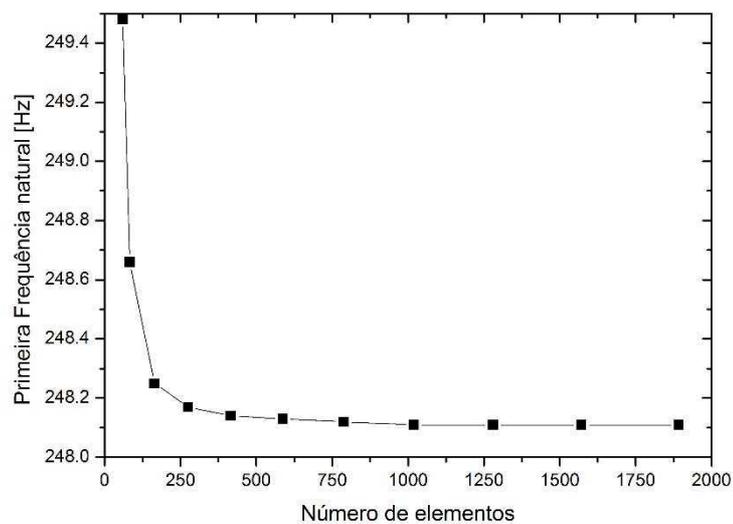


Figura 7.3.3 – Análise de convergência.

### 7.3.2 Propriedades mecânicas

A liga de alumínio escolhida foi a 356.0 tratada termicamente e envelhecida (revenido T6). Considerou-se as seguintes propriedades para o alumínio: tensão de escoamento de 164 MPa, limite de resistência à tração de 228 MPa, módulo de elasticidade de 69 GPa, coeficiente de Poisson de 0,33 e massa específica de 2700 kg/m<sup>3</sup>. Para os fios pseudoelásticos, foram utilizadas as propriedades mostradas na Tabela 6.2 e para os fios de memória de forma, as propriedades da tabela 7.2. Ainda, considerou-se como massa específica dos fios o valor de 6500 kg/m<sup>3</sup> e de diâmetro, 2,5 mm.

De modo a analisar o comportamento mecânico dos fios de ligas com memória de forma selecionados, foram realizadas simulações numéricas no Ansys 18.1 adotando-se as propriedades dos fios pseudoelástico e de efeito memória de forma. As nomenclaturas “pseudoelástico” e “efeito memória de forma” aqui se referem ao comportamento dos fios a temperatura ambiente. Portanto, os fios citados como *pseudoelásticos* apresentam tal efeito em temperatura ambiente e, logo, não precisam de aquecimento para apresentarem um estado austenítico. Já os fios citados como de *efeito memória de forma* estão em estado martensítico na temperatura ambiente e necessitam de uma fonte de calor externa, por exemplo a passagem de uma corrente elétrica, para a austenitização.

A Figura 7.3.4 mostra uma curva tensão x deformação do fio pseudoelástico (a temperatura da análise foi considerada como 25° C), a Figura 7.3.5 mostra a curva tensão x deformação para o fio de efeito memória de forma na temperatura de 25 °C e a Figura 7.3.6 mostra a curva tensão x deformação para o fio de efeito memória de forma na temperatura de 55 °C.

A partir das Figuras 7.3.4 a 7.3.6, observa-se algumas características interessantes das ligas com memória de forma que as fazem ser um material adequado para atenuar vibrações em estruturas. No caso dos fios pseudoelásticos, três características se destacam: com a utilização desse tipo de fio, é possível aumentar a rigidez da estrutura, já que, tipicamente para as SMAs, o módulo de elasticidade da austenita é maior que o da martensita, e, em muitos casos, comparável ao módulo de elasticidade de outros materiais estruturais, como o alumínio; durante a transformação de fase austenita -> martensita induzida por tensão, há um platô de tensão, o que permite que a força exercida sobre a estrutura permaneça aproximadamente constante, evitando assim um aumento de desgaste da estrutura; e a ocorrência do laço de histerese permite a dissipação de energia mecânica e o fato de que, após a retirada do carregamento mecânico, há um substancial retorno ao formato inicial, evitando assim a ocorrência de deformações permanentes na estrutura.

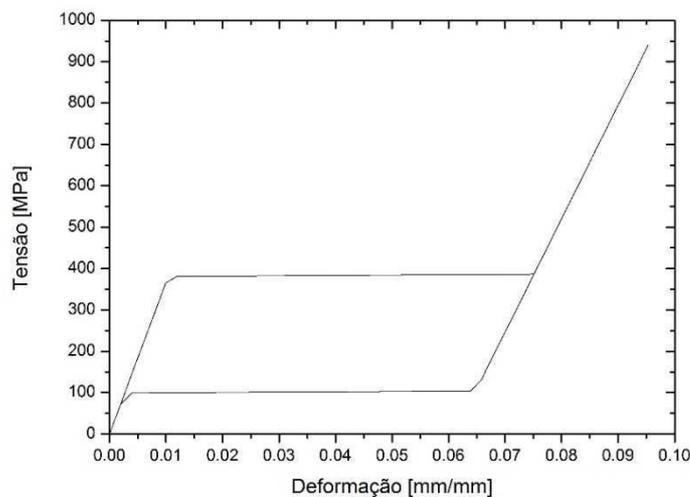


Figura 7.3.4 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico.

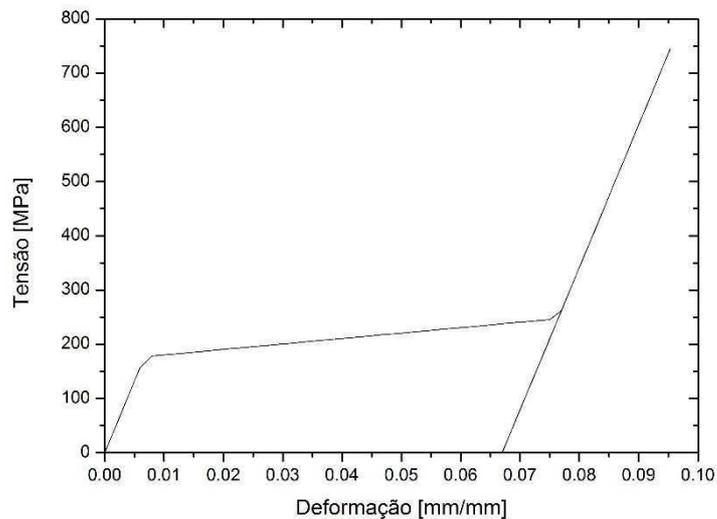


Figura 7.3.5 – Tensão x deformação – Fio de memória de forma –  $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

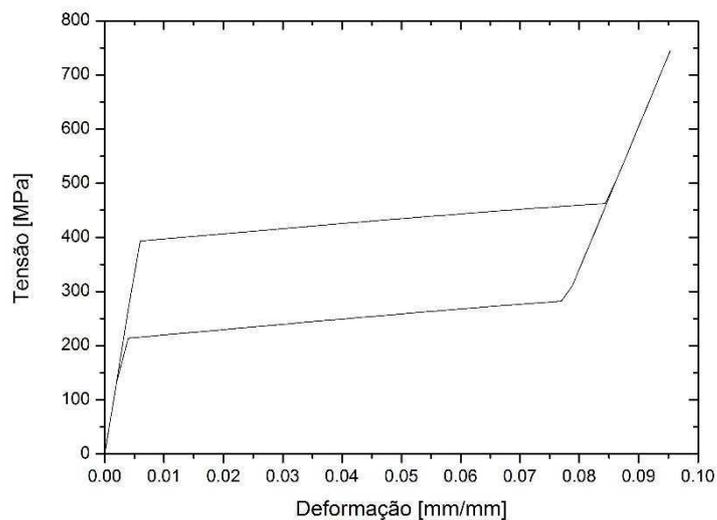


Figura 7.3.6 – Tensão x deformação – Fio de memória de forma –  $T = 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Para os fios de efeito memória de forma, o grande atrativo é a possibilidade de controlar a rigidez da estrutura pela indução de transformações de fases através da variação de temperatura. Pode-se, por exemplo, aquecer o fio de memória de forma por efeito Joule. Como o módulo de elasticidade da austenita é tipicamente maior que aquele da martensita para as SMAs, aumenta-se a rigidez da estrutura quando o fio está no estado austenítico. Dessa forma, os fios de memória de forma podem ser atraentes para estruturas didáticas como essa, pois é possível visualizar a atenuação de vibrações pelo simples aquecimento do fio a uma temperatura suficiente para a austenitização deste. Além disso, desde

que o estado austenítico seja mantido, as vantagens obtidas com os fios pseudoelásticos também se verificam com os fios de memória de forma.

Entretanto, uma desvantagem importante das ligas com memória de forma para o presente projeto é o fato de que as transformações de fase induzidas por tensão começam a ocorrer tipicamente em valores de tensão elevados em comparação ao escoamento do material da estrutura, nesse caso, o alumínio. Mesmo assim, os fios de SMA apresentam características de grande interesse para equipamentos didáticos como a estrutura do presente projeto, pois é possível ilustrar os principais fenômenos que ocorrem nessas ligas assim como seus efeitos nas características dinâmicas da estrutura em questão.

### **7.3.3 Solução**

De modo a avaliar o comportamento mecânico da estrutura projetada, inclusive o comportamento dinâmico da mesma, são realizadas análises modais, harmônicas e estáticas, como será apresentado e discutido.

#### **7.3.3.1 Análise modal**

A simulação numérica apresentada nesta subseção é uma análise modal da estrutura, com o objetivo de definir as frequências naturais e modos de vibração da mesma. Cabe ressaltar que, nesse momento, as não-linearidades, sejam elas geométricas ou constitutivas, não estão sendo consideradas na análise dinâmica, em virtude do tipo de análise feita, isto porque análises modais são análises lineares e, portanto, não suportam as não-linearidades.

Foram selecionados as três primeiras frequências naturais e modos de vibração na presente análise e foi determinado a opção do algoritmo de Block Lanczos para essa solução. Ademais, as simulações foram realizadas considerando as duas configurações da estrutura, ou seja, com os apoios pinados e engastados, bem como com os dois tipos de fios de SMAs estudados, isto é, fios pseudoelásticos e de efeito memória de forma, e os fios lineares elásticos, de alumínio.

No caso da configuração com apoios pinados, considerou-se fixos todos os graus de liberdade dos pontos de apoio, exceto a rotação em torno do eixo Z, mostrado na Figura 7.3.2. Já para a configuração com apoios engastados, foram considerados fixos todos os graus de liberdade dos pontos de apoio.

### 7.3.3.1.1 Pós-processamento

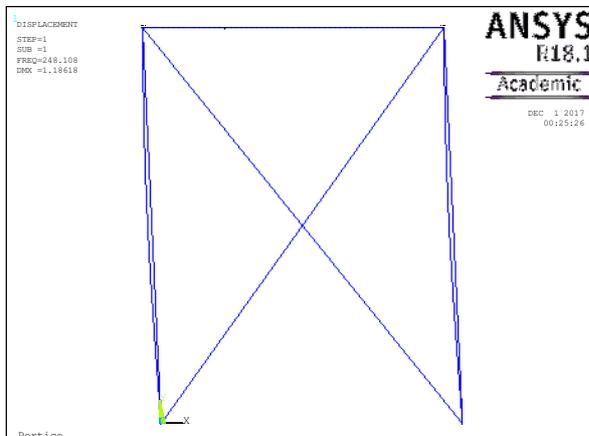
A seguir, serão apresentados os resultados das frequências naturais e modos de vibração para as duas configurações da estrutura: com os apoios pinados e engastados.

#### 7.3.3.1.1.1 Apoios pinados

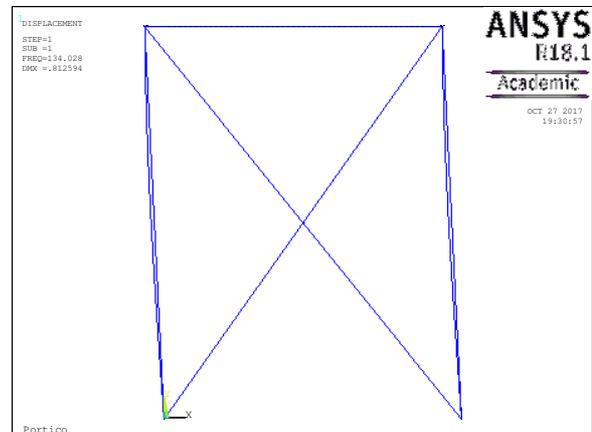
A tabela 7.3 mostra as três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios pinados. Já as Figuras 7.3.7 a 7.3.9 mostram os três primeiros modos de vibração da mesma.

Tabela 7.3 – Três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios pinados.

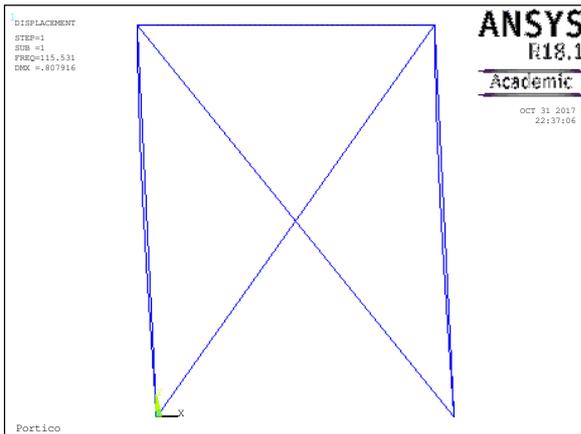
Índice	Frequência natural (Hz)			
	com fios de alumínio	com fios pseudoelásticos	com fios de memória de forma	
			estado martensítico	estado austenítico
1	248,1	134,0	115,3	176,8
2	289,4	164,0	147,1	202,7
3	398,2	250,3	223,8	312,8



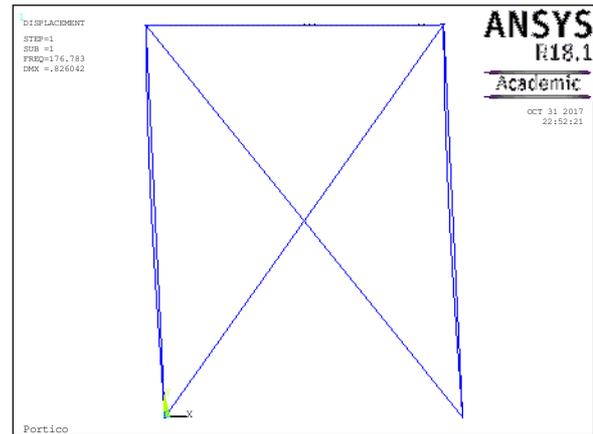
(a)



(b)

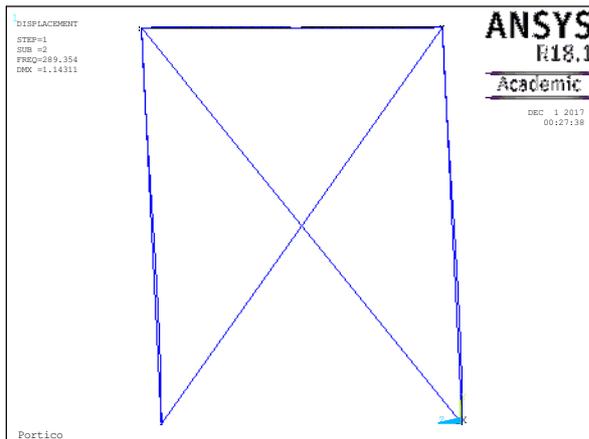


(c)

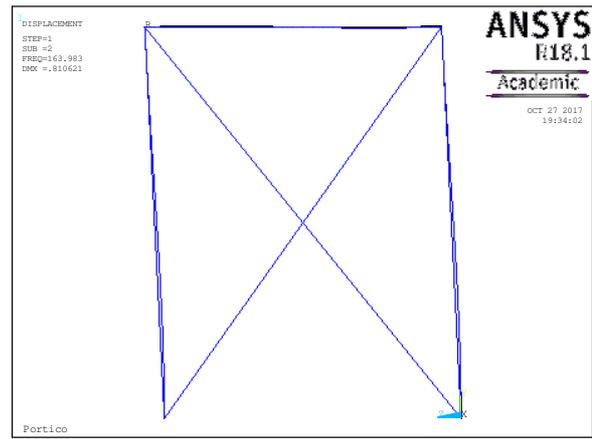


(d)

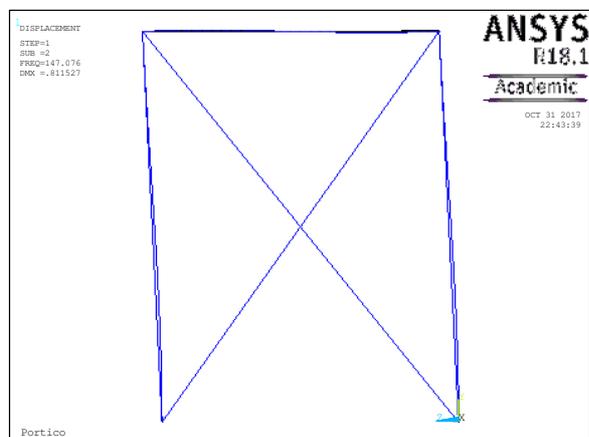
Figura 7.3.7 – Primeiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.



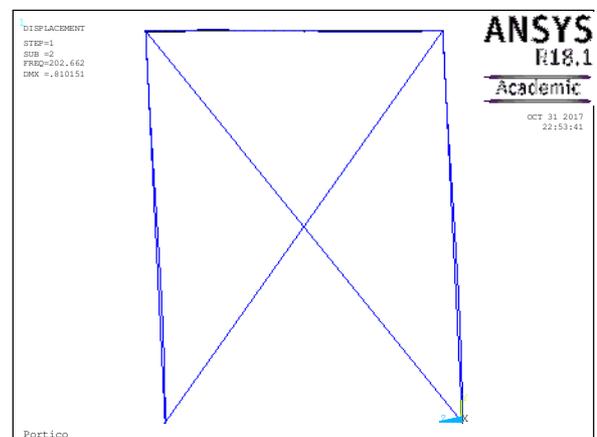
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.3.8 – Segundo modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.

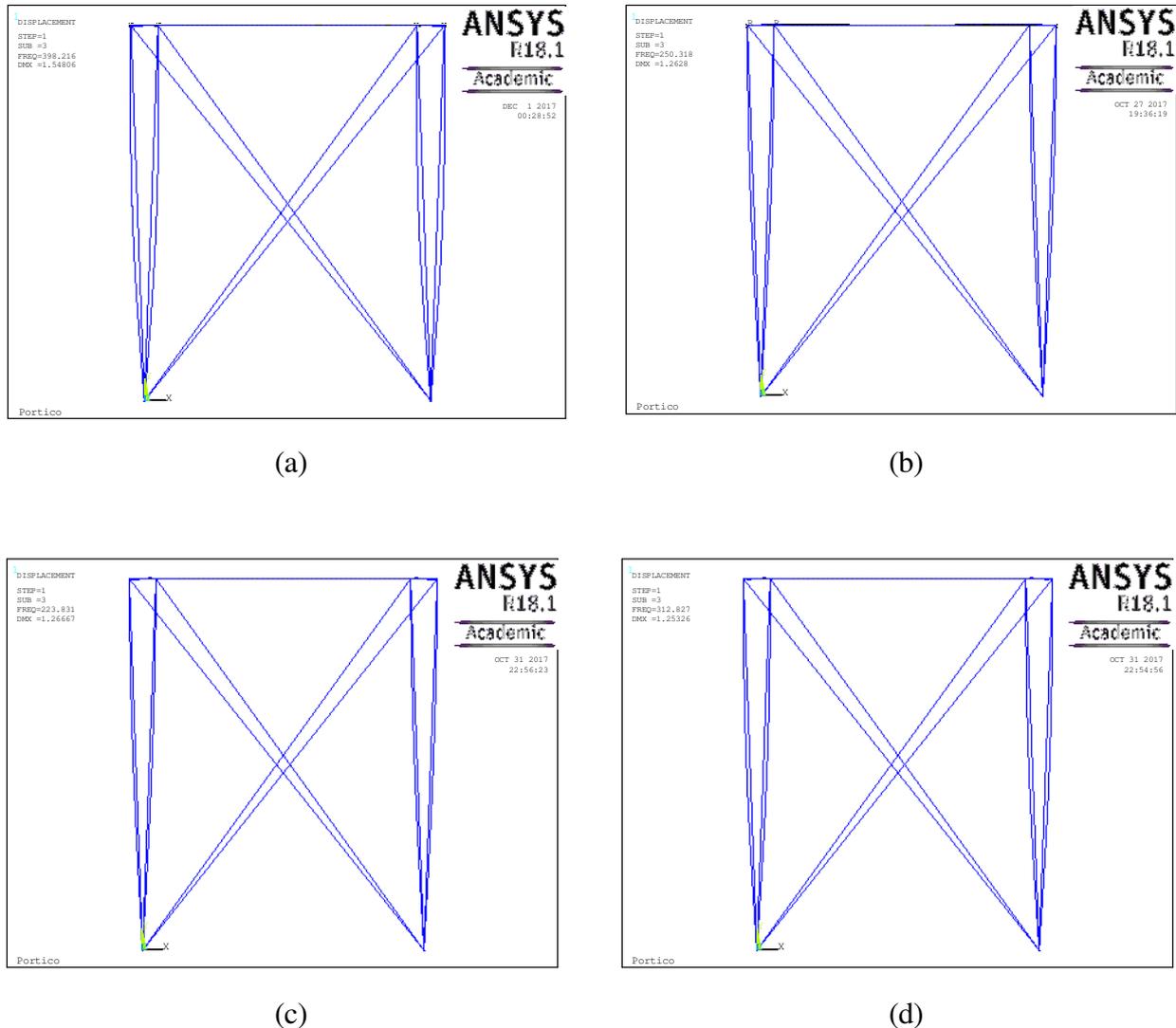


Figura 7.3.9 – Terceiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.

O primeiro modo de vibração é aquele de maior interesse para o presente projeto, pois esse modo é caracterizado por um movimento lateral na estrutura, o que é semelhante ao movimento induzido pelo equipamento disponível no LACTM.

Nesse sentido, a partir da Tabela 7.3, observa-se que os fios de alumínio apresentaram os maiores valores de frequência natural (primeira: 248,1 Hz, segunda: 289,4 Hz, e terceira: 398,2 Hz), devido ao módulo de elasticidade deste material, próximo ao módulo de elasticidade da liga de SMA do fio denominado de efeito memória de forma no seu estado austenítico, e pela sua relativamente baixa

massa específica, de  $2700 \text{ kg/m}^3$ . Já os fios pseudoelásticos apresentaram as frequências de 134,0, 164,0 e 250,3 Hz, respectivamente.

De modo semelhante, os fios de efeito memória de forma, proporcionaram um aumento de rigidez na estrutura. A característica típica das ligas com memória de forma de possuir módulo de elasticidade maior no estado austenítico do que no estado martensítico possibilita a alteração das características dinâmicas de uma estrutura pela simples austenitização do fio, por exemplo através da passagem de uma corrente elétrica, como sugerido no presente projeto, ou por qualquer outro meio de aquecimento.

Em relação a isso, a primeira frequência natural foi aumentada em 53,3% com a austenitização dos fios de efeito memória de forma, a segunda frequência natural, em 37,8% e a terceira frequência natural, em 39,8%.

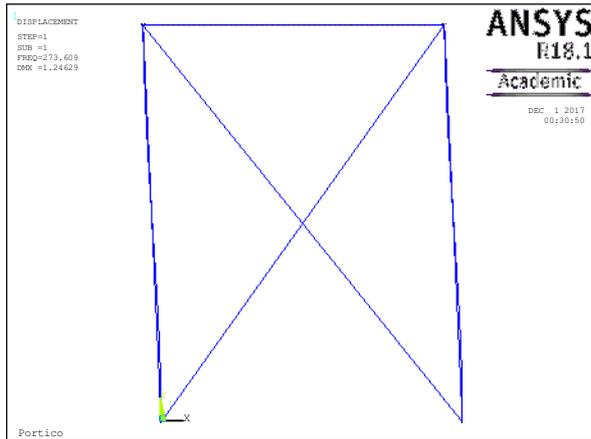
Constata-se que a adição dos fios de efeito memória de forma também foram um meio efetivo para aumento de rigidez na estrutura. Ademais, a utilização de fios de efeito memória de forma ainda possibilita a observação da mudança das propriedades mecânicas das ligas com memória de forma, o que é de interesse para uma estrutura para fins didáticos, como a estrutura do presente projeto.

### 7.3.3.2 Apoios engastados

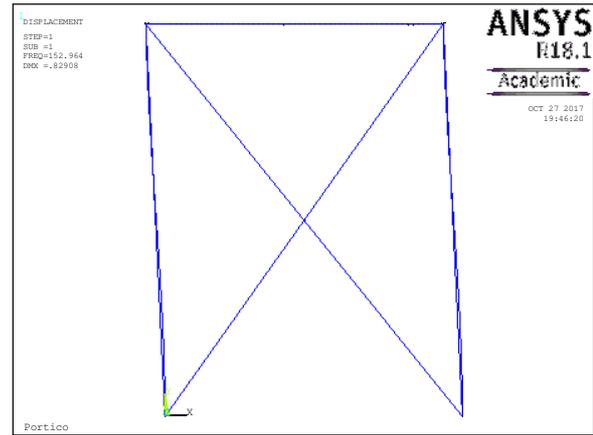
A tabela 7.4 mostra as três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios engastados. Já as Figuras 7.3.10 a 7.3.12 mostram os três primeiros modos de vibração da mesma.

Tabela 7.4 – Três primeiras frequências naturais da estrutura com apoios engastados.

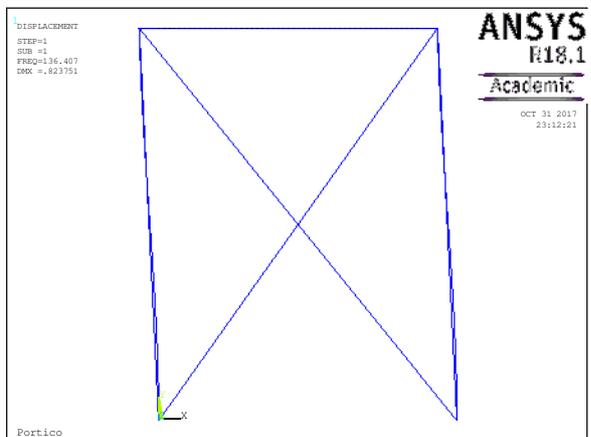
Índice	Frequência natural (Hz)			
	com fios de alumínio	com fios pseudoelásticos	com fios de memória de forma	
			estado martensítico	estado austenítico
1	273,6	153,0	136,4	192,6
2	289,4	164,0	147,1	202,7
3	426,1	267,2	241,2	328,9



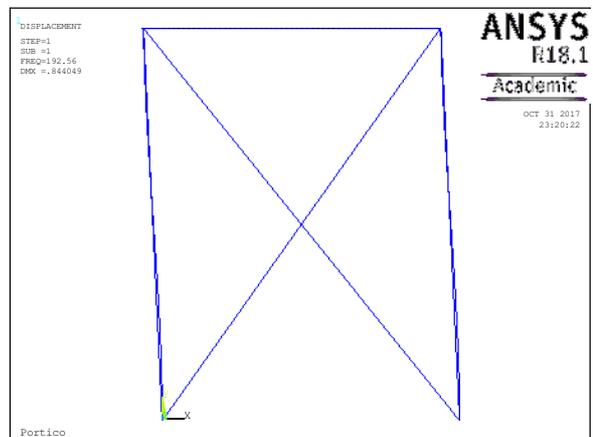
(a)



(b)

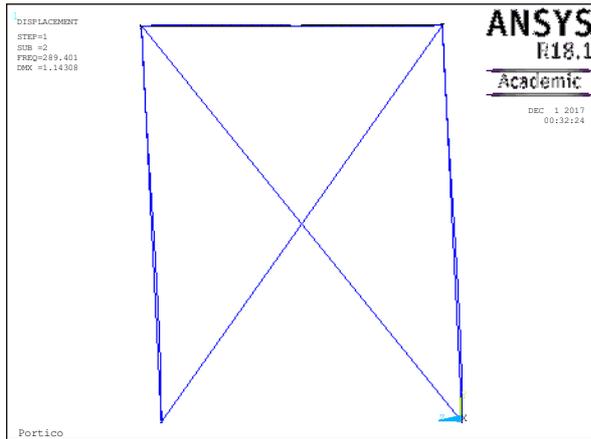


(c)

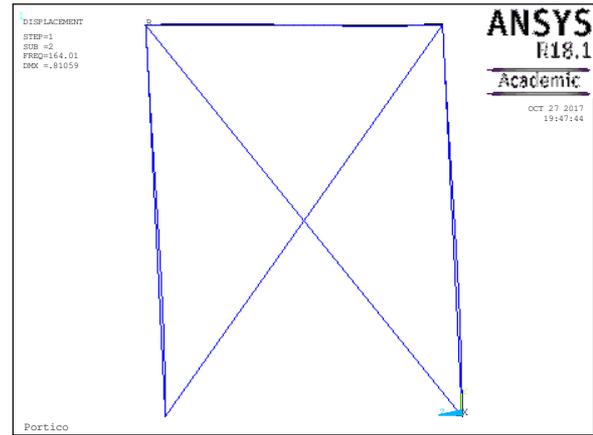


(d)

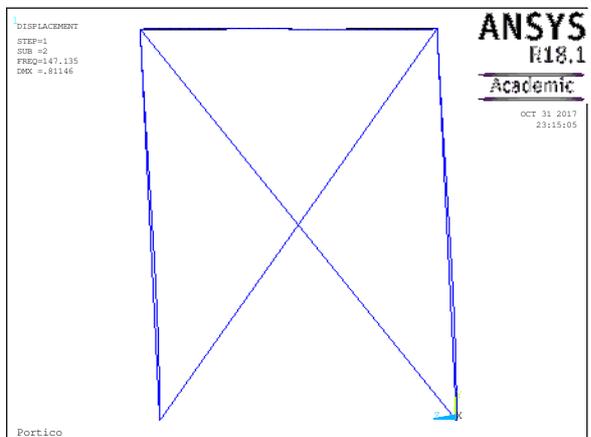
Figura 7.3.10 – Primeiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.



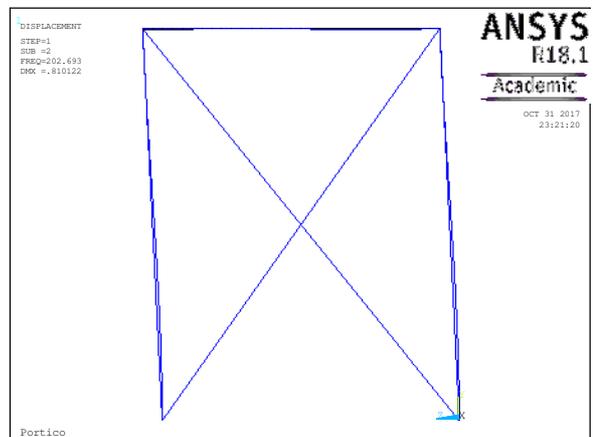
(a)



(b)

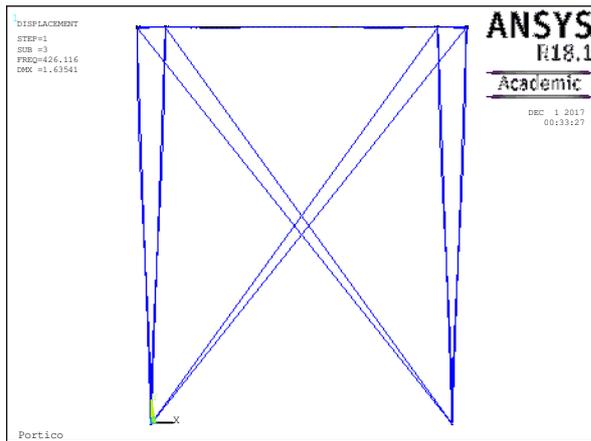


(c)

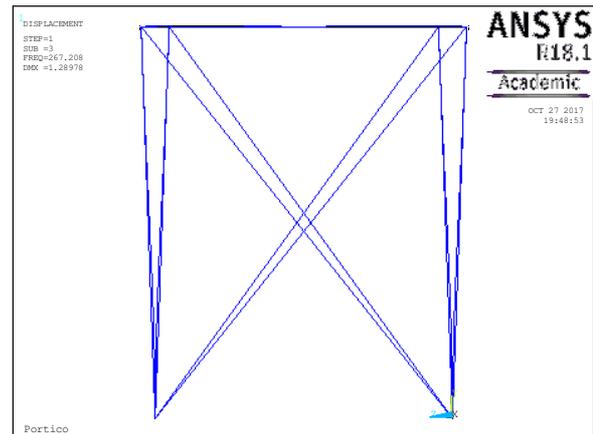


(d)

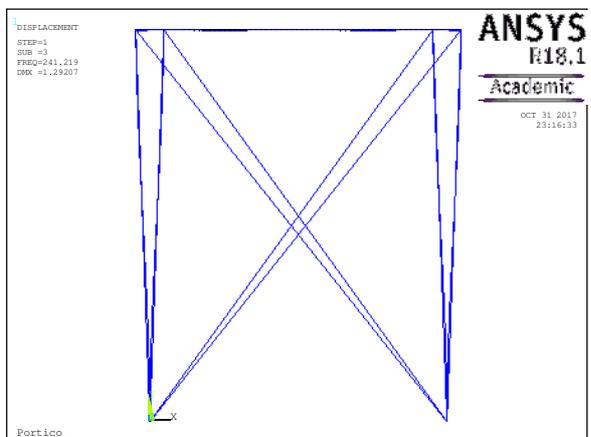
Figura 7.3.11 – Segundo modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.



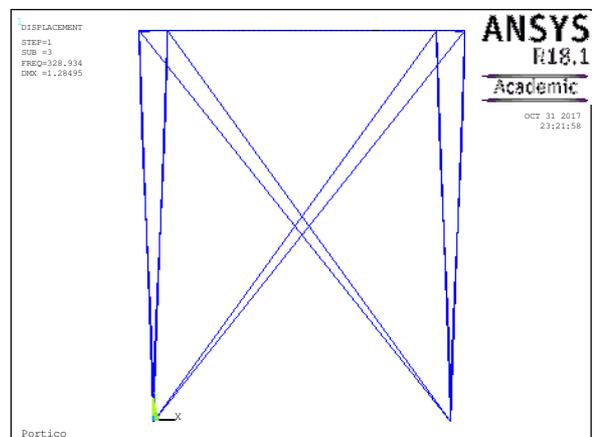
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.3.12 – Terceiro modo de vibração da estrutura: (a) com fios de alumínio, (b) com fios pseudoelásticos, (c) com fios de memória de forma no estado martensítico, (d) com fios de memória de forma no estado austenítico.

De modo análogo ao que foi discutido para a estrutura com apoios pinados, ressalta-se que o primeiro modo de vibração é aquele de maior interesse. Dessa forma tem-se que, com base na Tabela 7.4, os fios de alumínio apresentaram os maiores valores de frequência natural, devido às suas propriedades, como explicado na subseção 7.3.3.1. A estrutura com fios pseudoelásticos apresentou as seguintes frequências naturais: 153,0 Hz (primeira), 164,0 Hz (segunda) e 267,2 Hz (terceira).

Para a estrutura com apoios engastados, os fios de efeito memória de forma também proveram uma maior rigidez à estrutura quando estavam no estado austenítico: houve uma variação de 41,2% na primeira frequência natural com a austenitização dos fios de efeito memória de forma, de 37,8 % na segunda frequência natural e de 36,4 % na terceira frequência natural.

Por fim, nota-se que a diferença entre as restrições de movimento das duas configurações da estrutura analisadas, isto é, com apoios pinados (rotação em Z nos apoios é permitida) e engastados (rotação em Z nos apoios não é permitida), não foi relevante para alterar a segunda frequência natural, cujo modo de vibração associado é caracterizado por um movimento de rotação em torno do eixo X. Em outras palavras, a segunda frequência natural encontrada foi igual para a estrutura com apoios pinados e engastados.

### **7.3.3.2 Análise harmônica**

Será apresentada nesta subseção uma análise harmônica da estrutura, com o objetivo de avaliar as alterações no comportamento dinâmico da estrutura através da utilização dos fios de liga com memória de forma, sejam estes pseudoelásticos ou de efeito memória de forma. Ressalta-se que, pelo tipo de análise aqui adotada, as não-linearidades não estão sendo consideradas, isto é, análises harmônicas, bem como as análises modais, são análises lineares e, portanto, não suportam as não-linearidades, sejam geométricas ou constitutivas.

Nas análises descritas nessa subseção, foram simulados carregamentos harmônicos de 500 N aplicados nos nós superiores da estrutura, com faixa de frequência entre 0 e 350 Hz, de modo a investigar as regiões de ressonância da estrutura, com fios de liga com memória de forma e com fios de alumínio, considerando as duas configurações da estrutura, ou seja, com os apoios pinados e engastados.

#### **7.3.3.2.1 Pós-processamento**

A seguir, serão apresentados os resultados das análises harmônicas para as duas configurações da estrutura: com os apoios pinados e engastados.

##### **7.3.3.2.1.1 Apoios pinados**

As Figuras 7.3.13 a 7.3.16 mostram os resultados da análise harmônica da estrutura com apoios pinados. As figuras 7.3.13 e 7.3.14 ilustram a utilização dos fios pseudoelásticos e de alumínio na estrutura deste projeto.

Na figura 7.3.13, o carregamento harmônico foi aplicado na direção X, de modo a reproduzir um movimento lateral na estrutura e, assim, representar o primeiro modo de vibração da mesma, quando a frequência de excitação alcança a primeira frequência natural da estrutura.

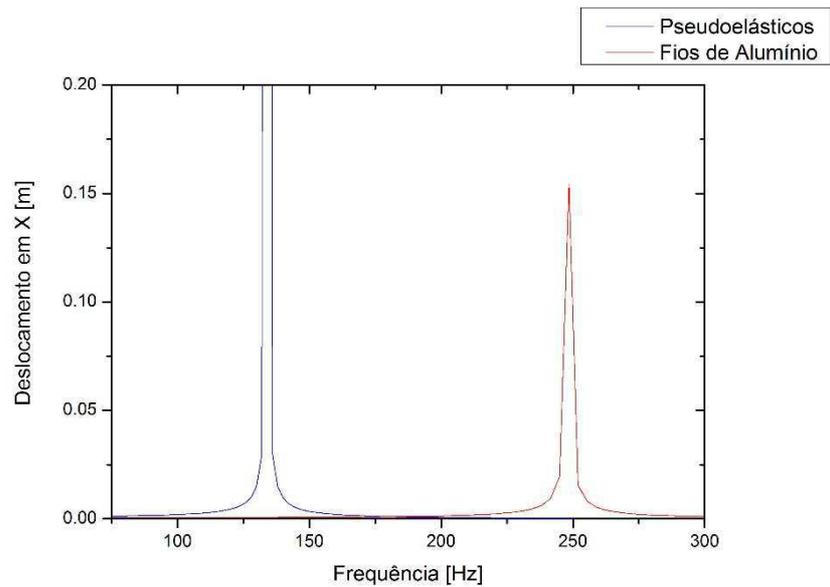


Figura 7.3.13 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.

Na simulação retratada pela Figura 7.3.14, utilizou-se o carregamento harmônico aplicado na direção Z, dessa forma reproduzindo os segundo e terceiro modos de vibração da estrutura, quando a frequência de excitação se igualava às segunda e terceira frequências naturais, respectivamente.

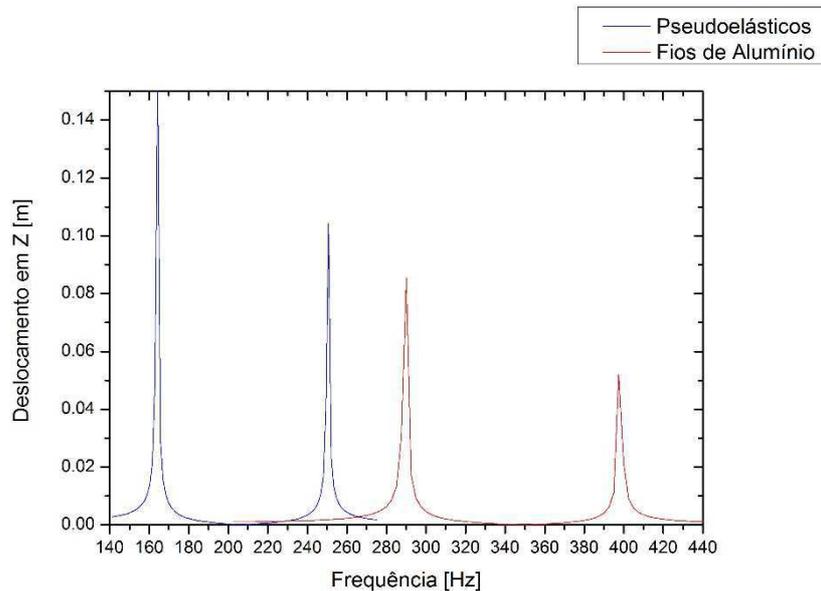


Figura 7.3.14 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.

As simulações representadas pelas Figuras 7.3.15 e 7.3.16 mostram a utilização dos fios de efeito memória de forma. Na Figura 7.3.15, o carregamento harmônico é aplicado na direção X, de modo a reproduzir o primeiro modo de vibração quando a frequência de excitação se iguala à primeira frequência natural. Já na Figura 7.3.16, tal carregamento é aplicado na direção Z, dessa forma

reproduzindo os segundo e terceiro modos de vibração da estrutura, quando a frequência de excitação se igualava às segunda e terceira frequências naturais, respectivamente.

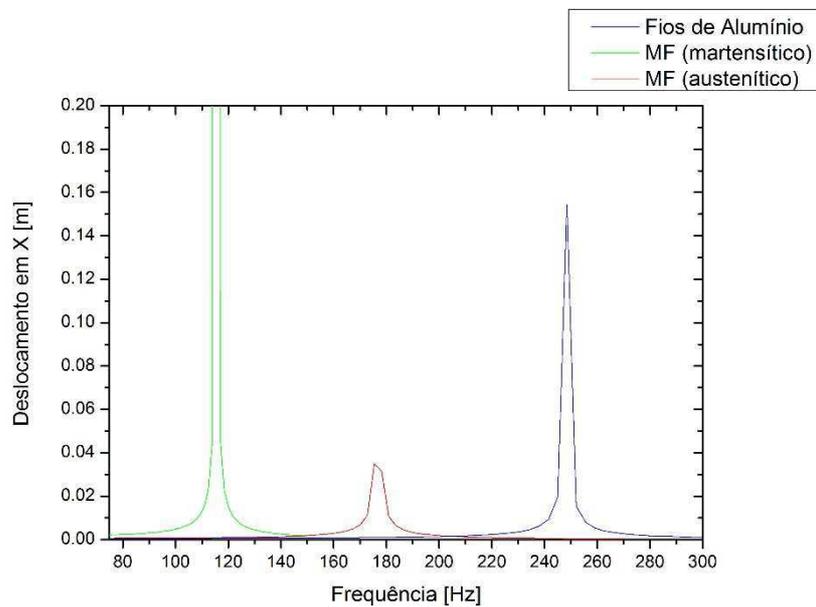


Figura 7.3.15 – Análise harmônica – Estrutura com fios de efeito memória de forma e de alumínio.

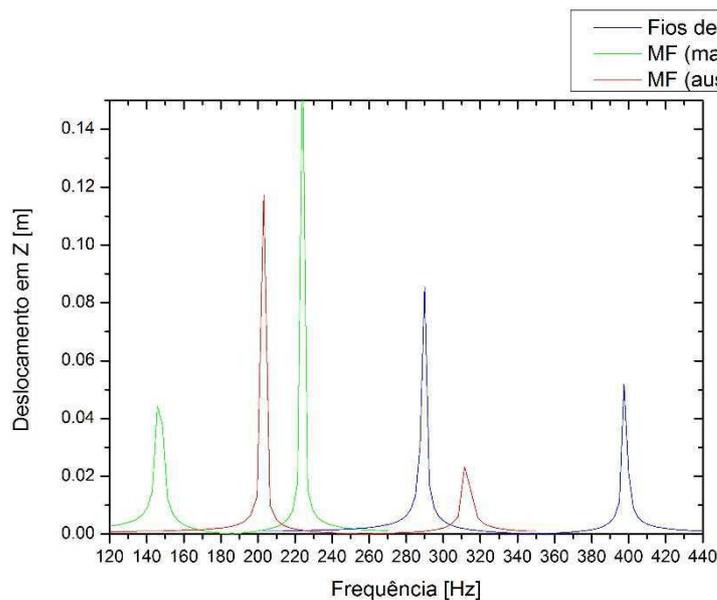


Figura 7.3.16 – Análise harmônica – Estrutura com fios de efeito memória de forma e de alumínio.

### 7.3.3.2.1.2 Apoios engastados

As Figuras 7.3.17 a 7.3.20 mostram os resultados da análise harmônica da estrutura com apoios engastados. As Figuras 7.3.17 e 7.3.18 ilustram a utilização dos fios pseudoelástico na estrutura. Na Figura 7.3.17, o carregamento harmônico foi aplicado na direção X, de modo a reproduzir um movimento lateral na estrutura, típico do primeiro modo de vibração nesta estrutura.

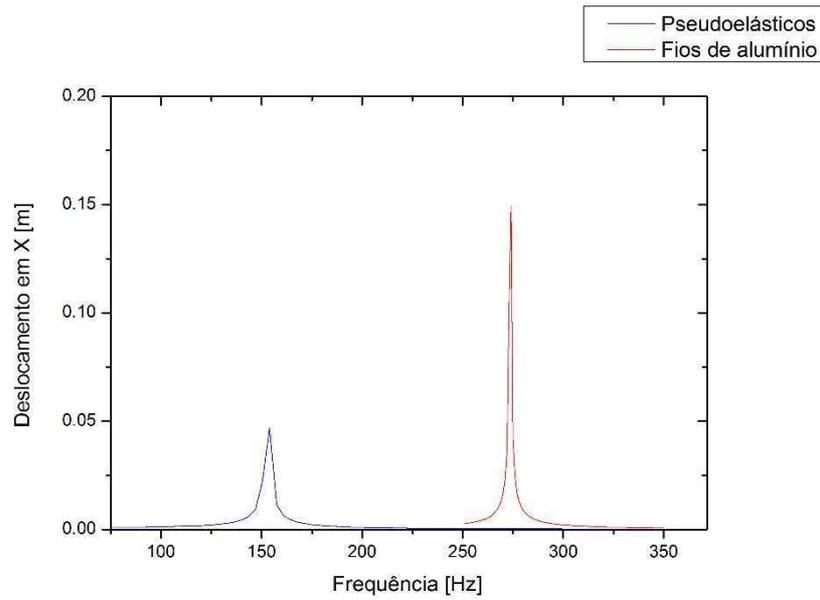


Figura 7.3.17 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.

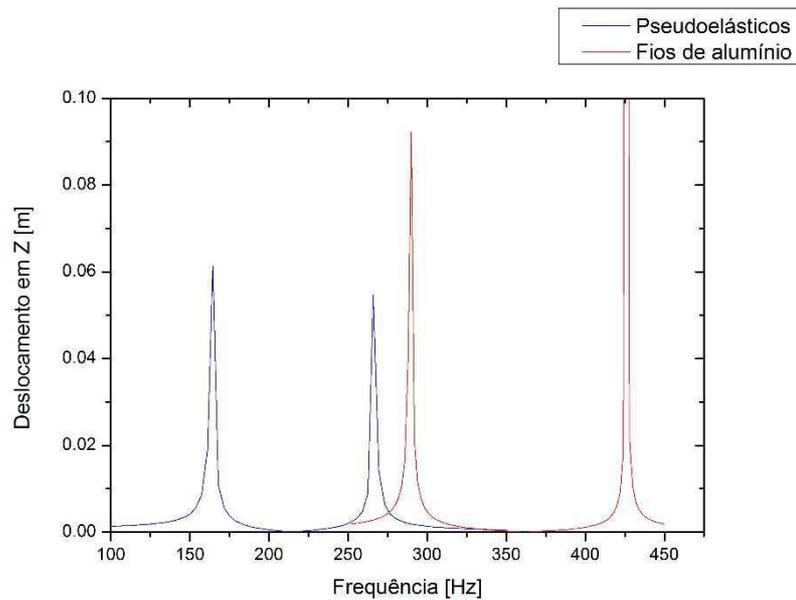


Figura 7.3.18 – Análise harmônica – Estrutura com fios pseudoelásticos e de alumínio.

Para a estrutura com apoios engastados, a utilização dos fios pseudoelásticos proporcionou uma atenuação das vibrações nas regiões de frequências próximas às frequências naturais da estrutura com fios de alumínio, como mostrado nas Figuras 7.3.17 e 7.3.18.

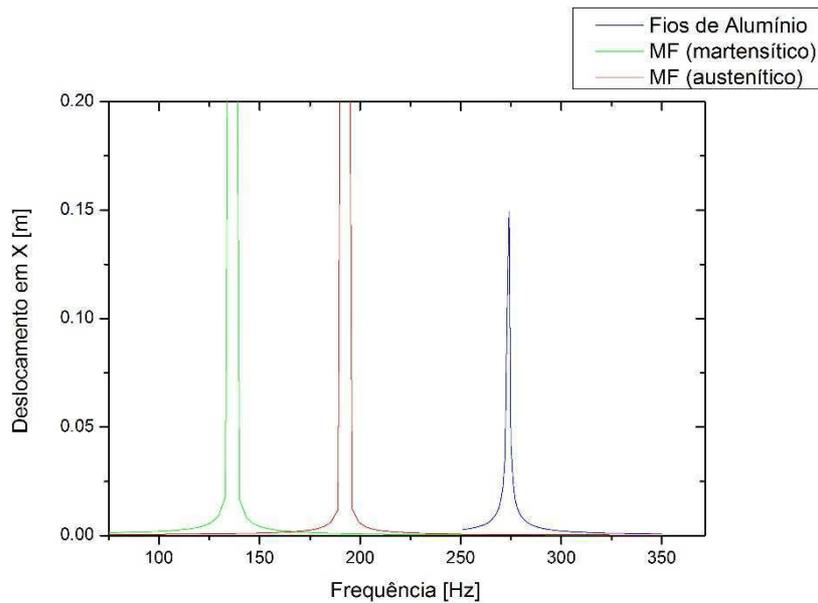


Figura 7.3.19 – Análise harmônica – Estrutura com fios de alumínio e com fios de efeito memória de forma.

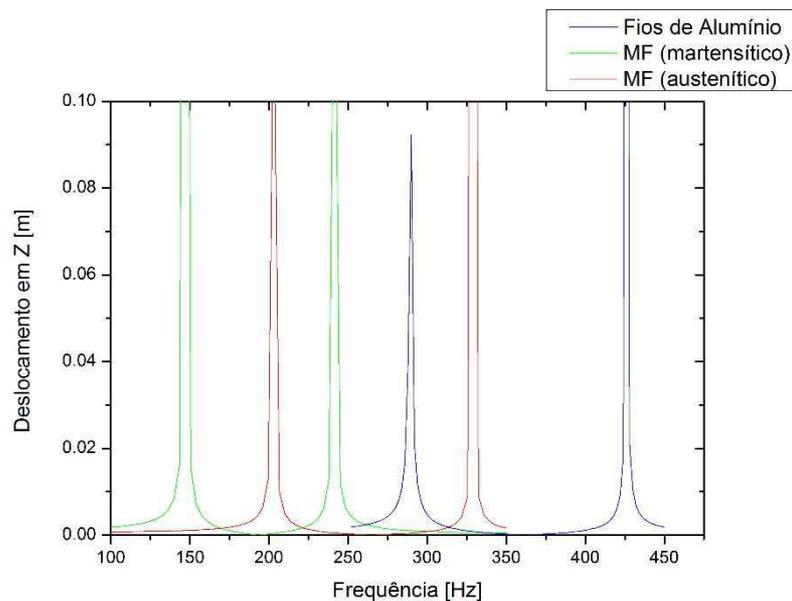


Figura 7.3.20 – Análise harmônica – Estrutura com fios de alumínio e com fios de efeito memória de forma.

As figuras 7.3.19 e 7.3.20 mostram a utilização dos fios de efeito memória de forma. A Figura 7.3.19 ilustra a aplicação do carregamento harmônico na direção X, reproduzindo o movimento lateral típico do primeiro modo de vibração da estrutura. A Figura 7.3.20 mostra aplicação do carregamento na direção Z, de modo a exibir os segundo e terceiro modos de vibração da estrutura, quando a frequência de excitação se igualava às segunda e terceira frequências naturais, respectivamente.

Os fios de efeito memória de forma também foram capazes de modificar as características dinâmicas da estrutura com apoios engastados, aumentando a rigidez desta estrutura, sobremaneira quando os fios estão no estado austenítico.

### **7.3.3.3 Análise estática**

Será apresentada nesta subseção uma análise estática das configurações da estrutura com apoios pinados e engastados, com o objetivo de avaliar as alterações no comportamento mecânico da estrutura pela utilização dos fios de SMA pseudoelásticos e de efeito memória de forma e, principalmente, a dissipação de energia devido a formação do laço de histerese e quantidade de martensita formada. Ressalta-se que, nesta análise, as não-linearidades geométricas e constitutivas estão sendo consideradas.

Nas análises descritas nessa subseção, foram simulados carregamentos de força prescrita de onda triangular com valor máximo de 2500 N, para a estrutura com apoios pinados, e de 3200 N, para a estrutura com apoios engastados, aplicados nos nós superiores da estrutura.

#### **7.3.3.3.1 Pós-processamento**

A seguir, serão apresentados e discutidos os resultados das análises estáticas da estrutura com os apoios pinados com os fios de alumínio, fios pseudoelásticos e com fios de efeito memória de forma.

##### **7.3.3.3.1.1 Apoios pinados**

Nesta subseção, as simulações foram realizadas considerando as configurações da estrutura com apoios pinados.

###### **7.3.3.3.1.1.1 Estrutura com fios de alumínio**

A Figura 7.3.21 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com os fios de alumínio. Já as Figuras 7.3.22 e 7.3.23 mostram um gráfico tensão x deformação em um dos fios de alumínio e as tensões na direção X na situação de forçamento máximo, que é a mais crítica no caso analisado, respectivamente.

Das Figuras 7.3.22 e 7.3.23, depreende-se que, com o carregamento aplicado na estrutura com fios de alumínio, haveria falha destes, pois as tensões ultrapassaram o limite de ruptura do alumínio.

Ressalta-se, entretanto, que as análises aqui realizadas não consideraram efeitos de plasticidade do alumínio.

Dessa forma, de modo a evitar danos na estrutura, faz-se necessário a utilização de elementos dissipadores de energia, que no presente projeto são os fios de ligas com memória de forma.

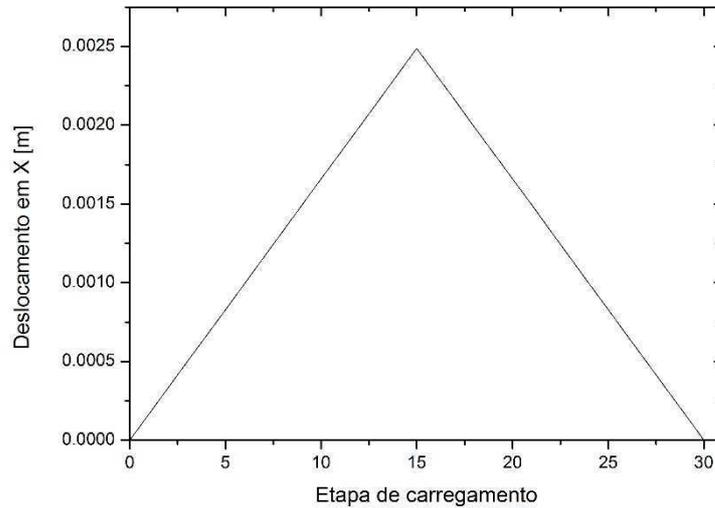


Figura 7.3.21 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de alumínio.

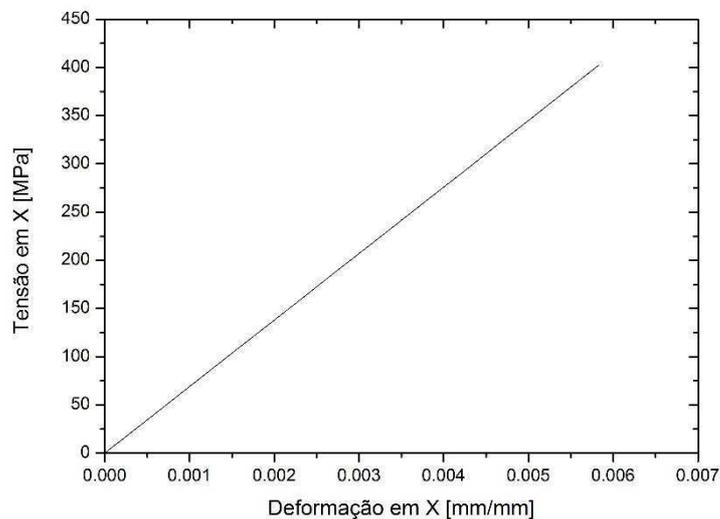


Figura 7.3.22 – Análise estática – Tensões x deformação – fio de alumínio.

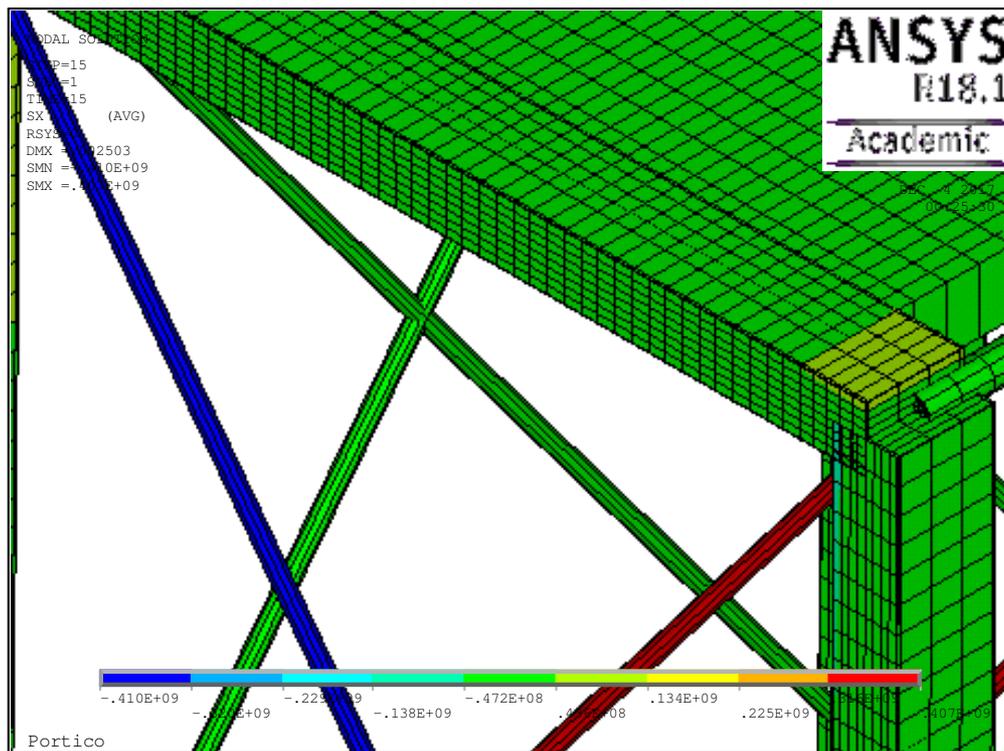


Figura 7.3.23 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de alumínio.

### 7.3.3.3.1.1.2 Estrutura com fios pseudoelásticos

A Figura 7.3.24 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com os fios pseudoelásticos. Já as Figuras 7.3.25 e 7.3.26 mostram as tensões na direção X na situação de forçamento máximo, que é a mais crítica no caso analisado. A Figura 7.3.27 mostra a formação de martensita induzida por tensão nos fios pseudoelásticos da estrutura.

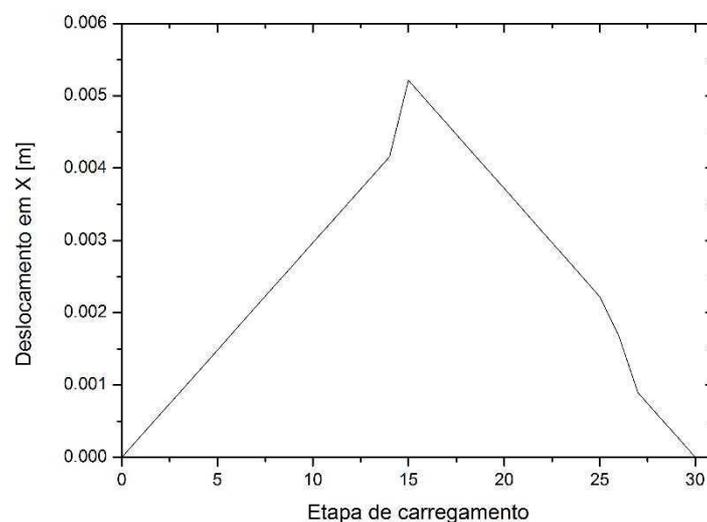


Figura 7.3.24 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios pseudoelásticos.

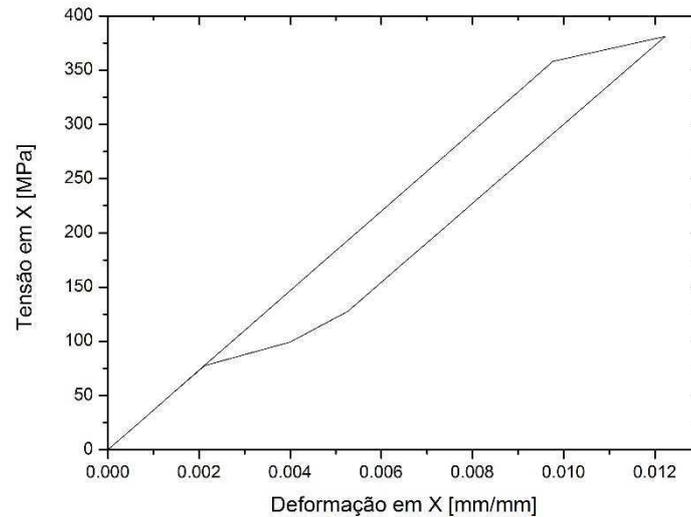


Figura 7.3.25 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico.

A partir da Figura 7.3.24, tem-se que o deslocamento máximo da estrutura com os fios pseudoelásticos foi de aproximadamente 5 mm. A Figura 7.3.25 ilustra um gráfico de tensão x deformação do elemento pseudoelástico que foi submetido apenas a tração durante o ciclo de carregamento e descarregamento simulado. A partir do software Origin, determinou-se que a energia dissipada durante tal ciclo foi de  $0,496 \text{ J/mm}^3$ .

A Figura 7.3.26 mostra as tensões na direção X na estrutura com os fios pseudoelásticos na etapa de carregamento de valor máximo de forçamento. É possível notar uma substancial diminuição do nível de tensões nos componentes de alumínio da estrutura com a inserção dos fios pseudoelásticos. Especificamente, a tensão máxima nos elementos de alumínio foi de 127 MPa aproximadamente, abaixo do escoamento do alumínio, portanto. Ademais, nota-se que os fios pseudoelásticos foram submetidos às tensões máximas em toda a estrutura, em torno de 381 MPa, o que também permitiu a formação de martensita nesses fios e conseqüentemente, a formação do laço de histerese citado acima.

Por fim, a Figura 7.3.27 ilustra a formação de martensita induzida por tensão nos fios pseudoelásticos no instante de maior carregamento. Apesar do baixo valor de martensita formado (em torno de 3,6%), os fios pseudoelásticos se mostraram uma alternativa viável para evitar danos a estrutura, por causa da capacidade de dissipação de energia com a formação do laço de histerese, bem como pelo platô de tensão que ocorre durante a transformação de fase direta, ou seja, austenita => martensita induzida por tensão.

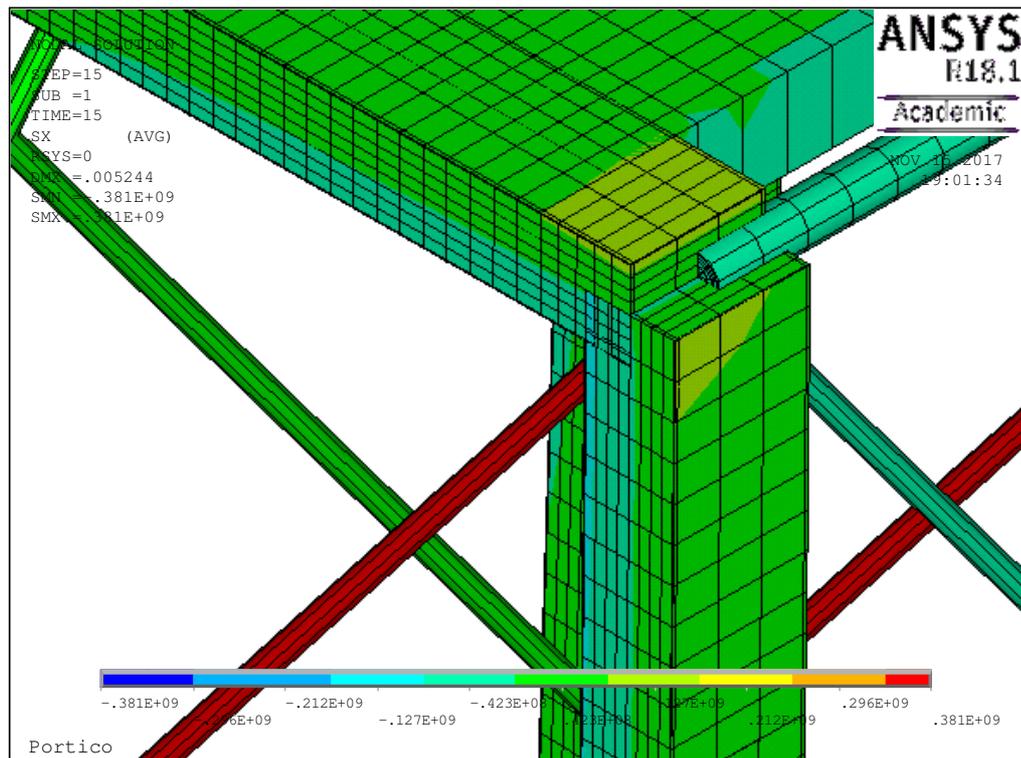


Figura 7.3.26 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios pseudoelásticos.

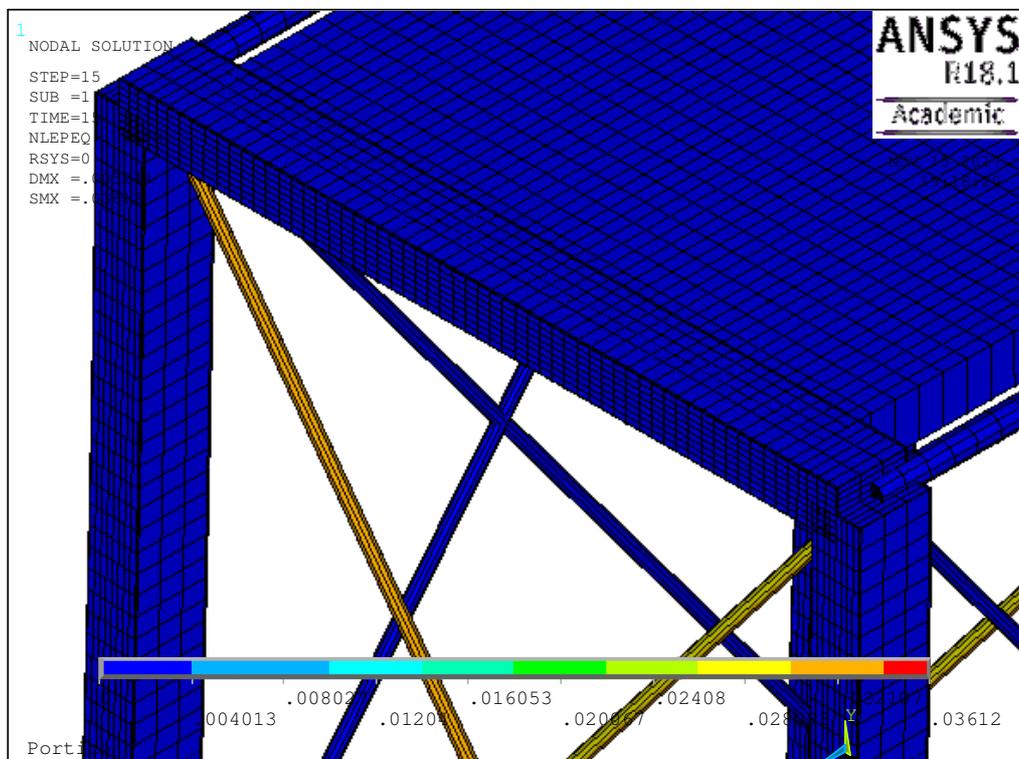


Figura 7.3.27 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios pseudoelásticos.

### 7.3.3.3.1.1.3 Estrutura com fios de efeito memória de forma

Nesta sub-seção, foi analisada a estrutura com fios de efeito memória de forma no estado austenítico. A temperatura de análise escolhida foi de 55 °C. A Figura 7.3.28 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com os fios de efeito memória de forma. Já as Figuras 7.3.29 e 7.3.30 mostram as tensões na direção X na situação de forçamento máximo. A Figura 7.3.31 mostra a formação de martensita induzida por tensão nos fios de efeito memória de forma da estrutura.

A partir da Figura 7.3.28, observa-se que o deslocamento máximo da estrutura com os fios de efeito memória de forma foi de aproximadamente 3,5 mm.

A Figura 7.3.29 mostra um gráfico de tensão x deformação do elemento pseudoelástico que foi submetido apenas a tração durante o ciclo de carregamento e descarregamento simulado. A energia dissipada durante tal ciclo, calculada com auxílio do software Origin, foi de 0,371 J/mm<sup>3</sup>.

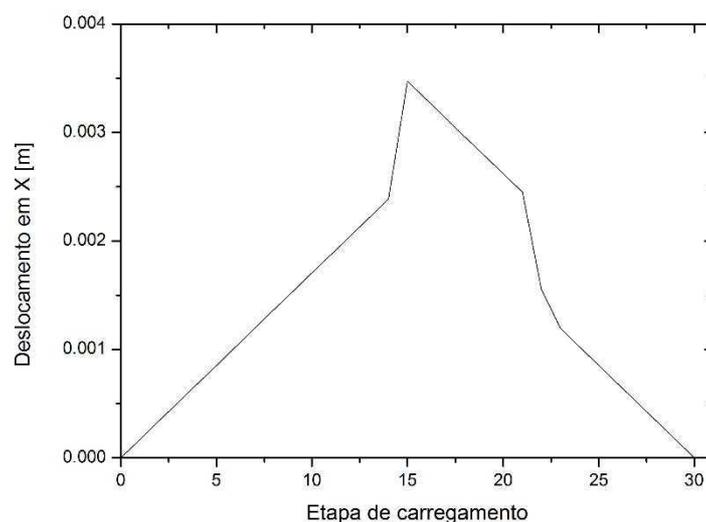


Figura 7.3.28 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma.

A Figura 7.3.30, mostra as tensões na direção X na estrutura com os fios de efeito memória de forma na etapa de carregamento de máximo valor de forçamento. A utilização dos fios de efeito memória de forma em seu estado austenítico possibilitou uma expressiva diminuição nos valores de tensão dos elementos estruturais de alumínio. Especificamente, a tensão máxima nestes elementos foi de 132 MPa, portanto, abaixo do limite de escoamento do alumínio.



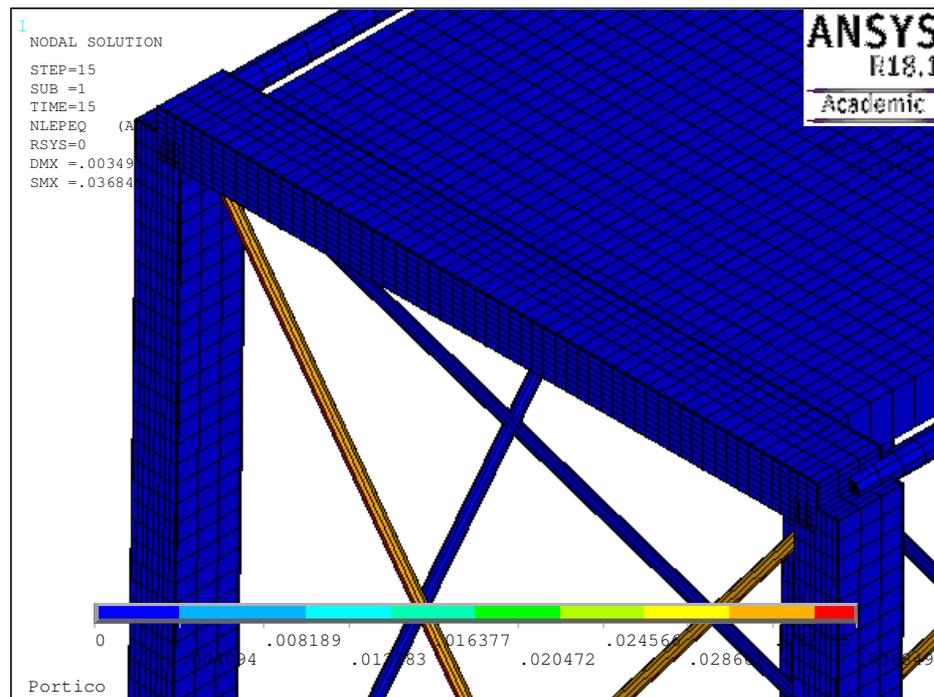


Figura 7.3.31 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios de efeito memória de forma.

A Figura 7.3.32 mostra uma comparação entre o deslocamento na estrutura com fios de alumínio, pseudoelástico e de efeito memória de forma. Ressalta-se que o fato de a plasticidade do alumínio não estar sendo considerada, a formação de uma deformação residual nos fios de alumínio não está sendo estudada aqui, entretanto, ela se faz presente, pelo fato de que as tensões no fio de alumínio terem sido maiores que a tensão de escoamento deste material.

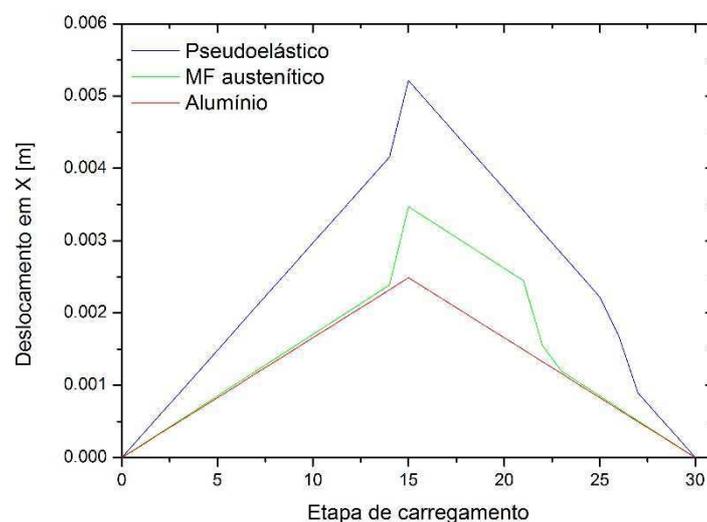


Figura 7.3.32 – Deslocamento em X – Fios diversos.

Por fim, a Figura 7.3.33 compara as curvas de tensão x deformação da estrutura com fios pseudoelásticos, de efeito memória de forma no estado austenítico e de alumínio. Nota-se que haveria o escoamento nos fios de alumínio, o que geraria falha nestes componentes, e que os fios pseudoelásticos proporcionaram uma maior dissipação de energia nessa configuração.

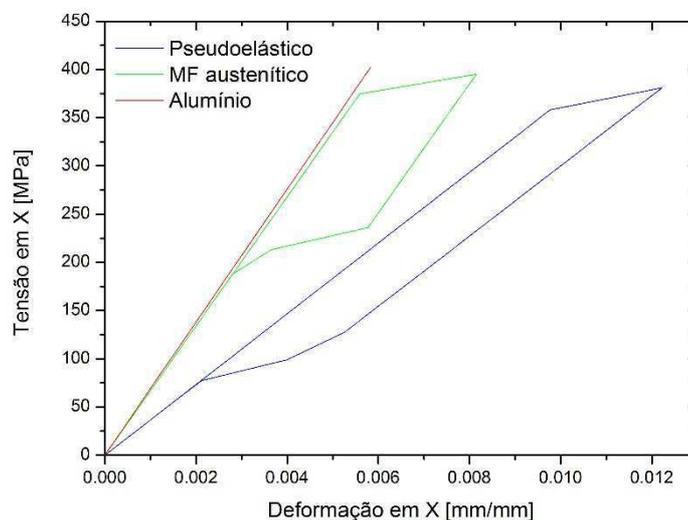


Figura 7.3.33 – Tensão x deformação – Fios diversos.

### 7.3.3.3.1.2 Apoios engastados

Nesta subseção, as simulações foram realizadas considerando as configurações da estrutura com apoios engastados.

#### 7.3.3.3.1.2.1 Estrutura com fios de alumínio

A Figura 7.3.34 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com fios de alumínio. Já as Figuras 7.3.35 e 7.3.36 mostram, respectivamente, um gráfico tensão x deformação do fio de alumínio e as tensões na direção X na situação de forçamento máximo, que é a mais crítica para a estrutura com apoios engastados.

Partindo-se das Figuras 7.3.35 e 7.3.36, é possível inferir que o carregamento aplicado na estrutura com fios de alumínio causaria falha nestes fios, pois as tensões ultrapassaram o limite de ruptura deste material. Ressalta-se novamente que as análises aqui realizadas não consideraram efeitos de plasticidade do alumínio.

Portanto, para evitar danos permanentes na estrutura, neste caso também é necessário utilizar, por exemplo, elementos dissipadores de energia, que no presente projeto são os fios de ligas com memória de forma.

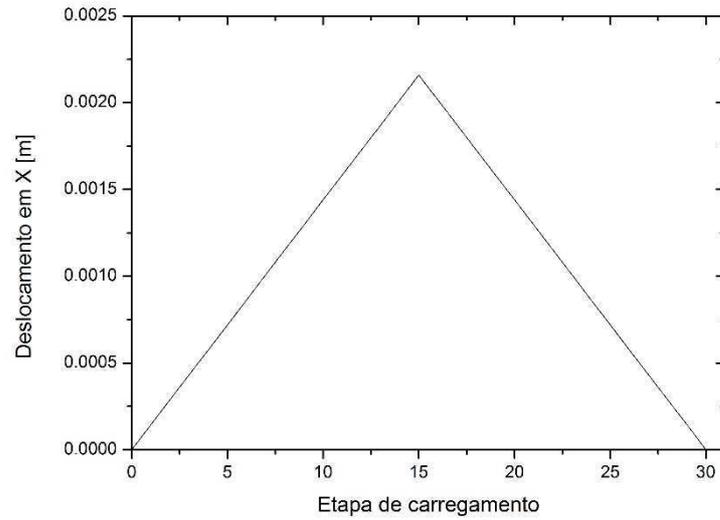


Figura 7.3.34 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de alumínio.

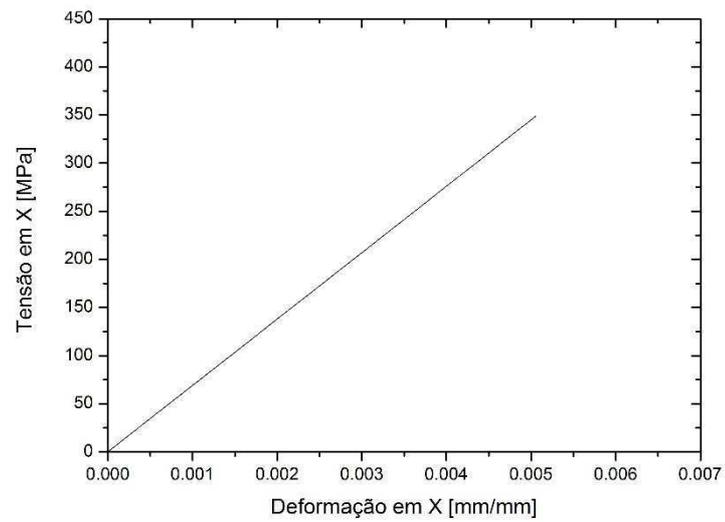


Figura 7.3.35 – Análise estática – Tensões x deformação - Estrutura com fios de alumínio.

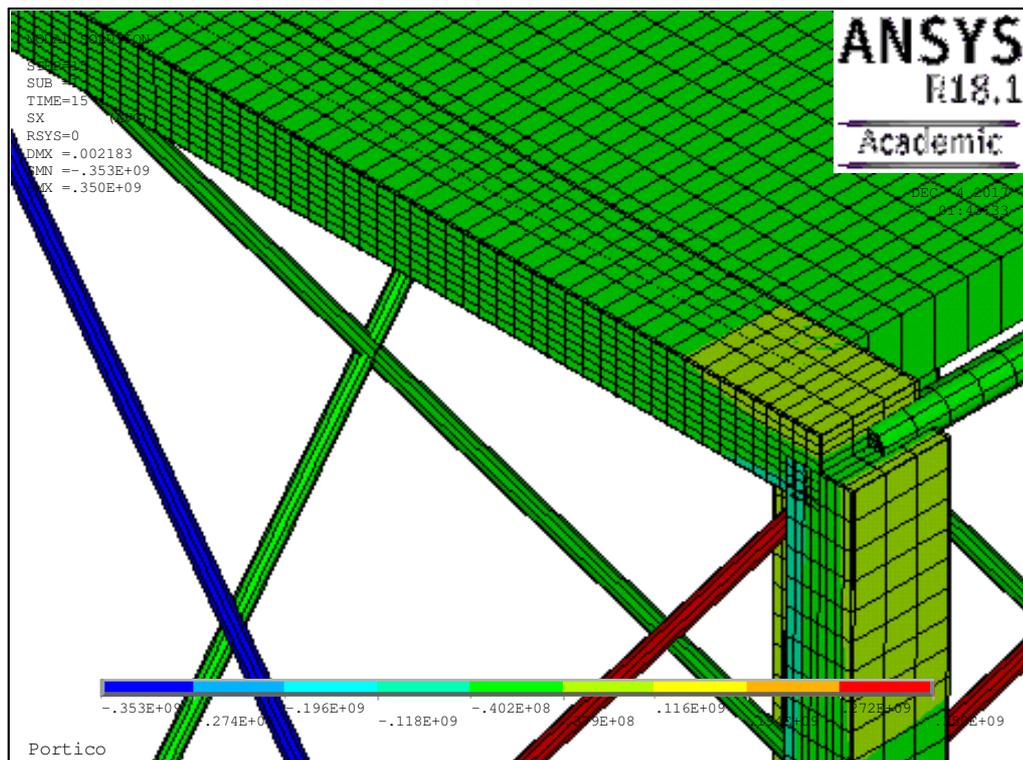


Figura 7.3.36 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de alumínio.

### 7.3.3.3.1.2 Estrutura com fios pseudoelásticos

A Figura 7.3.37 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com os fios pseudoelásticos. Já as Figuras 7.3.38 e 7.3.39 mostram as tensões na direção X na situação de forçamento máximo, que é a aquela mais crítica para a configuração ora analisada.

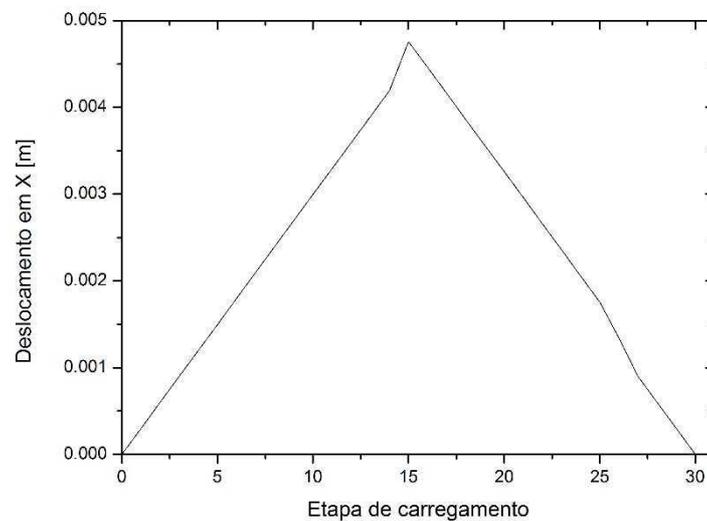


Figura 7.3.37 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios pseudoelásticos.

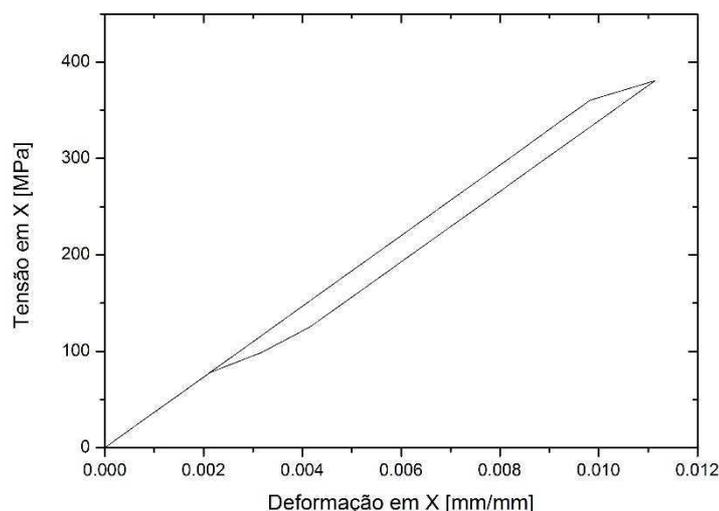


Figura 7.3.38 – Tensão x deformação – Fio pseudoelástico.

A partir da Figura 7.3.37, tem-se que o deslocamento máximo da estrutura com os fios pseudoelásticos foi de aproximadamente 5 mm. A Figura 7.3.38 apresenta um gráfico de tensão x deformação do elemento pseudoelástico que foi submetido apenas a tração durante o ciclo de carregamento e descarregamento simulado. A partir do software Origin, determinou-se que a energia dissipada durante tal ciclo foi de  $0,204 \text{ J/mm}^3$ .

A Figura 7.3.39 mostra as tensões na direção X na etapa de carregamento de valor máximo de forçamento na estrutura com a inclusão dos fios pseudoelásticos. A tensão máxima nos elementos de alumínio foi de 130 MPa aproximadamente, o que é abaixo do escoamento do alumínio. Ademais, nota-se que os fios pseudoelásticos foram submetidos às tensões máximas em toda a estrutura, em torno de 381 MPa, o que também permitiu a formação de martensita induzida por tensão nesses fios e conseqüentemente, a formação de um laço de histerese.

Por fim, a Figura 7.3.40 ilustra a formação de martensita induzida por tensão nos fios pseudoelásticos no instante de maior carregamento. Mesmo apresentado uma quantidade de martensita formada baixa (em torno de 1,6%), os fios pseudoelásticos se mostraram uma alternativa viável para evitar danos a estrutura, em comparação à estrutura sem a adição dos fios, por causa da capacidade de dissipação de energia com a formação do laço de histerese, bem como pelo platô de tensão que ocorre durante a transformação de fase direta.

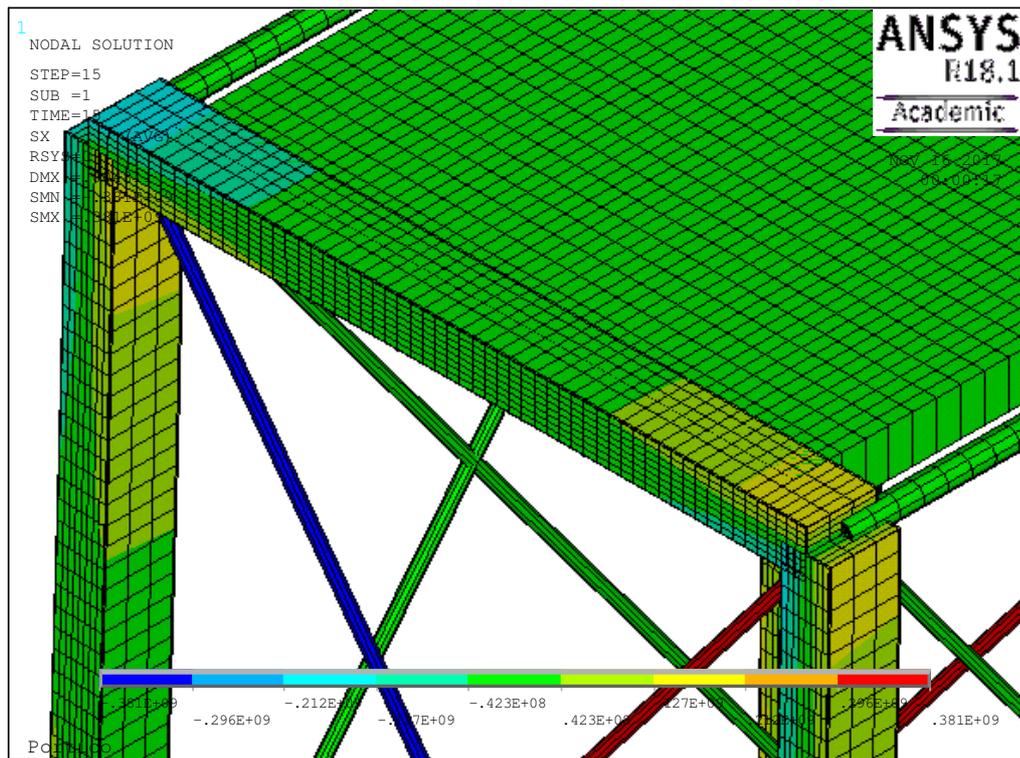


Figura 7.3.39 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios pseudoelásticos.

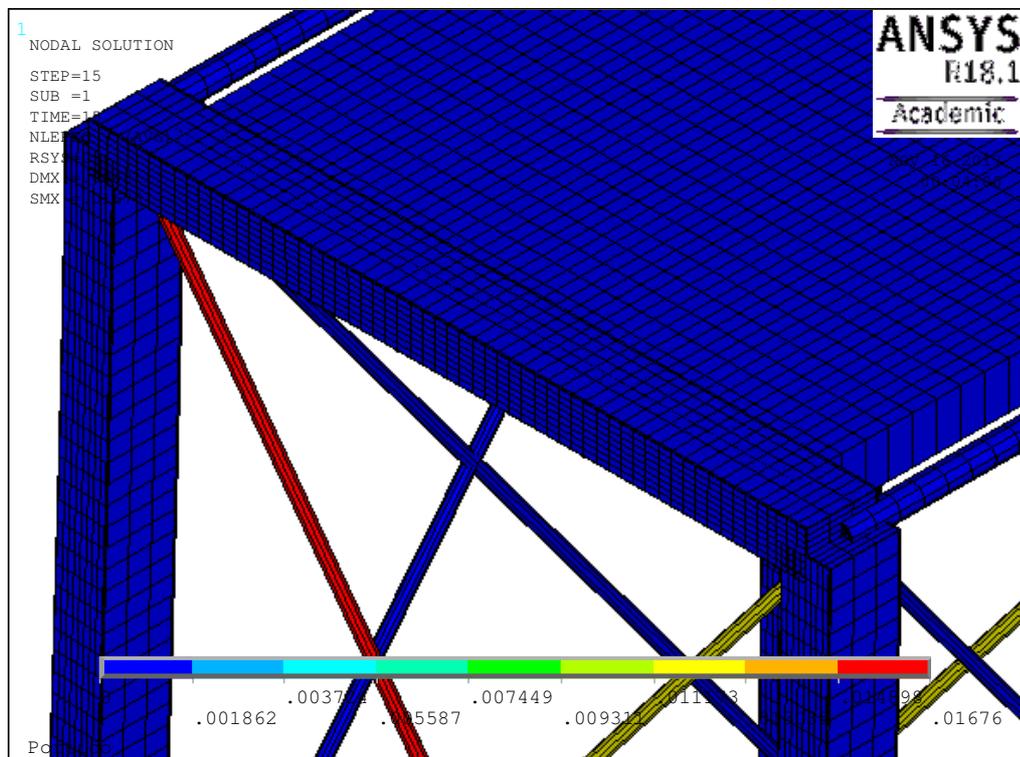


Figura 7.3.40 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios pseudoelásticos.

### 7.3.3.3.1.2.3 Estrutura com fios de efeito memória de forma

Nesta sub-seção, a estrutura com fios de efeito memória de forma no estado austenítico foi estudada. A temperatura de análise escolhida foi de 55 °C. A Figura 7.3.41 mostra o deslocamento na direção X dos nós superiores da estrutura com os fios de efeito memória de forma. Já as Figuras 7.3.42 e 7.3.43 mostram as tensões na direção X na situação de forçamento máximo. A Figura 7.3.44 mostra a formação de martensita induzida por tensão nos fios de efeito memória de forma da estrutura.

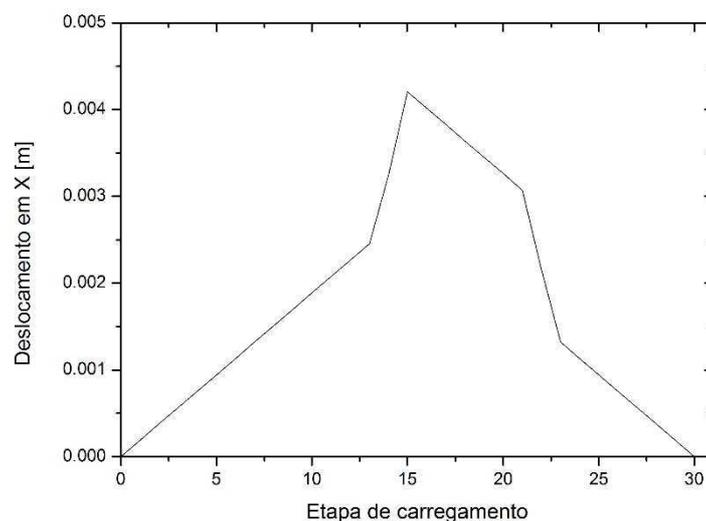


Figura 7.3.41 – Análise estática – Deslocamento em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma.

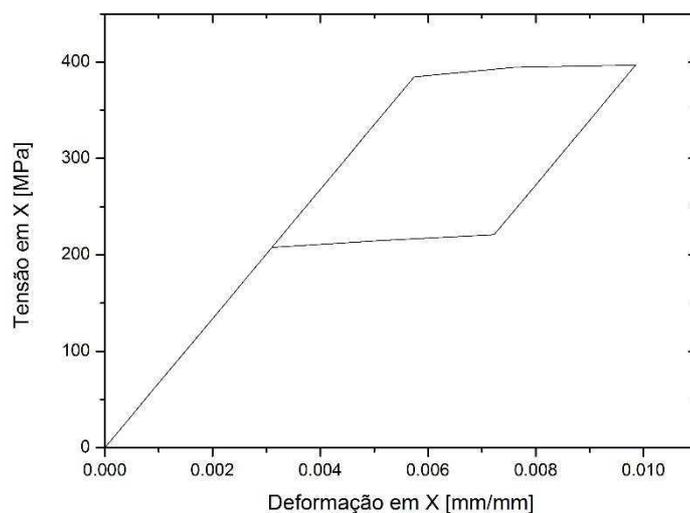


Figura 7.3.42 – Tensão x deformação – Fio de efeito memória de forma.

A partir da Figura 7.3.41, observa-se que o deslocamento máximo da estrutura com os fios de efeito memória de forma foi de aproximadamente 4,0 mm. A Figura 7.3.42 mostra um gráfico de tensão x deformação do fio de efeito memória de forma que foi submetido apenas a tração durante o ciclo de carregamento e descarregamento simulado. A energia dissipada durante tal ciclo, calculada com auxílio do software Origin, foi de 0,700 J/mm<sup>3</sup>.

A Figura 7.3.43, mostra as tensões na direção X na estrutura com os fios de efeito memória de forma na etapa de carregamento de máximo valor de forçamento. A utilização dos fios de efeito memória de forma em seu estado austenítico possibilitou uma expressiva diminuição nos valores de tensão dos elementos estruturais de alumínio. Especificamente, a tensão máxima nestes elementos foi de 132 MPa, portanto, abaixo do limite de escoamento do alumínio.

Já a Figura 7.3.44 ilustra a formação de martensita nos fios de efeito memória de forma no estado austenítico. O valor máximo de martensita formada pode ser considerado baixo, 6,2% aproximadamente, no entanto, a inserção dos fios de efeito memória de forma no estado austenítico se mostrou efetiva para evitar falhas estruturais nos componentes de alumínio da estrutura.

Tal efeito é devido à formação do laço de histerese, mostrado na Figura 7.3.42, que provoca a dissipação de energia durante o ciclo de carregamento, e à presença de um platô de tensão durante a transformação de fase induzida por tensão, que permite a manutenção dos valores de tensão aproximadamente constantes.

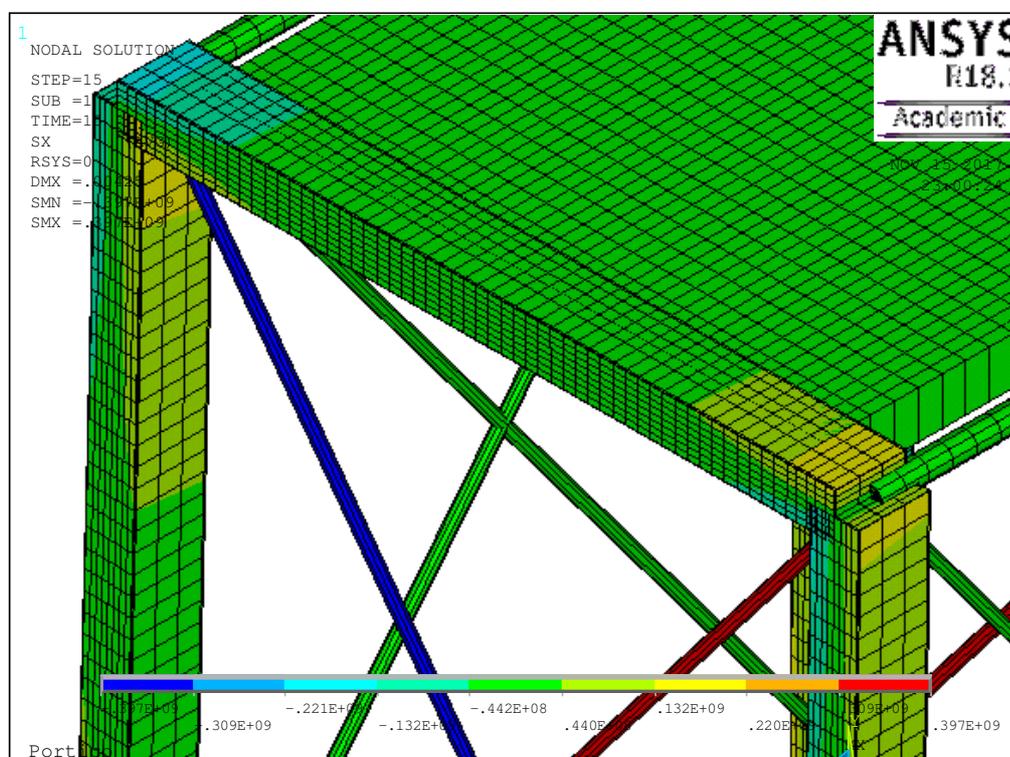


Figura 7.3.43 – Análise estática – Tensões em X - Estrutura com fios de efeito memória de forma.

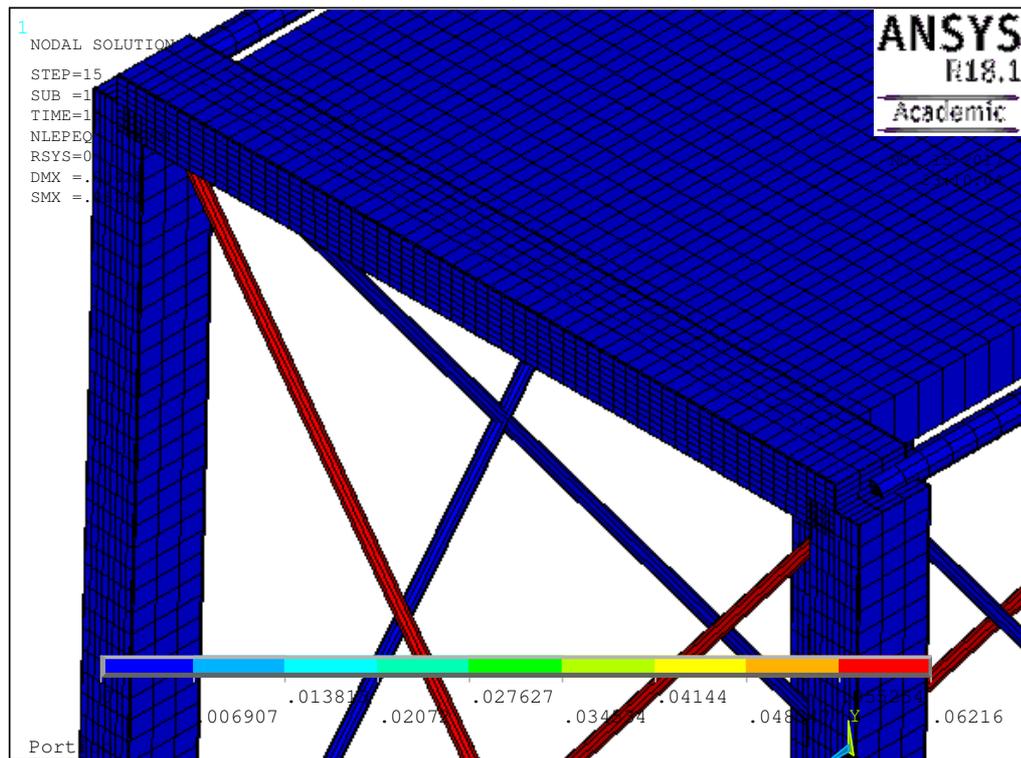


Figura 7.3.44 – Análise estática – Formação de martensita induzida por tensão - Estrutura com fios de efeito memória de forma.

A Figura 7.3.45 mostra uma comparação entre o deslocamento na estrutura com fios de alumínio, pseudoelástico e de efeito memória de forma. Ressalta-se que o fato de a plasticidade do alumínio não estar sendo considerada, a formação de uma deformação residual nos fios de alumínio não está sendo estudada aqui, entretanto, ela se faz presente, pelo fato de que as tensões no fio de alumínio terem sido maiores que a tensão de escoamento deste material.

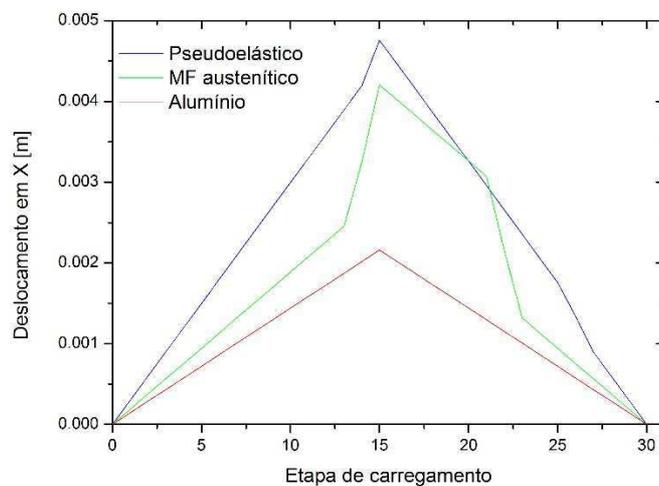


Figura 7.3.45 – Deslocamento em X – Fios diversos.

Por último, a Figura 7.3.47 compara as curvas de tensão x deformação da estrutura com fios pseudoelásticos, de efeito memória de forma no estado austenítico e de alumínio. Nota-se que haveria o escoamento nos fios de alumínio, o que geraria falha nestes componentes, e que os fios de efeito memória de forma proporcionaram uma maior dissipação de energia nessa configuração.

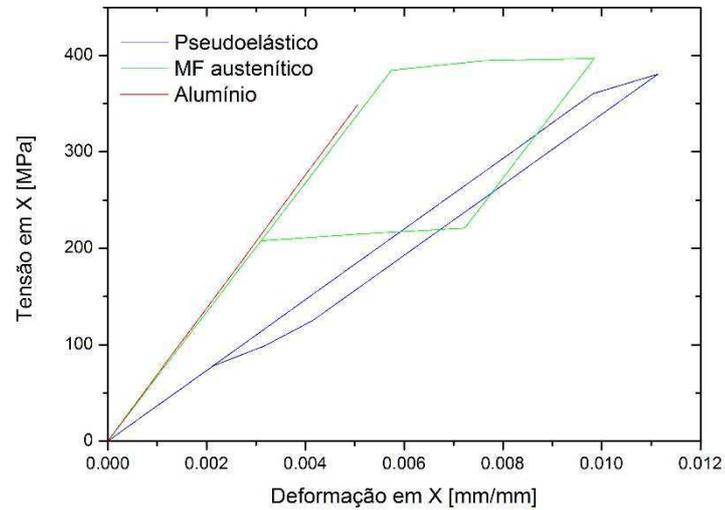


Figura 7.3.47 – Tensão x deformação – Fios diversos.

## Capítulo 8 – Conclusão e sugestões para trabalhos futuros

Neste trabalho, realizou-se uma busca por documentos patentários relacionados a ligas com memória de forma, uma comparação numérico-experimental de um ensaio de tração de um fio de liga com memória de forma e um projeto de estrutura treliçada com elementos de ligas com memória de forma.

As buscas por documentos patentários foram realizadas em bases de dados gratuitas como o Lens, o PATENTSCOPE, a base de dados do INPI, entre outras. Fez-se uma análise qualitativa e quantitativa dos dados obtidos dessas buscas, de modo a verificar tendências e oportunidades de aplicações das ligas com memória de forma em diversos ramos de atividade.

As simulações numéricas foram realizadas através do método de elementos finitos. Os resultados foram obtidos a partir do software Ansys APDL 18.1 e o modelo constitutivo utilizado para simular o comportamento termomecânico das ligas com memória de forma foi o de Auricchio e e Petrini (2004).

A comparação numérico-experimental baseou-se em resultados experimentais obtidos a partir de um ensaio de tração de um fio de SMA pseudoelástico (Silveira, 2017). A simulação numérica foi de tipo estática com deslocamento prescrito aplicado em etapas de carregamento. Essa simulação se mostrou capaz de representar de maneira adequada os resultados do ensaio experimental.

O projeto de estrutura treliçada para fins didáticos e científicos foi desenvolvido através de desenhos e de simulações numéricas. As simulações empregadas para tal estrutura foram análises modais, harmônicas e estáticas, com o objetivo de determinar as características dinâmicas da estrutura e a dissipação de energia promovida pela adição de elementos de ligas com memória de forma.

Verificou-se que as ligas com memória de forma são um tipo de material adequado para modificar as características dinâmicas de estruturas e permitir a redução ou mesmo eliminação de danos permanentes na estrutura projetada, devido às suas propriedades exclusivas, que não são verificadas em materiais convencionais. Especificamente, mesmo com a baixa formação de martensita nos fios, de acordo com as simulações das diversas configurações da estrutura, a utilização de fios pseudoelásticos e de efeito memória de forma permitiu uma diminuição expressiva do deslocamento máximo e das tensões nos componentes de alumínio da estrutura, bem como o efeito dissipativo devido ao laço de histerese foi constatado.

Ademais, o desenvolvimento de estruturas para fins didáticos utilizando elementos de ligas com memória de forma, como a estrutura aqui demonstrada, é uma alternativa viável para demonstrar diversos fenômenos de interesse para a engenharia e física.

Como sugestões para trabalhos futuros, tem-se:

- A expansão da busca por documentos patentários, de modo a verificar quantitativamente e qualitativamente os dados referentes as ligas com memória de forma em outros países e/ou regiões, bem como em outros campos de aplicação;
- Fazer uma análise dos documentos patentários, determinando os documentos concedidos, indeferidos ou pendentes, de modo a investigar oportunidades de negócios, como licenças, cessões e liberdade de uso (*freedom to operate* - FTO);
- Em relação a estrutura projetada, a utilização de fios de efeito memória de forma e pseudoelásticos ao mesmo tempo e/ou a análise de outros posicionamentos dos elementos de reforço da estrutura, por exemplo reforços tipo Chevron (em V).
- A realização de uma análise transiente da estrutura, de modo a verificar os efeitos dissipativos com a aplicação de carregamentos dinâmicos, bem como uma análise de vibrações aleatórias, de modo a simular fenômenos complexos como por exemplo, terremotos e vibrações induzidas pelo vento, entre outros;
- A construção de um protótipo da estrutura aqui projetada para investigar experimentalmente as características dinâmicas e de dissipação de energia aqui discutidas. desta.

## Referências Bibliográficas

Adeodato, A. Redução de vibrações em eixos utilizando elementos de ligas com memória de forma. Projeto Final (Graduação em Engenharia Mecânica), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2014.

Aguiar, R.A.A. Análise da Redução de Vibrações em Sistemas Mecânicos utilizando Ligas com Memória de Forma. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

Alawadhi, E.M. Finite element simulations using ANSYS, 1 ed., CRC Press, 2010.

Ansys Inc., Theory reference, 2017.

Auricchio, F. et al. Shape-Memory Alloys: Macromodeling and Numerical Simulations of the Superelastic Behavior, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering., Vol. 146, Iss 3-4, pp. 281-312, 1997.

Auricchio, F. e Lubliner, J. A uniaxial model for shape memory alloys, International Journal of Solids and Structures, Vol. 34, n. 27, pp. 3601-3618, 1997.

Auricchio, F. e Sacco, E. A one-dimensional model for superelastic shape memory alloys with different elastic properties between austenite and martensite, International Journal of Non-Linear Mechanics, Vol. 32, n.6, pp.1101-1114, 1997.

Auricchio, F. e Petrini, L. A three-dimensional model describing stress-temperature induced solid phase transformations: solution algorithm and boundary value problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2004.

Averbug, G.G. Estudo de comparação entre os modelos constitutivos presentes no Ansys, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2016.

Bae, G.H. Air flap device for vehicle. Pedido de patente KR20130026875 (A), data de depósito: 06 set 2011, data de publicação: 14 mar 2013.

Batalu, N.D. et al. Semiconstrained Total Elbow Prosthesis made of Shape Memory Alloys, with Coupling System Based on Shape Memory Effect. Pedido de Patente RO 131379 (A0), data de depósito: 27 mai 2016, data de publicação: 30 set 2016.

Beards, C.F. Structural vibration – Analysis and damping. 1 ed, John Wiley & Sons, 1996.

Brasil. Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio Exterior / Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI). Buscas por documentos patentários sobre ligas com memória de forma depositados no Brasil. 2017. Disponível em: <<https://gru.inpi.gov.br/pePI/servlet/PatenteServletController>> Acesso em 30 jul 2017.

Brinson, L.C. e Lammering, R. Finite element analysis of the behavior of shape memory alloys and their applications. Int. J. Solids Structures Vol. 30, No. 23, pp.3261-3280, 1993.

Carvalho, S.M.P. Indicadores de Propriedade Industrial – Lançamento do Anuário Estatístico de Patentes, Marcas e Desenhos Industriais, 2016.

Casciati, S. e Marzi, A. Experimental studies on the fatigue life of shape memory alloy bars. Em: Smart Structures and Systems, 2010.

Chopra, I. e Sirohi, J. Smart Structures Theory. 1 ed., Cambridge University Press, 2013.

Craig, R.R. e Kurdila, A.J. Fundamentals of Structural Dynamics. 2 ed, John Wiley & Sons, 2006.

Eller, P.R., Pré-dimensionamento de vigas mistas de aço e concreto para pontes de pequeno porte. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2011.

Escritório Europeu de Patentes. Why researchers should care about patents. Disponível em: [http://ec.europa.eu/invest-in-research/pdf/download\\_en/patents\\_for\\_researchers.pdf](http://ec.europa.eu/invest-in-research/pdf/download_en/patents_for_researchers.pdf), 2007.

Falk, F. e Konopka, P. Three-dimensional Landau theory describing the martensitic transformation of Shape Memory Alloys, Journal de Physique., n.2, pp.61-77, 1990.

Fremont, M., Shape Memory Alloy: A thermomechanical macroscopic theory, CISM Courses and Lectures, n. 351, pp. 3-68, New York, 1996.

Granja Filho, L.G. Prosthesis for anastomosis. Pedido Internacional de Patente WO 2007/140557 (A2), data de depósito internacional: 6 jun 2007, data de publicação: 13 dez 2007.

Hodgson, D. E. Apparatus for absorbing shocks, Patente US 9,410,592 B2, data de depósito: 25 mar 2015, data de concessão: 9 ago 2016.

Hibbeler, R.C. Structural Analysis. 8 ed, Prentice Hall, 2012.

Hu, J.W. e Ahn, J.H. Frame structure with high endurance level against earthquake. Patente KR101468167 (B1), data de depósito: 29 out 2013, data de concessão: 5 dez 2014.

Kim, Y.S e Nam, Y.Y. Development of dynamic simulator using test structure. Patente KR101624875 (B1), data de depósito: 04 dez 2014, data de concessão: 27 mai 2016.

Kotani, M. e Okabe, J. Vibration control structure experiencing device. Pedido de Patente JP2002169460 (A), data de depósito: 30 nov 2000, data de publicação: 14 jun 2002.

Lagoudas, D.C. Shape Memory Alloys – Modeling and Engineering Applications. 1 ed., Springer, 2008.

Leet, K.M., Uang, C.M., Gilbert, A.M. Fundamentos da análise estrutural. 3 ed, McGraw Hill, Artmed e AMGH Editora, 2010.

Lengyel, A.J., Schoor, M.C., Court, J.R. Aerial Refueling Hose, Patente US 9,631,744 B2, data de depósito: 06 out 2014, data de concessão: 25 abr 2017.

Lens. Busca por patentes relacionadas a Ligas com Memória de Forma. 2017a. Disponível em <<https://www.lens.org/lens/search?p=0&q=%28%22shape+memory+alloy%22+OR+nitinol+OR+%22memory+metal%22+OR+%22memory+alloy%22%29&predicate=%26%26&v=analysis&l=en#/applicant>> acessado em 16/06/2017.

Lens. Busca por patentes relacionadas a Ligas com Memória de Forma. 2017b. Disponível em <<https://www.lens.org/lens/search?p=0&predicate=%26%26&q=%28title%3A%28%22shape+memory+alloy%22+OR+%22nitinol%22+OR+%22memory+metal%22+OR++%22memory+alloy%22%29+%7C%7C+abstract%3A%28%22shape+memory+alloy%22+OR+%22nitinol%22+OR+%22memory+metal%22+OR++%22memory+alloy%22%29+%7C%7C+claims%3A%28%22shape+memory+alloy%22+OR+%22nitinol%22+OR+%22memory+metal%22+OR++%22memory+alloy%22%29%29&v=analysis&l=en>> acessado em 23/07/2017.

Lexcellent, C. Shape Memory Alloys Handbook. 1 ed., ISTE e John Wiley & Sons, 2013.

Liao, W. I., Mo, Y. L. Shake table tests of rc frame with shape memory alloy bracing bars, 4th International Conference on Earthquake Engineering Taipei, Taiwan, 2006.

Lopes, A.G. Amarrão de ligação pré-fabricado com atrito variável. Pedido Internacional de Patente WO 2012/019262 (A1), data de depósito internacional: 11 ago 2011, data de publicação: 16 fev 2012.

Lopes, A.G. Braquete autoligável reversível de baixo perfil com dupla trava. Pedido de Patente MU 8902352-8 (Y1), data de depósito: 30 out 2009, data de publicação: 28 jun 2011.

Lyn *et al.* Shape memory alloy active spars for blade twist. Pedido de Patente EP 2664537 (A2), data de depósito: 07 mai 2013, data de publicação: 20 nov 2013.

Majumder, R. Control of structural vibrations due to underground blast using SMA dampers, International Journal of Civil, Mechanical and Energy Science (IJCMES), Vol-2, Issue-2, 2016.

McHugo, V. Non-woven helical wire stent. Patente US 9,387,099 B2, data de depósito: 1º ago 2012, data de concessão: 12 jul 2016.

Melo, T.A.A. *et al.* Luva com efeito memória de forma modificado para a união de tubulações. Pedido de Patente BR102013029247-8 A2, data de depósito: 22 out 2013, data de publicação: 12 jul 2016.

Menna, G.; Auricchio, F.; Asprone, D.; “Applications of shape memory alloys in structural engineering”. In: Lecce, L., Concilio (eds), *Shape Memory Alloy Engineering for Aerospace, Structural and Biomedical Applications*, 1 ed, Capítulo 13, Amsterdam, Elsevier, 2015.

Motta, L.B. et al., A study on the hardening in a particular model for pseudoelastic materials, XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, 1999.

Nascimento, L.M.S. Fio guia motor. Pedido Internacional de Patente WO 2010/118488 (A1), data de depósito internacional: 12 abr 2010, data de publicação: 21 out 2010.

Olmi, C., Song, G. e Mo, Y.L. An innovative and multi-functional smart vibration platform. *Smart Mater. Struct.* 16 (2007) 1302–1309, 2007.

Otsuka, K. e Ren, X. Physical metallurgy of Ti-Ni-based shape memory alloys, *Progress in Materials Science*, 2005.

Ozbulut, O.E. e Hurlebaus, S. Seismic assessment of bridge structures isolated by a shape memory alloy/rubber-based isolation system, 2011.

Paiva, A. Modelos constitutivos para ligas com memória de forma. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Instituto Militar de Engenharia, 2000.

Patent Inspiration. Busca por patentes relacionadas a Ligas com memória de Forma. Disponível em <https://app.patentinspiration.com/#report/45536175b676/filter>, acessado em 19/10/2017.

Pereira, J.H.I. Um estudo sobre atuadores lineares com molas helicoidais de ligas com memória de forma. Dissertação (Mestrado em Tecnologia), Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2009.

Phywe. Newton's second law on the demonstration track with timer 4 – 4. Disponível em <http://repository.phywe.de/files/versuchsanleitungen/p2130305/e/p2130305e.pdf>, acessado em 19/06/2017.

Rao, S.S. *Mechanical vibrations*. 5 ed, Prentice Hall, 2011.

Riagusoff, I.I.T., Estudos de dispositivos pseudoelásticos para a aplicação em atenuadores de vibração, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2012.

Riley et al. Electronically actuated valve system. Patente US 8,434,436 (B2), data de depósito: 13 abr 2007, data de concessão: 7 mai 2013.

Savi, M.A. Dinâmica Não-Linear e Caos, E-papers, 2006.

Savi, M.A. e Braga, A.M., Chaotic vibration of an oscillator with shape memory, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science, Vol. 15, n. 1, pp. 1-20, 1993.

Savi, M.A. e Pacheco, P.M.C.L. Chaos and Hyperchaos in Shape Memory Systems, International Journal of Bifurcation and Chaos, vol. 12, N°3, 2002.

Savi, M.A. e Steffen, Special issue on Smart Materials and Structures. J. of the Braz. Soc. of Mech. Sci. & Eng. ABCM, 2012.

Silva, E.P., Modelagem mecânica de transformações de fase induzidas por tensões em sólidos, Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Nacional de Brasília, 1995.

Silva, R.S. Análise de estruturas inteligentes com memória de forma utilizando o método dos elementos finitos. Projeto Final (Graduação em Engenharia Mecânica), Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2016.

Silveira, G.M.S. Caracterização do Fio SMA. Relatório de Iniciação científica – Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, 2017.

Segerlind, L.J., Applied finite element analysis. 2 ed, John Wiley & Sons, 1984.

Smith, R.C., Smart Material Systems – Model Development, 1 ed., Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005.

Soh, C.K.; Yang, Y.; Bhalla, S.; *Smart Materials in Structural Health Monitoring, Control and Biomechanics*, 1 ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

Souza, A.C. et al. Three-dimensional model for solids undergoing stress-induced phase transformations, European Journal of Mechanics and Solids, n. 17, pp. 789-806, 1998.

Suzuki, N. e Hattori, A. Surgical instrument. Pedido de Patente US 2015/0039008 (A1), data de depósito: 15 nov 2012, data de publicação: 5 fev 2015.

Trilha Júnior, M. Sistema e método de introdução de ferramental intra-corpóreo. Pedido de Patente PI0701768-5 (A2), data de depósito: 20 jul 2007, data de publicação: 10 mar 2009.

Ung, O.H., Hyun, J.S. e Cheol, K.S. Apparatus for multi-axis vibration isolation using pseudo-elastic shape memory alloy mesh washer, Patente KR101552053 (B1), data de depósito: 15 mai 2014, data de concessão: 10 set 2015.

World Intellectual Property Organization (WIPO). Classificação Internacional de Patentes – International Patent Classification (IPC). 2017a. Disponível em: <http://web2.wipo.int/classifications/ipc/ipcpub?notion=scheme&version=20170101&symbol=none&menulang=en&lang=en&viewmode=f&fipcp=none&showdeleted=yes&indexes=no&headings=yes&notes=yes&direction=02n&initial=A&cwid=none&tree=no&searchmode=smart>. Acesso em 01/11/2017.

World Intellectual Property Organization (WIPO). Buscas por pedidos depositados via PCT por nacionais relacionados às ligas com memória de forma. 2017b. Disponível em: <<https://patentscope.wipo.int/search/pt/result.jsf>>. Acesso em: 04 ago 2017.

Youhai et al. Rope type self-reset shape memory alloy seismic isolation and seismic reduction support. Pedido de patente CN103867625 (A), data de depósito: 26 nov 2013, data de publicação: 18 jun 2014.

Zaragoza Labes, A. *et al.* Conexão em material de liga de memória de forma e seus usos. Pedido Internacional de Patente WO 2016/172772 (A1), data de depósito internacional: 27 abr 2015, data de publicação: 3 nov 2016.

Zhuang, P., Wang, W., Xue, S. Shape memory alloy coil spring attenuator, Patente CN205000484 (U), data de depósito: 28 jul 2015, data de concessão: 27 jan 2016.

## APÊNDICE 1 – Simulação do Ensaio de Tração

/title, Fio Pseudoelastico

/PREP7 ! preprocessor phase

length = 0.15

fator = 5

Amp\_u = 0.1\*length

nDiv = 40

K,1, 0, 0

K,2, length,0

L,1,2

PI = acos(-1)

T = 25

Ea = 36.675E9,

Em = 27.404E9,

S\_AS\_s = 380.85E6

S\_AS\_f = 386.05E6

S\_SA\_s = 104.24E6

S\_SA\_f = 104.15E6

e\_l\_aur = 0.071-0.010

alpha = 0.0

T = 25

Af = 15

Ca = 6E6

$$u\_T = T + 273.15$$

$$u\_To = Af + 273.15$$

MPTEMP,,,,,,,, !inicialização da função

MPTEMP,1,u\_To !associação da temperatura dos parâmetros

MPDATA,EX,1,,Ea !EX, MPa, módulo de elasticidade da austenita (Young)

MPDATA,PRXY,1,,Poiss !PRXY, adimensional, constante de Poisson

! Cálculos para TB,,,,,MEFF

$$h = ((S\_AS\_f - S\_AS\_s) / e\_l\_aur) * 2/3 !C1, h$$

$$u\_To = Af + 273.15 !C2, T\_o$$

$$MAT\_LIMIT = (S\_AS\_f - S\_SA\_s) / 2 * \sqrt{2/3} !C3, R$$

$$u\_beta = Ca !C4, beta$$

$$MAT\_TRSTR = e\_l\_aur * \sqrt{3/2} !C5, epsilon\_L$$

$$MAT\_MREX = Em !C6, Em$$

$$MAT\_LODE = 0.0 !C7, m$$

$$u\_T = (S\_AS\_s - (S\_AS\_f - S\_SA\_s) / 2) * \sqrt{2/3} / u\_beta + u\_To !TMP\_LOAD$$

$$C1 = h$$

$$C2 = u\_To$$

$$C3 = MAT\_LIMIT$$

$$C4 = u\_beta$$

$$C5 = MAT\_TRSTR$$

$$C6 = MAT\_MREX$$

$$C7 = MAT\_LODE$$

! analise: 1-linear, 2-sma

Analise = 2

\*IF, Analise,EQ,2,THEN

TB,SMA,1,,7,MEFF

TBDATA,1,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7



tref, u\_To !Indicação da temperatura de referência

tunif, u\_T !Indicação da temperatura de análise

OUTRES, ALL, ALL !Salvar todos resultados

NROPT, UNSYM !Usar matriz assimétrica

kbc, 0 !A evolução das cargas é em "rampa", linear

AUTOTS, ON !intervalo de tempo ou carga é automático

LNSRCH, AUTO !Procurar automaticamente a linha a ser usada com Newton-Raphson

NEQIT, 1000 !Especifica o número máximo de iterações de equilíbrio para

TIME, 1 !Especifica o tempo ao final da solução

\*DIM, v\_u\_Ext, ARRAY, 2\*nDiv

! Vetor de armazenamento para o

deslocamento em 2\*nDiv steps

\*DIM, v\_F\_Ext, ARRAY, 2\*nDiv

! Vetor de armazenamento para a força

em 2\*nDiv steps

ALLSEL, ALL, ALL

\*DO, ii, 1, nDiv, 1

! Load Steps - Carregamento

u\_amp = Amp\_u\*(ii/nDiv)

D, 2, UX, u\_amp

ALLSEL, ALL, ALL

SOLVE

\*GET, u\_Ext, NODE, 2, U, X

\*GET, F\_Ext, NODE, 2, RF, FX

v\_u\_Ext(ii)=u\_Ext

v\_F\_Ext(ii)=F\_Ext

\*ENDDO

```
*DO,ii,1,nDiv,1
```

```
! Load Steps - Descarregamento
```

```
u_amp = Amp_u*(nDiv-ii)/nDiv
```

```
D,2,UX,u_amp
```

```
ALLSEL,ALL,ALL
```

```
SOLVE
```

```
*GET, u_Ext,NODE,2,U,X
```

```
*GET, F_Ext,NODE,2,RF,FX
```

```
v_u_Ext(ii)=u_Ext
```

```
v_F_Ext(ii)=F_Ext
```

```
*ENDDO
```

```
FINISH
```

```
!*
```

```
/POST26
```

```
RFORCE,2,2,F,X,FX_2
```

```
STORE,MERGE
```

```
NSOL,3,2,U,X,UX_3
```

```
STORE,MERGE
```

```
ESOL,4,1, ,SMISC,7,STRAIN !Lê a deformação elástica do elemento 1 e armazena na
variável 4
```

```
ESOL,5,1, ,SMIS,31,STRESS
```

```
XVAR,4
```

```
PLVAR,5,
```

```
/eof
```

## APÊNDICE 2 – Simulação da Estrutura com os Fios de SMA

finish

/clear

/title, Portico

/PREP7

height = 0.200

width = 0.150

thickness = 0.150

K,1, 0, 0, 0 ! keypoint, # x, y, z

K,2, 0,height,0

K,3, width,height,0

K,4, width,0,0

K,5, 0, 0, thickness

K,6, 0,height,thickness

K,7, width,height,thickness

K,8, width,0,thickness

K,9, 10E-3,height,0

K,10, width - 10E-3,height,0

K,11, 10E-3,height,thickness

K,12, width - 10E-3,height,thickness

PI = 3.14159265359

Poiss = 0.33 !adimensional, Constante de Poisson

!!!!!!! Propriedades SMA - Prop\_fio: 1 - Silveira; 2 - Brinson

Prop\_fio = 1

\*IF, Prop\_fio,EQ,1,THEN

S\_AS\_s = 380.85E6

S\_AS\_f = 386.05E6

S\_SA\_s = 104.24E6

S\_SA\_f = 104.15E6

e\_l\_aur = 0.071-0.010

alpha = 0.0

Af = 15

Ca = 6E6

T = 25

u\_T = T+273.15

u\_To = Af + 273.15

Ea = 36.675E9,

Em = 27.404E9,

MPTEMP,,,,,,,,

MPTEMP,1,u\_To

MPDATA,EX,1,,Ea !Ea Em

MPDATA,PRXY,1,,Poiss

MP,DENS,1,6500

!\*

! Parâmetros para TB,,,,,MEFF

!\*

MAT\_SLOPE = ((S\_AS\_f-S\_AS\_s)/e\_l\_aur)\*2/3 !C1, h

u\_To = Af + 273.15 !C2, T\_o

MAT\_LIMIT = (S\_AS\_f-S\_SA\_s)/2\*sqrt(2/3) !C3, R

u\_beta = Ca !C4, beta

MAT\_TRSTR = e\_l\_aur\*sqrt(3/2) !C5, epsilon\_L

MAT\_MREX = Em !C6, Em

MAT\_LODE = 0.0 !C7, m

!\*

$u\_T = (S\_AS\_s - (S\_AS\_f - S\_SA\_s)/2) * \sqrt{2/3} / u\_beta + u\_To$

!\*

C1=MAT\_SLOPE

C2=u\_To

C3=MAT\_LIMIT

C4=u\_beta

C5=MAT\_TRSTR

C6=MAT\_MREX

C7=MAT\_LODE

\*ELSEIF, Prop\_fio,EQ,2,

T = 55

Ea = 67E9,

Em = 26.3E9,

!Theta = 0.55\*E6,

p = 6448.1,

Mf = 9,

Ms = 18.4,

As = 34.5,

Af = 49,

am = pi/(Ms-Mf),

aa = pi/(Af-As),

Cm = 8E6,

Ca = 13.8E6,

Scr\_s = 100E6,

Scr\_f = 170E6,

$$e_1 = 0.067,$$

$$S_{AS_s} = Scr_s + C_m * (T - M_s) \quad !C1$$

$$S_{AS_f} = Scr_f + C_m * (T - M_s) \quad !C2$$

$$S_{SA_s} = C_a * (T - A_s) \quad !C3$$

$$S_{SA_f} = C_a * (T - A_f) \quad !C4$$

$$e_{1\_aur} = e_1 \quad !C5$$

$$\alpha = 0.0 \quad !C6$$

Poiss = 0.33 !adimensional, Constante de Poisson

$$u_T = T + 273.15 \quad !K, T$$

$$u_{To} = A_s + 273.15 \quad !To, K \text{ [REFERENCE TEMPERATURE]}$$

MPTEMP,,,,,,,, !inicialização da função

MPTEMP,1,u\_To !associação da temperatura dos parâmetros

MPDATA,EX,1,,Ea !EX, MPa, módulo de elasticidade da austenita (Young)

MPDATA,PRXY,1,,Poiss !PRXY, adimensional, constante de Poisson

!\*  
 ! Cálculos para uso TB,,,,,MEFF

!\*  
 MAT\_SLOPE = ((S\_{AS\_f} - S\_{AS\_s}) / e\_{1\\_aur})^{2/3} \quad !C1, h

!\*  
 u\_To = A\_f + 273.15 \quad !C2, T\_o

$$MAT\_LIMIT = (S_{AS_f} - S_{SA_s}) / 2 * \sqrt{2/3} \quad !C3, R$$

$$u\_beta = C_a \quad !C4, \text{beta}$$

$$MAT\_TRSTR = e_{1\_aur} * \sqrt{3/2} \quad !C5, \text{epsilon}_L$$

$$MAT\_MREX = E_a \quad !C6, E_m$$

$$MAT\_LODE = 0.0 \quad !C7, m$$

$$MAT\_LODE = 0.0 \quad !C7, m$$

$$MAT\_LODE = 0.0 \quad !C7, m$$

!\*  
 u\_T = (S\_{AS\_s} - (S\_{AS\_f} - S\_{SA\_s}) / 2) \* \sqrt{2/3} / u\_beta + u\_To \quad !TMP\_LOAD

$$u_T = (S_{AS_s} - (S_{AS_f} - S_{SA_s}) / 2) * \sqrt{2/3} / u\_beta + u_{To} \quad !TMP\_LOAD$$

!\*  
 C1=MAT\_SLOPE !h, MPA [HARDENING PARAMETER]

C2=u\_To !To, K [REFERENCE TEMPERATURE]

C2=u\_To !To, K [REFERENCE TEMPERATURE]

```

C3=MAT_LIMIT !R, MPA [ELASTIC LIMIT]
C4=u_beta !beta, MPA [TEMPERATURE SCALING PARAMETER]
C5=MAT_TRSTR !epsilonL, [MAXIMUM TRANSFORMATION STRAIN]
C6=MAT_MREX!Em, MPA [MARTENSITE MODULUS]
C7=MAT_LODE

*ENDIF !Fim da operação booleana IF!*

! modelo_material: 1-linear, 2-sma
modelo_material = 2

*IF, modelo_material,EQ,2,THEN
TB,SMA,1,,7,MEFF
TBDATA,1,C1,C2,C3,C4,C5,C6,C7

*ENDIF !Fim da operação booleana IF!*

! elemento_fio: 1-BEAM188, 2-LINK180
elemento_fio = 1

diameter = 2.5E-3 !0.375E-3 ! !1.5E-3
radius = diameter/2
area = PI*radius*radius

*IF, elemento_fio,EQ,1,THEN

ET,1,BEAM188 !Viga 3D, 2 Nós, suporte a TB,SMA
KEYOPT,1,4,2 !Output para Tensão cisalhante por torção e flexão
KEYOPT,1,6,3 !Output para as informações da seção transversal para cada nó do elemento.
KEYOPT,1,7,2 !Output Tensões e deformações em cada ponto da seção transversal
KEYOPT,1,9,3 !Output Tensões e deformações em cada nó da seção transversal
KEYOPT,1,15,0

N_u=10 !N de Divisões angulares da seção transversal
T_u=5 !N de Divisões radiais da seção transversal

```

```
ESIZE,,1 !1  
TYPE,1  
MAT,1  
SECNUM,1  
SECTYPE, 1, BEAM, CSOLID, perfil, 0  
SECOFFSET, CENT  
SECDATA,radius,N_u,T_u,0,0,0,0,0,0,0,0
```

```
*ELSEIF, elemento_fio,EQ,2,
```

```
ET,1,LINK180!element type  
TYPE,1  
MAT,1  
SECNUM,1  
SECTYPE,1,LINK  
SECDATA, PI*diameter*diameter/4
```

```
ESIZE,,1
```

```
*ENDIF !Fim da operação booleana IF!*
```

```
L,1,3  
L,2,4  
L,5,7  
L,6,8  
L,3,8  
L,7,4  
L,6,1  
L,5,2
```

```
LMESH,ALL !Formação da malha de elementos e nós.
```

```
ET,2,BEAM188  
MP,EX,2,69E9
```

```
MP,PRXY,2,0.33
MP,DENS,2,2700
TYPE,2
MAT,2
SECNUM,2
SECTYPE, 2, BEAM, RECT, , 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,0.010,0.015,10,5,
```

```
ESIZE,,50
LESIZE,ALL,,10
```

```
L,1,2      ! line connecting kpoint 1 and 2
L,2,9
L,9,10
L,10,3
L,3,4
L,5,6
L,6,11
L,11,12
L,12,7
L,7,8
```

```
LMESH,9,13,2
LMESH,11
LMESH,16
LMESH,14,18,2
```

```
ESIZE,,5
LMESH,10
LMESH,12
LMESH,15
LMESH,17
```

```
ET,3,BEAM188
```

```
MP,EX,3,69E9
MP,PRXY,3,,0.33
MP,DENS,3,2700
radius_2=(0.005)/2
N_u=10
T_u=5
ESIZE,,30
TYPE,3
MAT,2
SECNUM,3
SECTYPE, 3, BEAM, CSOLID, perfil, 0
SECOFFSET, CENT
SECDATA,radius_2,N_u,T_u,0,0,0,0,0,0,0,0
```

```
L,2,6
L,3,7
LMESH,ALL
```

```
ET,4,MPC184,6
SECTYPE,4,JOINT,REVO,
LOCAL,11,0,0,0,0, , , -90,1,1,
SECJOINT,,11
CSYS,0
SECSTOP,4,0,2*PI !* STOP at 0rad , 2pirad
```

```
TYPE,4
MAT,4
SECNUM,4
```

```
E,2,2
E,3,3
E,6,6
E,7,7
```

```
ET,5,SHELL181
```

```
MP,EX,5,,69E9
MP,PRXY,5,,0.33
MP,DENS,5,2700
TYPE,5
MAT,5
SECNUM,5
SECT,5,shell,
SECDATA, 0.010,1,0.0,3
SECOFFSET,MID
```

```
FLST,2,4,3
FITEM,2,11
FITEM,2,12
FITEM,2,10
FITEM,2,9
A,P51X
! /REPLOT,RESIZE
FLST,2,1,5,ORDE,1
FITEM,2,1
AESIZE,P51X,0.05,
CM,_Y,AREA
ASEL, , , , 1
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
!*
MSHKEY,1
AMESH,_Y1
MSHKEY,0
```

```
NLGEOM, ON
```

```
! analise: 1-estática, 2-modal, 3-harmônica
```

```
Analise = 1
```

\*IF, Analise,EQ,1,THEN

/SOLU ! enter solution phase

tref, u\_To !Indicação da temperatura de referência

tunif,u\_T !Indicação da temperatura de análise

! TipoApoio: 1-pinado, 2-engastado

TipoApoio = 2

\*IF, TipoApoio,EQ,1,THEN

DK,1, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,4, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,5, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,8, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

\*ELSEIF, TipoApoio,EQ,2,

DK,1,ALL,0

DK,4,ALL,0

DK,5,ALL,0

DK,8,ALL,0

\*ENDIF !Fim da operação booleana IF!\*

OUTRES,ALL,ALL !Salvar todos os resultados

nDiv = 15

Amp\_f= 3200 !3200 !2500 !0.005

TIME,1 !Especifica o tempo ao final da solução

ALLSEL,ALL,ALL

\*DO,ii,1,nDiv,1

! Load Steps - Carregamento

F\_amp = Amp\_f\*(ii/nDiv)

!DK,3,UX,u\_amp

!DK,7,UX,u\_amp

FK,3,FX,F\_amp

FK,7,FX,F\_amp

ALLSEL,ALL,ALL

SOLVE

\*ENDDO

\*DO,ii,1,nDiv,1

! Load Steps - Descarregamento

F\_amp = Amp\_F\*(nDiv-ii)/nDiv

FK,3,FX,F\_amp

FK,7,FX,F\_amp

ALLSEL,ALL,ALL

SOLVE

\*ENDDO

FINISH

/POST26 !Entrada do visualizador temporal dos resultados

!\*

NUMVAR,1000

NSOL,2,3,U,X, DISP\_X, !Lê a deflexão em x no no 2 e armazena na variável 2

ESOL,3,3, ,SMISC,7,STRAIN !Lê a força axial do elemento 1 e armazena na

! variável 4

ESOL,4,3, ,SMIS,31,STRESS !Lê a deformação axial do elemento 1 e armazena na

! variável 5

XVAR,3

PLVAR,4,

/eof

\*ELSEIF, Analise,EQ,2,

/SOLU ! enter solution phase

ANTYPE,2

MODOPT,LANB,5

MXPAND,5

MODCONT,, ON ! Activate enforced motion

! TipoApoio: 1-pinado, 2-engastado

TipoApoio = 1

\*IF, TipoApoio,EQ,1,THEN

DK,1, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,4, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,5, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

DK,8, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,

\*ELSEIF, TipoApoio,EQ,2,

DK,1,ALL,0

DK,4,ALL,0

DK,5,ALL,0

DK,8,ALL,0

\*ENDIF !Fim da operação booleana IF!\*

SOLVE

FINISH

\*ELSEIF, Analise,EQ,3, !Harmônica

/SOLU ! enter solution phase

ANTYPE,3

! TipoApoio: 1-pinado, 2-engastado

TipoApoio = 2

```
*IF, TipoApoio,EQ,1,THEN
DK,1, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,
DK,4, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,
DK,5, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,
DK,8, ,0, ,0,UX,UY,UZ,ROTX,ROTY, ,
```

```
*ELSEIF, TipoApoio,EQ,2,
DK,1,ALL,0
DK,4,ALL,0
DK,5,ALL,0
DK,8,ALL,0
```

```
*ENDIF !Fim da operação booleana IF!*
```

F = 500 !N

```
FK,3,FX,F !FZ,F
FK,7,FX,F !FZ,F
```

```
HARFRQ,0,350,
NSUBST,100,
KBC,1
```

SOLVE

FINISH

/eof

```
*ENDIF !Fim da operação booleana IF!*
```

/eof

## ANEXO 1 – Classificações Internacionais de Patentes citadas, Buscas INPI e PATENTSCOPE

### A - Necessidades Humanas

#### A61 Ciência médica ou veterinária; higiene

##### A61B Diagnóstico; cirurgia; identificação

A61B 17/00 Instrumentos cirúrgicos, dispositivos ou métodos, p. ex. torniquetes

A61B 17/12 Instrumentos para ligadura ou outra compressão de partes tubulares do corpo, p. ex. vasos sanguíneos ou cordão umbilical

A61F Filtros implantáveis nos vasos sanguíneos; próteses; dispositivos que promovem desobstrução ou previnem colapso de estruturas tubulares do corpo, p. ex. stents; dispositivos ortopédicos, de enfermagem ou anticoncepcionais; fomentação; tratamento ou proteção dos olhos ou ouvidos; ataduras, curativos ou almofadas absorventes; estojos para primeiros socorros

A61F 2/00 Filtros implantáveis nos vasos sanguíneos; Próteses, i.e. substitutos artificiais ou substituições de partes do corpo; Mecanismos para conectá-los ao corpo; Dispositivos que promovem desobstrução ou previnem colapso de estruturas tubulares do corpo, p. ex. stents

A61F 2/06 Próteses implantáveis em vasos sanguíneos

A61F 2/24 Válvulas cardíacas

A61F 2/82 Dispositivos que promovem desobstrução ou previnem colapso de estruturas tubulares do corpo, p. ex. Stents

A61F 2/90 Dispositivos caracterizados por uma estrutura de rede ou malha

A61M Dispositivos para introduzir matérias no corpo ou depositá-las sobre o mesmo; dispositivos para fazer circular matérias no corpo ou para dele as retirar; dispositivos para produzir ou por fim ao sono ou à letargia

A61M 25/00 Cateteres; Sondas ocas

A63 Esportes; jogos; recreação

A63H Brinquedos, por exemplo piões, bonecas, arcos, blocos de construção

A63H 33/04 Blocos, tiras ou peças similares para armar construções

B - Operações de processamento e transporte

B60 Veículos em geral

C - Química e metalurgia

C22 Metalurgia; ligas ferrosas ou não-ferrosas; tratamento de ligas ou de metais não-ferrosos

C22F Modificação da estrutura física de metais não-ferrosos ou de ligas não-ferrosas

C22F 1/00 Modificação da estrutura física de metais ou ligas não-ferrosas por tratamento térmico ou por trabalho a quente ou a frio

D - Têxteis ou materiais flexíveis não incluídos em outro local

D06 Tratamento de têxteis ou similares; lavanderia; materiais flexíveis não incluídos em outro local

E - Construções fixas

E04 Edificação

E04B Estrutura geral de edificações; paredes; telhados; assoalhos; tetos; isolamento ou outras proteções de edificações

E04B 1/98 Proteção contra vibrações ou choques; contra destruição mecânica

E05 Fechaduras; chaves guarnições de janelas ou portas; cofres

E21 Perfuração do solo; mineração

F - Engenharia mecânica; iluminação; aquecimento; armas; explosão

F02 Motores de combustão; instalações de motores a gás quente ou de produtos de combustão

F03 Máquinas ou motores para líquidos; motores movidos a vento, molas, pesos ou outros; produção de força mecânica ou de empuxo propulsivo por reação, não incluída em outro local

F03G motores movidos à mola, peso, inércia ou similares; dispositivos ou mecanismos produtores de força mecânica, não incluídos em outro local ou que utilizam fontes de energia não incluídas em outro local

F03G 7/06 Mecanismos produtores de força mecânica não incluídos em outro local ou que utilizam fontes de energia não incluídas em outro local, usando a dilatação ou a contração dos corpos devido a aquecimento, resfriamento, secagem ou similares

F15 Atuadores por pressão de fluidos; hidráulica ou pneumática em geral

F16 Elementos ou unidades de engenharia; medidas gerais para assegurar e manter o funcionamento efetivo de máquinas ou instalações; isolamento térmico em geral

G – Física

G01 Medição; teste

G09 Educação; criptografia; apresentação visual; anúncios; logotipos

G09B Aparelhos educativos ou de demonstração; aparelhos para ensino ou comunicação com cegos, surdos ou mudos; modelos; planetários; globos; mapas; diagramas

G09B 23/08 Modelos para física (estática ou dinâmica)

H – Eletricidade

H01 Elementos elétricos básicos

BRASIL

Acesso à informação

Participe

Serviços

Legislação

Canais

Instituto Nacional da

**Propriedade Industrial**

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI

[ Início | Ajuda? ]

» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)**RESULTADO DA PESQUISA** (30/07/2017 às 18:39:22)**Pesquisa por:**

Resumo: ' "MEMÓRIA DE FORMA" \

Foram encontrados **100** processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página **1** de **5**.

<input checked="" type="checkbox"/>	Pedido	Depósito	Título	IPC
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2016 017389 2	27/07/2016	<b>DISPOSITIVO DE PARTIDA PARA UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA MÉTODO E FERRAMENTA PARA FORMAR UMA ESTRUTURA COMPÓSITA CONTORNADA</b>	F02N 11/02
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2014 025884 1	16/10/2014	<b>DISPOSITIVOS DE SEGURANÇA DE MERCADORIA PARA USO COM UMA CHAVE ELETRÔNICA</b>	B32B 15/08
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2016 000243 1	10/07/2014	<b>TRATAMENTO DE SUPERFÍCIE DE NITINOL POR ANODIZAÇÃO ELETROQUÍMICA</b>	E05B 15/16
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2014 011897 7	16/05/2014	<b>ARQUITETURA DE COMPUTADOR ORIENTADA E NOTIFICAÇÕES - ARQPON</b>	C25D 11/02
<input type="checkbox"/>	BR 10 2014 004070 6	21/02/2014	<b>VELA DE BARCO COMPREENDENDO ELEMENTOS DE MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA, APARELHO E MÉTODO PARA SUA OPERAÇÃO</b>	G06N 5/02
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2015 019837 6	13/02/2014	<b>SISTEMA DE DETECÇÃO DE TEMPERATURA</b>	B63H 9/06
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2014 000346 0	07/01/2014	<b>SISTEMA DE DETECÇÃO DE TEMPERATURA</b>	G01K 11/32
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2013 033336 0	23/12/2013	<b>SISTEMA DE DETECÇÃO DE TEMPERATURA</b>	H01H 37/32
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2015 011136 0	03/12/2013	<b>PARTE DE INSTALAÇÃO SANITÁRIA, ACESSÓRIO SANITÁRIO E MÉTODOPROCESSO PARA O CONTROLE DE UMA QUANTIDADE DE FLUXO DE ÁGUA FLUENTE POR MEIO DE UMA PARTE DE INSTALAÇÃO SANITÁRIA MECANISMO DE DISTRIBUIÇÃO PARA ADMINISTRAÇÃO DE FORMAS FARMACÊUTICAS EM ORIFÍCIOS CORPORAIS E APLICADOR COMPREENDENDO O MESMO</b>	E03C 1/04
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2015 009264 0	23/10/2013	<b>LUVA COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA MODIFICADO PARA A UNIÃO DE TUBULAÇÕES</b>	A61M 31/00
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2013 029247 8	22/10/2013	<b>DISPOSITIVO DE OXIGÊNIO DE EMERGÊNCIA, SISTEMA DE SUPRIMENTO DE OXIGÊNIO E MÉTODO PARA ATIVAR UM DISPOSITIVO DE OXIGÊNIO DE EMERGÊNCIA PARA PELO MENOS UM PASSAGEIRO DE UM AVIÃO</b>	C22C 9/00
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2013 016511 5	26/06/2013	<b>ACIONADOR MECÂNICO</b>	B64D 13/00
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2014 024293 3	27/03/2013	<b>DISPOSITIVO DE OCLUSÃO IMPLANTÁVEL, MÉTODO DE FAZER UM DISPOSITIVO DE OCLUSÃO IMPLANTÁVEL, DISPOSITIVO PARA LIMITAR O FLUXO DE FLUIDO E MÉTODO PARA OCLUIR UM LÚMEN NUM TECIDO CORPORAL</b>	F04B 19/00
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2014 017161 0	11/01/2013	<b>DISPOSITIVOS MÉDICOS QUE CONTÊM COMPOSIÇÕES DE POLÍMEROS COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	A61B 17/12
<input type="checkbox"/>	BR 11 2014 008220 0	05/10/2012	<b>FERRAMENTA DE POÇO COM VEDAÇÃO DINÂMICA DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA METAL COM METAL</b>	A61L 31/06
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2015 007591 6	05/10/2012	<b>KIT ENDOPRÓTESE CONVENCIONAL + DISPOSITIVO ENDOPRÓTESE PULSÁTIL DE AUXÍLIO À ATIVIDADE CIRCULATORIA APLICADO EM PACIENTES COM QUADRO DE INSUFICIÊNCIA CARDÍACA</b>	E21B 10/60
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2012 024070 0	24/09/2012	<b>MÉTODO DE FORMAR UM ARTIGO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA, DISPOSITIVO MÉDICO E DISPOSITIVO PARA A DEFORMAÇÃO DE UM ARTIGO DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	A61F 2/07
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2014 006184 0	14/09/2012	<b>CORPO FLUIDO - DINÂMICO DE CURVATURA VARIÁVEL UTILIZANDO MATERIAIS INTELIGENTES OTIMIZADOS</b>	C22F 1/10
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 10 2012 020561 0	16/08/2012	<b>DISPOSITIVOS PARAR OCLUSÃO DO CORAÇÃO</b>	F15D 1/00
<input checked="" type="checkbox"/>	BR 11 2014 003604 7	14/08/2012		A61B 7/00

Páginas de Resultados:

[1](#) | [2](#) | [3](#) | [4](#) | [5-Próxima](#)»

BRASIL

Acesso à informação

Participe

Serviços

Legislação

Canais

Instituto Nacional da

**Propriedade Industrial**

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI

[ Início | Ajuda? ]

» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)**RESULTADO DA PESQUISA** (30/07/2017 às 19:01:54)**Pesquisa por:**

Resumo: ' "MEMÓRIA DE FORMA" \

Foram encontrados **100** processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página **2** de **5**.

<input checked="" type="checkbox"/>	Pedido	Depósito	Título	IPC
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2014 003291 2</a>	10/08/2012	<b>DISPOSITIVOS PARA OCLUSÃO DE CORAÇÃO</b>	A61B 17/00
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2014 000939 2</a>	13/07/2012	<b>TERMOSTATO DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA PARA EQUIPAMENTO SUBMARINO</b>	G05D 23/02
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2013 027571 5</a>	27/04/2012	<b>APARELHO ELETRODOMÉSTICO</b>	E05B 47/00
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2013 024428 3</a>	28/03/2012	<b>APARELHO E MÉTODO PARA COMPLETAÇÃO DE POÇOS USANDO PASTA FLUÍDA CONTENDO PARTÍCULAS DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	E21B 33/13
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2013 017253 3</a>	05/01/2012	<b>"MÉTODO DE UTILIZAÇÃO DE UMA VEDAÇÃO PARA UMA LOCALIZAÇÃO SUBTERRÂNEA QUE TEM UMA DIMENSÃO DE FURO"</b>	E21B 33/127
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2013 004941 3</a>	07/10/2011	<b>MÉTODOS E SISTEMAS PARA LIGAÇÃO COVALENTE OU COCURA DE PARTES COMPOSTAS USANDO UM APARELHO SMP RÍGIDO / MALEÁVEL</b>	B29C 35/02
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2013 005430 1</a>	07/10/2011	<b>MÉTODOS E SISTEMAS PARA FORMAR PARTES COMPÓSITAS INTEGRAIS COM UM APARELHO DE SMP</b>	B29C 61/06
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 033655 0</a>	29/06/2011	<b>APARELHO PARA PREVENÇÃO DE MIGRAÇÃO DE GÁS EM ANULUS DE CIMENTO COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	E21B 33/13
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 024398 5</a>	25/03/2011	<b>MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA BASEADO EM UM ADESIVO ESTRUTURAL</b>	C09J 163/00
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 011391 7</a>	09/11/2010	<b>DISTRIBUIDOR DE PRODUTO FLUIDO</b>	B65D 83/14
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 013660 7</a>	05/11/2010	<b>FIXADOR DE AUTOEXPANSÃO</b>	F16B 1/00
<input type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 006527 0</a>	22/09/2010	<b>USO DE POLÍMERO COM MEMÓRIA DE FORMA DE ESPUMA PARA TRANSPORTE DE ÁCIDO OU OUTROS TRATAMENTOS DE FURO DE POÇO.</b>	E21B 33/12
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 013281 4</a>	16/09/2010	<b>ACUMULADOR HIDRÁULICO ACIONADO POR LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA</b>	F15B 15/14
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">BR 11 2012 004914 3</a>	30/08/2010	<b>APARELHO DE PROTEÇÃO, CÉLULA GALVÂNICA E BATERIA</b>	F03G 7/06
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 1003053-0</a>	09/08/2010	<b>SISTEMA DE CARACTERIZAÇÃO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA UTILIZANDO O EFEITO TERMOELÉTRICO</b>	G01N 27/14
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">MU 8902352-8</a>	30/10/2009	<b>BRAQUETE AUTOLIGÁVEL REVERSÍVEL DE BAIXO PERFIL COM DUPLA TRAVA</b>	A61C 7/12
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">MU 8802474-1</a>	03/11/2008	<b>BRAQUETE AUTOLIGÁVEL REVERSÍVEL DE BAIXO PERFIL COM DUPLA TRAVA</b>	A61C 7/12
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0806432-6</a>	23/01/2008	<b>ESPAÇADOR PARA SER UTILIZADO EM UMA OPERAÇÃO CIRÚRGICA PARA PROCESSOS DA COLUNA VERTEBRAL</b>	A61F 2/44
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0705438-6</a>	30/10/2007	<b>SISTEMA ELETROMECÂNICO PARA AJUSTE DE FOCO ACIONADO POR FIOS ATUADORES DE LIGA DE MEMÓRIA DE FORMA PARA USO EM CÂMERAS DE VÍDEO, MÁQUINAS FOTOGRÁFICAS, MICROSCÓPIOS, ENDOSCÓPIOS, ENDOCOPULERS, TELEOBJETIVAS, CÂMERAS INTRA-ORAIS OU QUAISQUER EQUIPAMENTOS QUE NECESSITEM DE UM SISTEMA PARA AJUSTE DE FOCALIZAÇÃO</b>	G02B 7/04
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0715879-3</a>	10/08/2007	<b>ATUADOR DE PRESSÃO, ROUPA E/OU VESTIMENTA, MÉTODO PARA APLICAR PRESSÃO SOBRE UM CORPO HUMANO OU ANIMAL, USO DO MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA, E, PRODUTO DE PROGRAMA DE COMPUTADOR</b>	A61H 1/02

Páginas de Resultados:

«Anterior- 1 | **2** | 3 | 4 | 5-Próxima»

Rua Mayrink Veiga, 9 - Centro - RJ - CEP: 20090-910 | Rua São Bento, 1 - Centro - RJ - CEP: 20090-010



BRASIL

Acesso à informação

Participe

Serviços

Legislação

Canais

Instituto Nacional da

**Propriedade Industrial**

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI

[ [Início](#) | [Ajuda?](#) ]» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)**RESULTADO DA PESQUISA** (30/07/2017 às 19:02:47)**Pesquisa por:**

Resumo: ' "MEMÓRIA DE FORMA" \

Foram encontrados **100** processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página **3** de **5**.

<input checked="" type="checkbox"/>	Pedido	Depósito	Título	IPC
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0701768-5	20/07/2007	<b>SISTEMA E MÉTODO DE INTRODUÇÃO DE FERRAMENTAL INTRA-CORPÓREO</b>	A61M 16/04
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0709084-6	23/03/2007	<b>DISPOSITIVO ENDOVASCULAR AUTO-EXPANSÍVEL PARA OCLUSÃO DE ANEURISMA</b>	A61F 2/06
<input type="checkbox"/>	PI 0708445-5	16/02/2007	<b>BALÃO INTRAGÁSTRICO COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	A61F 5/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0605447-1	24/11/2006	<b>DISPOSITIVO AFOGADOR PARA UM SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA</b>	F02M 35/108
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0616925-2	06/10/2006	<b>DISPOSITIVO DE OCLUSÃO DO APÊNDICE ATRIAL ESQUERDO E MÉTODO DE FECHAR UM APÊNDICE ATRIAL ESQUERDO DE UM CORAÇÃO HUMANO OU ANIMAL</b>	A61B 17/12
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0617066-8	05/09/2006	<b>DISPOSITIVOS E MÉTODO DE APRIMORAMENTO DA FUNÇÃO DE VÁLVULA CARDÍACA</b>	A61F 2/24
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0615226-0	25/08/2006	<b>ARMAÇÃO PARA REMODELAR UMA ORELHA OU UM NARIZ</b>	A61F 2/18
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0602804-7	17/07/2006	<b>INSTRUMENTO DE CANAL DE RAIZ TENDO UM REVESTIMENTO ABRASIVO E MÉTODO PARA A PRODUÇÃO DO MESMO</b>	A61C 5/04
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0612286-8	20/06/2006	<b>SISTEMA PARA TRATAMENTO DE OSSO</b>	A61B 17/56
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0601122-5	21/03/2006	<b>MÉTODO E APARELHO PARA ACONDICIONAR ARAME EM UM RECEPTÁCULO DE ARAME</b>	B65D 85/04
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0519444-0	25/10/2005	<b>DISPOSITIVO ATUADOR DE VÁLVULA</b>	F16K 31/70
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0517422-8	05/10/2005	<b>DISPOSITIVO COM ELEMENTO COM EFEITO DE MEMÓRIA DE FORMA</b>	H01L 41/12
<input type="checkbox"/>	PI 0504001-9	01/09/2005	<b>PROCESSO DE APLICAÇÃO DE DISPOSITIVOS DE MEMÓRIA EM APARELHOS DE TV E SOM</b>	H04N 5/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0502580-0	07/07/2005	<b>UTENSÍLIO DOMÉSTICO, PARTICULARMENTE UMA MÁQUINA DE LAVAR E/OU SECAR ROUPA COM UM DISPOSITIVO DE BLOQUEIO/LIBERAÇÃO DE PORTA QUE PODE SER ATIVADO ELETRICAMENTE</b>	D06F 37/28
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0512905-2	01/07/2005	<b>SUORTE ORTODÔNTICO AUTOLIGANTE</b>	A61C 3/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0502407-2	16/06/2005	<b>TERMINAL DE FIO AUTOTRAVANTE E SISTEMA DE TERMINAÇÃO DE FIO COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	H01R 9/24
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0501999-0	09/06/2005	<b>PROCESSO E SISTEMA PARA CONTROLAR UM OU MAIS ATUADORES COM MEMÓRIA-DE-FORMA</b>	B60G 17/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0509190-0	28/04/2005	<b>MÉTODO E APARELHO PARA O CONTROLE DE QUALIDADE CONTÍNUO DE UM ARAME DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA OU SIMILAR, E, ARAME DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	G01N 25/16
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0509378-3	31/03/2005	<b>HASTE INTRAMEDULAR COMPREENDENDO ELEMENTOS DE MATERIAL DE MEMÓRIA DE FORMA</b>	A61B 17/72
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0506144-0	21/01/2005	<b>SISTEMA PARA IMPLANTAR UM ORIFÍCIO DE ACESSO</b>	A61B 17/04

Páginas de Resultados:

«Anterior- 1 | 2 | **3** | 4 | 5-Próxima»

BRASIL

Acesso à informação

Participe

Serviços

Legislação

Canais

Instituto Nacional da

**Propriedade Industrial**

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI

[ Início | Ajuda? ]

» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)**RESULTADO DA PESQUISA** (30/07/2017 às 19:03:23)**Pesquisa por:**

Resumo: ' "MEMÓRIA DE FORMA" \

Foram encontrados **100** processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página **4** de **5**.

<input checked="" type="checkbox"/>	Pedido	Depósito	Título	IPC
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0405882-8</a>	29/12/2004	<b>DISPOSITIVO E MÉTODO PARA ANASTOMOSE INTRALUMENAL</b>	A61B 17/11
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0414415-5</a>	15/09/2004	<b>SISTEMA DE TRAVAMENTO DE DISPOSITIVO IMPLANTÁVEL E MÉTODOS DE USO</b>	A61M 5/32
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0414042-7</a>	16/08/2004	<b>REDES DE POLIÉSTERURETANO AMORFAS COM PROPRIEDADES DE MEMÓRIA DE FORMA</b>	C08G 18/42
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0403161-0</a>	29/07/2004	<b>APLICADOR DE PRODUTO COSMÉTICO E DISPOSITIVO DE ACONDICIONAMENTO E DE APLICAÇÃO DE UM PRODUTO</b>	A45D 34/04
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0409953-2</a>	07/04/2004	<b>MÉTODOS DE PROCESSAMENTO DE LIGAS DE MEMÓRIA DE FORMA DE NÍQUEL-TITÂNIO</b>	C22C 14/00
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0409361-5</a>	23/03/2004	<b>COMBINAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS DE MEMÓRIA DE FORMA</b>	C08L 87/00
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0407682-6</a>	18/02/2004	<b>DISPOSITIVO AUTO-EXPANDÍVEL PARA A ÁREA GASTROINTESTINAL OU URUGENITAL</b>	A61K 9/20
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0317971-0</a>	17/12/2003	<b>REDE DE POLÍMEROS FOTOSSENSÍVEIS</b>	A61L 27/14
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0315673-7</a>	21/10/2003	<b>SISTEMA DE CÉLULA COMBUSTÍVEL</b>	H01M 8/24
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0306466-2</a>	25/09/2003	<b>CONECTOR ELÉTRICO QUE TEM UMA CONEXÃO SEPARÁVEL E MÉTODO PARA ISTO</b>	H01H 85/02
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0314130-6</a>	22/09/2003	<b>PELÍCULA DE LAMINADO DE TEREFTALATO DE POLIBUTILENO COM MEMÓRIA DE FORMA E SEU MÉTODO DE PRODUÇÃO E USO, E MÉTODO DE PRODUÇÃO DA PELÍCULA DE TEREFTALATO DE POLIBUTILENO</b>	B32B 27/36
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0314124-1</a>	22/09/2003	<b>MÉTODO E APARELHO PARA PRODUÇÃO DE PELÍCULA DE TEREFTALATO DE POLIBUTILENO, E PELÍCULA DE LAMINADO DE TEREFTALATO DE POLIBUTILENO COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	B29C 47/00
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0301019-8</a>	14/04/2003	<b>DISPOSITIVO DE CONTROLE DE FLUXO DE AR</b>	F25D 17/04
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0304414-9</a>	10/04/2003	<b>PROCESSO PARA PRODUÇÃO DE EFEITOS DE MEMÓRIA DE FORMA EM CABELOS</b>	A61K 7/06
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0206350-6</a>	17/10/2002	<b>SISTEMA DE VEDAÇÃO PARA UMA ÁRVORE ROTATIVA EM UM CIRCUITO DE FLUIDO SOB PRESSÃO</b>	F16J 15/16
<input checked="" type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0203726-2</a>	12/09/2002	<b>DISTRIBUIDOR DE ÁGUA PARA UMA MÁQUINA DE LAVAR LOUÇAS OU DE LAVAR ROUPA SUJA AUTOMÁTICA, E, MÁQUINA DE LAVAR LOUÇAS OU DE LAVAR ROUPA SUJA AUTOMÁTICA.</b>	D06F 39/02
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0210792-9</a>	23/07/2002	<b>MATERIAIS ATIVADOS A UMIDADE POSSUINDO MEMÓRIA DE FORMA</b>	A61L 15/42
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0206543-6</a>	25/01/2002	<b>ARTIGO PARA ESCRITURA COM TINTA LÍQUIDA</b>	B43K 5/18
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0206691-2</a>	24/01/2002	<b>MOLDE OFTÁLMICO COMPREENDENDO POLÍMERO DE MEMÓRIA DE FORMA.</b>	C08F 212/08
<input type="checkbox"/>	<a href="#">PI 0206685-8</a>	24/01/2002	<b>POLÍMEROS DE MEMÓRIA DE FORMA.</b>	C08F 212/08

Páginas de Resultados:

«Anterior- 1 | 2 | 3 | **4** | 5-Próxima»

Rua Mayrink Veiga, 9 - Centro - RJ - CEP: 20090-910 | Rua São Bento, 1 - Centro - RJ - CEP: 20090-010



BRASIL

Acesso à informação

Participe

Serviços

Legislação

Canais

Instituto Nacional da

**Propriedade Industrial**

Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior

Consulta à Base de Dados do INPI

[ Início | Ajuda? ]

» Consultar por: [Base Patentes](#) | [Finalizar Sessão](#)**RESULTADO DA PESQUISA** (30/07/2017 às 19:04:28)**Pesquisa por:**

Resumo: ' "MEMÓRIA DE FORMA" \

Foram encontrados **100** processos que satisfazem à pesquisa. Mostrando página **5** de **5**.

<input checked="" type="checkbox"/>	Pedido	Depósito	Título	IPC
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0102696-8	08/05/2001	<b>CONTROLE DE CARACTERÍSTICA DA SUSPENSÃO USANDO MATERIAIS DE LIGA COM MEMÓRIA DE FORMA E MÉTODO PARA O MESMO</b>	B60G 17/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0015753-8	24/11/2000	<b>DISPOSITIVO PARA VEDAR UMA ABERTURA ATRAVÉS DA PAREDE DE UM ELEMENTO TUBULAR DE POÇO</b>	E21B 29/10
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0012557-1	18/07/2000	<b>RETENTOR ORTODÔNTICO PARA CORRIGIR PEQUENAS IRREGULARIDADES DOS INCISIVOS E/OU RETER AS POSIÇÕES DOS DENTES CORRIGIDAS E PROCESSO DE FABRICAR O RETENTOR ORTODÔNTICO.</b>	A61C 3/00
<input type="checkbox"/>	PI 0009298-3	24/03/2000	<b>SISTEMA DE EXIBIÇÃO DE LED INTEIRAMENTE A CORES</b>	G09G 3/32
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 0007923-5	01/02/2000	<b>DISPOSITIVO QUE COMPREENDE UMA PLURALIDADE DE FIOS COM MEMÓRIA DE FORMA E DE FILAMENTOS BIODEGRADÁVEIS E MÉTODO PARA CRIAR UM CORPO ADEQUADO PARA IMPLANTAÇÃO EM UMA ESTRUTURA ANATÔMICA.</b>	A61F 2/06
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9907392-7	23/12/1999	<b>ESPELHO RETROVISOR PARA VEÍCULO A MOTOR.</b>	B60R 1/08
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9914962-1	22/10/1999	<b>Pneumático, núcleo de rebordo, e, processos para a fabricação dos mesmos</b>	B60C 15/04
<input type="checkbox"/>	PI 9903969-9	30/08/1999	<b>APERFEIÇOAMENTO EM UM MECANISMO DE LIBERAÇÃO TENDO DISPOSITIVOS APROPRIADOS PARA RETER NO SEU INTERIOR E LIBERAR DO MESMO UM OBJETO, ATUADOR TERAPÊUTICO MICROFABRICADO E PROCESSO PARA PROPORCIONAR A DEPOSIÇÃO CONTROLADA DE UM OBJETO.</b>	A61M 25/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9911662-6	17/06/1999	<b>Dispositivo selante para fazer uma selagem contra uma superfície anular, e, processo de ajustar um selo contra uma superfície</b>	F16J 15/16
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9917232-1	26/03/1999	<b>PROCESSO PARA FABRICAR UM COMUTADOR BIESTÁVEL, E, COMUTADOR BIESTÁVEL</b>	H01H 1/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9803905-9	14/10/1998	<b>CORDONEL METÁLICO PARA REFORÇAR ARTIGOS FEITOS A PARTIR DE MATERIAL ELASTOMÉRICO, PNEUMÁTICO PARA RODAS DE VEÍCULOS, TECIDO EMBORRACHADO, E, PROCESSOS PARA FABRICAÇÃO DO TECIDO EMBORRACHADO E DO PNEUMÁTICO</b>	B60C 1/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9811338-0	19/08/1998	<b>CÉLULA ELETROQUÍMICA DO TIPO FORMADO POR UMA PRIMEIRA E UMA SEGUNDA MONTAGENS INTERRUPTORAS DE CORRENTE.</b>	H01M 2/34
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9713990-4	02/12/1997	<b>DIREÇÃO AUXILIAR HIDRÁULICA</b>	B62D 5/06
<input type="checkbox"/>	PI 9605192-2	04/10/1996	<b>COBERTURA PRÉ-FORMADA DE FIBRA DE VIDRO PARA PROTEÇÃO DE ISOLANTES TÉRMICOS TUBULARES</b>	F16L 59/00
<input type="checkbox"/>	PI 9607729-8	25/01/1996	<b>ARMAÇÃO DE METAL PARA ÓCULOS</b>	G02C 5/00
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9502356-9	14/07/1995	<b>LIGAS INTELIGENTES COM EFEITO MEMÓRIA DE FORMA APLICÁVEIS EM UM GRANDE INTERVALO DE TEMPERATURAS, PARTICULARMENTE SUPERIOR A 200 °C</b>	C22C 9/01
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9506976-3	02/03/1995	<b>"SONDA ADAPTADA PARA COLOCAÇÃO NA URETRA E DISPOSITIVO PARA COLOCAÇÃO DA MESMA"</b>	A61F 2/06
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9500867-5	22/02/1995	<b>FABRICAÇÃO DE LIGAS COM MEMÓRIA DE FORMA A BASE DE COBRE FUNDIDAS, SOLIDIFICADAS, LAMINADAS E MEMORIZADAS À ATMOSFERA AMBIENTE</b>	C22C 9/00
<input type="checkbox"/>	PI 9204131-0	23/10/1992	<b>GERADOR DE SINAL PARA GERAR UM SINAL DE CORREÇÃO A PARTIR DE UM SINAL DE DADO DIGITAL PARA FORMAR UM SINAL ANALÓGICO DE BAIXA DISTORÇÃO, PROCESSO DE GERAR UM SINAL DE CORREÇÃO PARA FORMAR UM SINAL ANALÓGICO QUE POSSUI BAIXA DISTORÇÃO DENTRO DE UMA FAIXA DE FREQUÊNCIAS DE INTERESSE, SEGMENTO DE SINAL DE CORREÇÃO DIGITAL, SINAL ANALÓGICO DE BAIXA DISTORÇÃO, PROCESSO DE PRODUZIR UM SINAL ANALÓGICO DE BAIXO RÚIDO DE UMA DADA FREQUÊNCIA, FLUXO DE BITS DIGITAIS DE SINAL DE CORREÇÃO, SINAL DE CORREÇÃO DIGITAL E SINAL ANALÓGICO DE BAIXO RÚIDO, E GERADOR DE SINAL ANALÓGICO</b>	H03M 1/06
<input checked="" type="checkbox"/>	PI 9007723-7	06/08/1990	<b>CONVERSOR DE FORÇA HIDRÁULICA DE MATERIAL COM MEMÓRIA DE FORMA</b>	F03G 7/06

Páginas de Resultados:

«Anterior- 1 | 2 | 3 | 4 | 5





## PATENTSCOPE

[Mobile](#) | [Deutsch](#) | [Español](#) | [Français](#) | [日本語](#) | [한국어](#) | [Português](#) | [Русский](#) | [中文](#) | [العربية](#)

Search International and National Patent Collections

WORLD INTELLECTUAL PROPERTY ORGANIZATION

[Search](#)   [Browse](#)   [Translate](#)   [Options](#)   [News](#)   [Login](#)   [Help](#)
[Home](#)   [IP Services](#)   [PATENTSCOPE](#)

 Results 1-10 of 4 for Criteria:FP:("memoria de forma" OR "LMF" OR "shape memory alloy" OR nitinol) AND (ANA:BR OR IADC:BR) Office(s):all  
 Language:EN Stemming: true

 prev 1 next Page: 1 / 1 [Go >](#)

Refine Search FP:("memoria de forma" OR "LMF" OR "shape memory alloy" OR nitinol) AND (ANA:BR OR IADC:BR)

[Search](#)
[RSS](#)

 Instant Help 

### Analysis

 Sort by: [Pub Date Desc](#) View [Simple](#) List Length 10 Machine translation

Int.Class	Appl.No	Title	Ctr	PubDate
			Inventor	
1. WO/2016/172772		JOINT MADE OF SHAPE MEMORY ALLOY AND USES THEREOF	WO	03.11.2016
F16L 13/14	PCT/BR2015/050049	FMC TECHNOLOGIES DO BRASIL LTDA	ZARAGOZA LABES, Alan	
The present invention relates to a joint that uses a shape memory alloy for joining water pipes used in submarine installations. The sleeve-like joint (1) made of a shape memory alloy is initially produced with an internal diameter (D1) smaller than the external diameter (D4) of the pipes (4), with an inner coating layer (2) made of a dielectric material, and an innermost layer (3) of anti-corrosive material adjacent to the outer surface of the pipes (4), the layer (3) of anti-corrosive material having protruding portions (5) on its inside to grip the outer surface of the pipes (4), forming striae (6) thereon.				
2. WO/2012/019262		PREFABRICATED LIGATURE WITH VARIABLE FRICTION	WO	16.02.2012
A61C 7/28	PCT/BR2011/000271	LOPES, Alexandre Gallo	LOPES, Alexandre Gallo	
Prefabricated ligature with variable friction, which comprises a ligature made from nitinol (1) that describes a rectangular outline similar to an "O" format, which is noteworthy in that the free ends (2) can be deflected to meet the need for affixing of the arch wire (3) to the bracket (5), resulting in variable frictional force.				
3. WO/2010/118488		MOTIVE GUIDE WIRE	WO	21.10.2010
A61M 25/09	PCT/BR2010/000117	SOARES DO NASCIMENTO, Luiz Mauricio	SOARES DO NASCIMENTO, Luiz Mauricio	
The invention relates to a motive guide wire comprising (figure 1) a guide wire (made of nitinol, polymers, stainless steel, platinum or cobalt-chrome) with an atraumatic tip (1) at the proximal end and a body (2) that can be of various sizes, and with branches or legs (3 and 4) that can be manipulated from the outside by means of a connection for moving the tip and body through 180° or more, and which branches can be optionally joined so as to take the same shape as the body of the guide wire.				
4. WO/2007/140557		PROSTHESIS FOR ANASTOMOSIS	WO	13.12.2007
A61B 17/11	PCT/BR2007/000141	GRANJA FILHO, Luiz Gonzaga	GRANJA FILHO, Luiz Gonzaga	
The present invention describes improvements for prosthetic devices used in end-to- side, end-to-end and side-to-side anastomosis without clamping and sutureless, without clamping and with suture, with clamping and sutureless, and/or with clamping and with suture, where the graft is inserted under the light of prosthesis or in at least one of the intraluminal portions (1,2) of the prosthesis tubular member. The improvements of the prosthesis can be produced in varied shapes and sizes to accommodate varied sizes and types of grafts, and also can be formed by two halves (16,17) that can be joined by pressure, bolts (20) or by a rocker portion (22), and can be made of any proper material for surgical use, such as titanium, stainless steel, nitinol, pyrolytic carbon, silicon, biodegradable materials, or any other biocompatible and inert materials.				

 Results 1-10 of 4 for Criteria:FP:("memoria de forma" OR "LMF" OR "shape memory alloy" OR nitinol) AND (ANA:BR OR IADC:BR) Office(s):all  
 Language:EN Stemming: true

 prev 1 next Page: 1 / 1 [Go >](#)

Refine Search FP:("memoria de forma" OR "LMF" OR "shape memory alloy" OR nitinol) AND (ANA:BR OR IADC:BR)

[Search](#)
[RSS](#)

 Instant Help